出版单位：
亚太社会创新研究院
Asia-Pacific Social Innovation Research Institute
ISSN 3137-2805
eISSN 3137-2813

Journal of Innovation and Development

创新与发展学报



研究院网站 | https://apsiri.com
期刊网站 | https://journal.apsiri.com/JID

1卷 01期
2026年

以创新拓展知识
以研究推动发展

致力于高质量中文学术出版

EXCELLENCE IN SCHOLARLY PUBLISHING

JID

创新与发展学报



JOURNAL OF INNOVATION AND DEVELOPMENT

国际性 · 高质量 · 开放获取

International ·High-Quality OA

编辑委员会
EDITORIAL BOARD

主编
EDITOR-IN-CHIEF

王礼生
多美自然（DOMEA Nature）

副主编
ASSOCIATE EDITORS

冯秀强　马来西亚博特拉大学
段海萍　马来西亚国民大学
霍虹屹　马来西亚博特拉大学
魏行智　西南林业大学

编委
EDITORIAL BOARD MEMBERS

穆科宇　香港科技大学
桂晴　马来西亚博特拉大学
管峰　中国石油大学（北京）
祁翼帆　北京中医药大学
沈炳　青岛理工大学
贾新旭　海尔集团
王晓华　昆明市交通投资集团有限责任公司
李馨　青岛黄海学院
郑美　山东外国语职业技术大学
张远平　东莞市经济贸易学校
董鹏　上海入微企业管理咨询有限公司

学科领域
RESEARCH AREAS

基础科学与前沿技术
工程技术与实践应用
信息科学与数字智能
科技创新与产业发展
交叉科学与综合研究
生态环境与可持续发展

出版信息 PUBLICATION INFORMATION

期刊名称	创新与发展学报
英文名称	Journal of Innovation and Development
期刊简称	JID
出版机构	亚太社会创新研究院（APSIRI）
出版地区	中国香港
出版语言	中文
出版频率	月刊
评审制度	单盲同行评审
出版模式	开放获取（Open Access）
许可协议	CC BY 4.0
版权归属	作者保留著作权

办刊宗旨 AIMS & SCOPE

本刊面向全球研究者开放，聚焦科学技术、创新发展及相关前沿议题，关注不同领域的理论探索、方法创新与实践应用，鼓励跨学科、交叉性及综合性研究，致力于推动原创知识生产、学术交流与研究成果传播。

稿件类型 ARTICLE TYPES

本刊接受原创研究论文、综述论文及具有明确学术贡献的方法研究，鼓励采用定量研究、定性研究、混合研究及跨学科研究方法。

所有投稿须具备明确的研究问题、规范的研究设计、充分的学术论证及可识别的原创贡献。

同行评审与学术质量 PEER REVIEW & QUALITY ASSURANCE

本刊实行单盲同行评审制度。稿件经编辑初审后，原则上送交至少两名相关领域专家独立评审。编辑委员会依据研究质量、原创贡献及专家评审意见作出录用决定。

本刊坚持学术独立与质量优先原则，所有稿件均须符合原创性、研究方法、学术诚信及出版伦理要求。

出版伦理 PUBLICATION ETHICS

本刊遵循学术诚信与负责任的科研出版原则，重视研究伦理、作者贡献、利益冲突披露及学术不端防范。

对涉嫌抄袭、数据造假、重复发表及其他违反出版伦理的行为，依据本刊出版伦理政策开展调查与处理。

开放获取与版权 OPEN ACCESS & COPYRIGHT

本刊采用开放获取出版模式，所有正式发表的文章均可免费阅读、下载与分享。

作者保留作品著作权，并依据知识共享署名 4.0 国际许可协议（CC BY 4.0）授权公众使用、传播及改编作品，使用时须按许可要求适当署名。

编辑部 EDITORIAL OFFICE

《创新与发展学报》编辑部
亚太社会创新研究院
Asia-Pacific Social Innovation Research Institute (APSIRI)

地址 / ADDRESS: RM D07, 8/F, KAI TAK FTY BUILDING, NO.99 KING FUK STREET, SANPOKONG, KL

官方网站 journal.apsiri.com/JID
在线投稿 通过期刊官方网站提交稿件

扫码了解更多

Articles are published under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

以创新拓展知识
以研究推动发展

致力于高质量中文学术出版
EXCELLENCE IN SCHOLARLY PUBLISHING

JID

《创新与发展学报》

JOURNAL OF INNOVATION AND DEVELOPMENT

2026

第 1 卷　第 1 期

VOLUME 1
ISSUE 1

国际性 · 高质量
开放获取

International
High-Quality
Open Access

亚太社会创新研究院

Asia-Pacific Social Innovation Research Institute

亚太社会创新研究院（APSIRI）是一家立足中国、面向全球的国际化学术研究与产业创新合作机构。研究院聚焦科技创新、社会发展、公共治理及可持续发展等领域，致力于推动跨学科研究、国际学术交流、学术出版与科研成果转化。通过整合全球学术资源，搭建开放、多元的国际合作平台，促进知识创新与经济社会高质量发展。

目 录

CONTENTS

01

中国式生物多样性产业化：理论逻辑、运行机制与实现路径

Chinese-Style Biodiversity Industrialization: Theoretical Logic, Operating Mechanisms and Implementation Pathways

王礼生　魏行智　1–8

02

生成式人工智能辅助学习中的能力替代风险与评价机制重构

Risks of Cognitive Substitution and the Redesign of Learning Assessment in Generative AI-Assisted Learning

尹彦浩　9–15

03

中小企业数字化转型中的流程互补与收益形成

Process Complementarity and Value Creation in SME Digital Transformation

张正跃　16–21

04

储能技术成本排序的时长与利用率条件

Duration and Utilization Conditions for Cost Rankings of Energy Storage Technologies

魏少康　22–28

05

城市自然解决方案的空间配置与受益公平

Spatial Planning and Equitable Benefits of Urban Nature-Based Solutions

雷雅涵　29–35

中国式生物多样性产业化：理论逻辑、运行机制与实现路径

王礼生[1]，魏行智[2*]

1. 多美自然(北京)国际文旅发展有限公司，北京 102600

2. 拾得自然教育科技（云南）有限责任公司，云南 丽江 674100

摘 要：生物多样性丧失与发展权益之间的张力，使“保护与利用能否兼容”成为全球治理难题。本文旨在阐明中国式生物多样性产业化的理论逻辑，并构建可推演的分析模型。研究整合自然资本理论、制度经济学与社会—生态系统框架，提出“红线约束—价值显化—权利重构—产业组织—收益反哺”闭环框架，建立保护—利用—分配耦合动力学模型，并以丽水、南平及国家公园实践进行机制印证。结果表明：反哺强度 η 使可持续利用上限按 $1/(1-\eta)$倍放大；当生态阈值高于本底水平的一半时，市场自发的最优利用强度必然突破阈值，而遵守红线的利润代价仅为$(2\kappa-1)^2$；存在使保护、社区与投资三方同时满足参与约束的制度供给门槛。据此，论文按生态敏感度与制度能力划分四类实现路径，为昆蒙框架下的中国实践提供理论解释与政策工具。

关键词：生物多样性产业化；中国式；价值显化；制度供给；保护—利用耦合模型

Chinese-Style Biodiversity Industrialization: Theoretical Logic, Operating Mechanisms and Implementation Pathways

Wang Lisheng[1], Wei Xingzhi[2*]

1. DOMEA Nature (Beijing) International Culture and Tourism Development Co., Ltd., Beijing 102600

2. SEED NATURE Education Technology (Yunnan) Co., Ltd., Lijiang, Yunnan 674100

Abstract: The tension between biodiversity loss and development rights makes the compatibility of conservation and use a core problem of global biodiversity governance. This paper explains the theoretical logic of Chinese-style biodiversity industrialization and builds a tractable model. Drawing on natural capital theory, institutional economics and the social–ecological systems framework, it proposes a closed-loop framework of ecological red line, value revelation, rights reconfiguration, industrial organization and benefit reinvestment, develops a dynamic conservation–use–distribution model, and illustrates the mechanisms with the practices of Lishui, Nanping and national parks. The results show that (1) reinvestment intensity η scales the sustainable use ceiling by $1/(1-\eta)$; (2) when the ecological threshold exceeds half of the baseline level, the market-optimal use intensity necessarily breaches the threshold, while the profit cost of observing the red line is only $(2\kappa-1)^2$; and (3) an institutional-supply threshold exists above which conservation, community and investor participation constraints hold simultaneously. Four implementation pathways are derived by ecological sensitivity and institutional capacity, offering a theoretical account and policy instruments for China's practice under the Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework.

Keywords: biodiversity industrialization; Chinese path; value revelation; institutional supply; conservation–use coupling model

DOI：https://doi.org/10.65192/7jqyfz97

© 2026 作者

本文依据 CC BY 4.0 许可协议开放获取

1 引言

生物多样性是人类福祉与经济活动的自然基础，其丧失将削弱经济体系赖以运行的自然资本[1]。2022 年通过的“昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架”（以下简称“昆蒙框架”）提出，到 2030 年有效保护和管理至少 30%的陆地、内陆水域及沿海和海洋区域，每年动员至少 2000 亿美元生物多样

作者简介：王礼生（1989—），女，高级职称，生物多样性经济与可持续发展。

通讯作者：魏行智，电子邮箱：81438519@qq.com

性相关资金，并削减至少 5000 亿美元有害补贴，同时指出每年约 7000 亿美元的资金缺口[2]。这表明仅靠公共财政与慈善资金难以支撑保护目标，生物多样性的多重价值必须在产业与市场体系中获得回报；而产业化本身又可能成为新的压力源。如何使二者相互强化而非相互抵消，是全球生物多样性治理的核心难题。

中国是《生物多样性公约》第十五次缔约方大会的主席国，也是以制度创新推动保护与发展统一的重要实践者。2021 年，三江源、大熊猫、东北虎豹、海南热带雨林、武夷山等首批 5 个国家公园设立，保护面积达 23 万平方公里，涵盖近 30%的陆域国家重点保护野生动植物种类[3]；2025 年通过的《国家公园法》自 2026 年 1 月 1 日起施行[4]；2024 年发布的《中国生物多样性保护战略与行动计划（2023—2030 年）》将“生物多样性可持续利用与惠益分享”列为四个优先领域之一，并涵盖生态产品价值实现、投融资等行动[5]；此前，2021 年中共中央办公厅、国务院办公厅已印发《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》[6]。中国由此形成了以国家公园为主体的保护体系、以价值实现为主线的转化制度和以惠益分享为导向的利用规则相结合的制度组合。

既有研究大致沿三条路径展开。其一是生态系统服务价值评估与补偿路径：从全球生态系统服务价值核算[7]，到“自然对人的贡献”框架[8]、生态系统生产总值（GEP）核算[9,10]和环境服务付费[11]，解决了价值“看得见、算得清”的问题，却较少回答价值如何成为可持续的产业收益。其二是制度与治理路径：以公共池塘资源治理[12]、社会—生态系统框架[13]和制度变迁理论[14]为代表；国内研究多从类型归纳出发总结生态产品价值实现模式[15-17]，但对生态阈值、收益反哺与分配约束之间的内在联系缺少统一刻画。其三是产业与能力路径，强调经济复杂度、商业模式与使命导向创新[18-20]，却常把生态约束视为外生条件。与此同时，批判性文献提醒，自然的金融化与“绿色圈占”可能侵蚀社区权益[21,22]。

本文的边际贡献有三：一是界定中国式生物多样性产业化的概念，并指出其区别于市场化保护的制度特征；二是构建“红线—显化—重构—组织—反哺”闭环框架，据此建立保护—利用—分配耦合动力学模型，推演出四个命题；三是结合丽水、南平与国家公园等实践进行机制印证，并提出分类实现路径。

2 理论逻辑

2.1 概念界定与理论基础

本文将生物多样性产业化界定为：在不突破生态阈值的前提下，通过确权、核算、认证、品牌与组织创新，把生物多样性所蕴含的调节服务价值、物质产品价值、遗传资源价值与文化价值转化为可交易、可积累的产业收益，并将其中一部分持续反哺保护的过程。它区别于三类做法：以采挖和占用为特征的资源攫取；缺乏内生造血能力的一次性转移支付；脱离生态本底的概念化绿色金融。理论上，这一界定建立在自然资本与“自然对人的贡献”的多元价值观之上[1,8]：生物多样性既是生产要素，又是生态系统韧性的基础，其价值只有在制度中被识别、度量和分配，才可能转化为产业收益。

2.2 价值显化困境

产业化的首要障碍是价值显化困境，表现为三点。第一，公共性与外部性。调节服务具有非排他性和非竞争性，个体保护者难以独占收益，公地悲剧由此产生[23]；环境服务付费虽可部分内部化外部性，但条件性、额外性要求与交易成本使其适用范围受限[11]。第二，信息与选择价值。遗传资源与未知物种的价值往往在被利用时才显现，前期保护者难以分享后端收益，数字序列信息（DSI）的兴起进一步放大了这种错位，国际社会为此设立“卡利基金”以分享其惠益[24]。第三，非线性阈值。生态系统越过临界点后可能发生难以逆转的状态转换[25,26]，边际分析失效，只能以事前约束替代事后补偿。三者共同意味着，生物多样性产业化不是纯粹的市场问题，而是制度供给的函数。

2.3 中国式的制度逻辑

“中国式”并非地理标签，而是一组相互耦合的制度安排，可概括为四个方面。其一，目标函数上，以人与自然和谐共生的现代化为统领[27]，保护与发展统一于同一价值目标，而非互为代价。其二，产权结构上，自然资源归全民或集体所有，所有权与经营权、收益权可以分置并以授权方式配置给经营主体，这使“所有者缺位”的公共资源得以进入经营，并降低交易成本[12,14]。其三，治理结构上，形成有为政府、有效市场与有机社区协同的格局：新结构经济学强调政府在软硬基础设施上的先导作用[28]，使命导向创新理论亦把国家视为早期风险投资者[20]，丽水的经验即被官方总结为“后发地区的有为政府”[29]。其四，分配规则上，共同富裕导向使分配约束内生于制度，例如《国家公园法》规定生态管护岗位应当优先聘用当地居民[30]。与强调交易与资本化的市场化保护相比[21]，红线先于市场、授权先于交易、政府先行于显化环节、分配约束与保护约束同时写入制度，构成中国式产业化的结构性特征，也呼应了市场必须嵌入社会与制度的经典论断[31,32]。

2.4 闭环分析框架

据此，本文提出“红线约束—价值显化—权利重构—产业组织—收益反哺”闭环框架（图 1）。红线约束界定可利用空间，以生物多样性存量 B 及其阈值比例κ表示；价值显化通过核算、认证与品牌提高单位利用的净收益ρ，其强度由制度供给 I 决定；权利重构通过经营权、收益权的分置与整合降低交易成本，使稳定的长期经营成为可能；产业组织把分散主体纳入链主企业、合作社与科研机构协同的价值链，决定利用强度 h；收益反哺把净收益按比例 s、λ、e 分别配置给保护、社区与经营者，其中反哺部分回到存量 B，使系统闭环。有为政府、有效市场与有机社区三类主体贯穿全环。



图 1 中国式生物多样性产业化的闭环分析框架

3 模型构建与命题推演

3.1 基本设定

考虑一个区域性生物多样性资源系统。设 $B(t)$为生物多样性存量指数，K 为其本底水平；存量按逻辑斯蒂方式自我更新，产业以强度 h（单位存量被利用的比例）取用，并将净收益的 s 部分反哺保护，则

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = rB\left(1-\frac{B}{K}\right) - hB + \varphi s\pi \qquad (1)$$

式中，r 为内禀恢复率，φ为反哺转化效率，π为产业净收益流量。设$\pi=\rho(I)hB$，其中$\rho(I)=\rho_0+\theta I$为单位利用的净收益率，ρ_0为无制度供给时的基准收益，I为制度供给水平，$\theta>0$为制度溢价弹性；ρ的提高源于认证品牌带来的溢价与确权整合带来的交易成本下降（符号见表 1）。

表 1. 模型变量与参数的含义及现实对应

符号	含义	现实对应
B，K	生物多样性存量指数及其本底水平	如生物多样性完整性指数、关键物种丰度
κ	生态阈值占本底的比例（红线系数）	生态保护红线、核心保护区划定
r	内禀恢复率	生态系统自然恢复力
h	产业利用强度	采集、占用、游憩压力占存量的比例
I，$\rho(I)$	制度供给水平；单位利用净收益率 $\rho=\rho_0+\theta I$	确权、核算、认证、品牌、交易平台；认证溢价减交易成本
s，ϕ，η	反哺比例；反哺转化效率；反哺强度 $\eta=\phi s\rho$	收益提取用于巡护修复；单位投入的恢复效果
λ，e，w，π_f	社区与经营者分享比例；社区机会成本；经营者最低回报	生态管护岗位、分红；放弃采挖的损失；投资回报要求

定义反哺强度$\eta\equiv\varphi s\rho(I)$，式（1）化为 $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t=B[r(1-B/K)-(1-\eta)h]$，即“有效取用率”为$(1-\eta)h$ 的逻辑斯蒂方程。当$(1-\eta)h<r$ 时，系统存在唯一正稳态且全局稳定：

$$B^{*}=K\left[1-\frac{(1-\eta)h}{r}\right] \tag{2}$$

设生态阈值为κK（$0<\kappa<1$），存量低于该水平将发生难以逆转的退化[25]，κ越大表示生态越敏感。模型假定经营者拥有稳定的长期经营权（权利重构之后的状态），因而会内化存量对未来收益的影响。

3.2 命题推演

命题 1（可持续利用上限） 稳态存量不低于阈值，当且仅当 $h\le h^{*}$，其中

$$h^{*}=\frac{r(1-\kappa)}{(1-\eta)} \tag{3}$$

h^{*}随η单调递增且为凸函数：无反哺（$\eta=0$）时上限为 $r(1-\kappa)$，反哺使上限放大 $1/(1-\eta)$倍。证明：由式（2），$B^{*}\ge\kappa K$ 等价于$(1-\eta)h/r\le 1-\kappa$，整理即得；h^{*}对η的一、二阶导数分别为$r(1-\kappa)/(1-\eta)^{2}$与$2r(1-\kappa)/(1-\eta)^{3}$，均为正。□命题 1 表明，反哺不是单纯的成本，而是扩大可利用空间的生产性投入，η每提高一分，产业规模的安全上限便呈乘数式放大。

命题 2（红线的必要性与代价） 稳态下，独占经营者的利润最大化强度为

$$h_{\mathrm{m}}=\frac{r}{2[1-\eta]} \tag{4}$$

且 $h_{\mathrm{m}}/h^{*}=1/[2(1-\kappa)]$，与$\eta$无关。因此：（i）若$\kappa\le 1/2$，则 $h_{\mathrm{m}}\le h^{*}$，市场自发选择不突破阈值；（ii）若$\kappa>1/2$，则 $h_{\mathrm{m}}>h^{*}$，自发选择必然突破阈值，须以红线约束 $h\le h^{*}$；（iii）$\kappa>1/2$ 时，遵守红线的相对利润损失为

$$1-\frac{\pi(h^{*})}{\pi(h_{\mathrm{m}})}=(2\kappa-1)^{2} \tag{5}$$

证明：稳态利润 $\pi(h)=\rho Kh[1-(1-\eta)h/r]$，一阶条件给出式（4）；令 $x=h/h_{\mathrm{m}}$，则$\pi(h)/\pi(h_{\mathrm{m}})=2x-x^{2}=1-(1-x)^{2}$，代入 $x=2(1-\kappa)$即得式（5）。□命题 2 有两点含义：其一，红线并非外加于市场的负担，而是高敏感生态（$\kappa>1/2$）下的理性制度——无论反哺强度如何，市场最优强度都超出安全上限；其二，红线的利润代价为$(2\kappa-1)^{2}$，当$\kappa=0.6$ 时仅约 4%，而其避免的是越过阈值后难以逆转的损失。

命题 3（制度供给的正向乘数） 设红线约束有效，则稳态可分配收益为

$$\pi^{\circ}=\frac{\rho rK\Phi(\kappa)}{(1-\eta)},\quad \Phi(\kappa)=\max_{b\in[\kappa,1]}b(1-b) \tag{6}$$

当$\eta<1$ 时，π°随ρ（从而随制度供给 I）严格递增且为凸函数，且给定利用强度下的稳态存量 B^{*} 随 I 递增。证明：记 $C=rK\Phi(\kappa)$，$\pi^{\circ}=C\rho/(1-\varphi s\rho)$，则 $\mathrm{d}\pi^{\circ}/\mathrm{d}\rho=C/(1-\varphi s\rho)^{2}>0$，二阶导数$2\varphi sC/(1-\varphi s\rho)^{3}>0$；又 B^{*}随η递增，η随ρ递增。□制度供给由此通过两条渠道发挥乘数作用：直接提高单位利用收益ρ，并经η放大安全上限；收益既可用于扩大产业规模，也可用于提高生态安全边际，保护与发展的取舍得以缓解。这是中国式产业化强调“制度先行”的理论依据。

命题 4（三方激励相容与制度门槛） 令反哺比例固定为法定或契约确定的 $\bar{s}$，其余收益在社区（λ）与经营者（$e=1-\bar{s}-\lambda$）之间分配；社区参与要求$\lambda\pi^{\circ}\geq w$（w 为社区保护与参与的机会成本），经营者要求 $e\pi^{\circ}\geq\pi_f$（π_f为最低投资回报）。存在满足三方约束的分配方案，当且仅当

$$(1-\bar{s})\pi^{\circ}\geq w+\pi_f \tag{7}$$

等价地，存在制度供给门槛

$$\rho_c=\frac{w+\pi_f}{(1-\bar{s})rK\Phi(\kappa)+\varphi\bar{s}(w+\pi_f)} \tag{8}$$

只有当$\rho(I)\geq\rho_c$，即 $I\geq I_c=(\rho_c-\rho_0)/\theta$时，产业化才在三方意义上可行；若 I_c超出地方可达的制度能力，则应转向以公共财政托底的保护模式。证明：存在$\lambda\geq w/\pi^{\circ}$与 $e\geq\pi_f/\pi^{\circ}$满足$\lambda+e=1-\bar{s}$，当且仅当$(w+\pi_f)/\pi^{\circ}\leq 1-\bar{s}$，即式（7）；将式（6）代入并利用$\eta=\varphi\bar{s}\rho$整理，得$\rho\geq\rho_c$。□此外，$\rho_c$对 $\bar{s}$的导数符号取决于 $rK\Phi(\kappa)$与$\varphi(w+\pi_f)$的大小：自然生产力相对较高而转化效率φ较低时，提高反哺比例会抬高门槛；转化效率较高时，反哺具有自我融资性质。

3.3 数值推演

为直观展示上述命题，取示意性参数：r=0.20，K=1，κ=0.6，φ=1，$\bar{s}$=0.4，w=0.012，π_f=0.015，ρ=1（图 2；参数仅用于说明模型性质，并非实证估计）。图 2(a)显示，η由 0 升至 0.4 和 0.6 时，安全利用上限 h^*由 0.08 升至 0.13 和 0.20，与命题 1 一致；图 2(b)显示，η=0.4 时利润最大化强度 $h_m\approx0.167$ 超过 $h^*\approx0.133$，对应稳态存量降至本底的 50%、低于 60%的红线，而遵守红线的利润仅下降 4%，与$(2\kappa-1)^2=0.04$ 一致；图 2(c)显示，示例参数下$\rho_c\approx0.68$，若初始ρ_0低于该值，须通过制度供给抬升ρ，三方可行域才会出现。

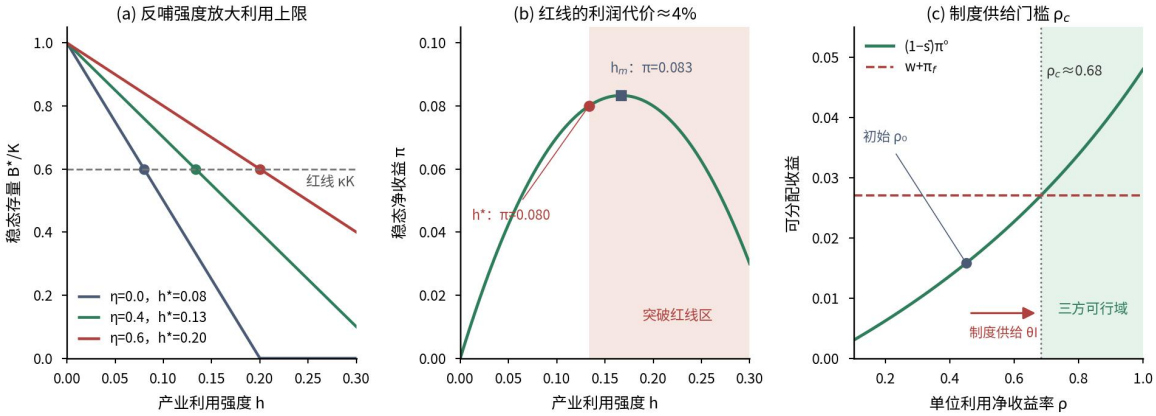


图 2 模型命题的数值推演

4 运行机制与案例印证

模型中的参数对应四类可操作的运行机制，分别作用于闭环的不同环节。表 2 将机制、典型实践、模型参数与约束条件对应起来；案例仅用于机制印证，而非对命题的统计检验。

表 2. 四类运行机制的典型实践与模型参数对应

模式类型	代表性实践	作用环节与模型参数	主要约束与风险
区域公用品牌型	丽水“丽水山耕”区域公用品牌[29]	价值显化：认证、溯源与品牌溢价，提高 ρ	标准执行与品牌维护成本；溢价数据为官方口径
资源整合收储型	南平“森林生态银行”[33]	权利重构：整合分散林权，保底加分成合约，降低交易成本、保障 λ	兜底责任与分成比例需动态校准
国家公园共管型	首批 5 个国家公园及生态管护岗位[3,30]	红线约束与分配：κ 较高，社区收益 λ 以岗位形式实现	利用空间受限，需外部资金托底
遗传资源—生物技术型	种业、中药材、生物制造及 DSI 惠益分享[5,24]	产业组织与反哺：以技术提升单位利用价值，经 s 与 λ 分享惠益	获取与惠益分享规则尚在建立；国际安排非强制

4.1 价值显化机制

价值显化的核心，是把难以观察的生态质量转化为可核验的质量信号，从而提高支付意愿并降低交易成本。核算是起点：GEP 核算将调节服务、物质产品与文化服务统一计量[9,10]，丽水据此评估生态产品价值实现率[34]。认证与品牌是转化的关键："丽水山耕"以政府所有、协会注册、国有企业运营的方式，建成覆盖全市域、全品类、全产业链的区域公用品牌，并建立标准认证与全程溯源体系，官方披露其截至 2018 年 6 月底的产品平均溢价率超过 30%[29]（该数据为官方口径，未经独立核验）。这对应模型中$\rho(I)$的提高，也说明在经营主体分散、品牌弱小的后发地区，政府先行投入品牌基础设施具有"制度企业家"的功能[20]。

4.2 权利重构机制

权利重构解决"谁能经营、经营多久、收益归谁"的问题。已有研究把森林资源生态产品价值实现概括为政府主导的资产化、市场主导的资本化以及二者交叉的价值反馈机制[35]。以南平"森林生态银行"为例，集体林权确权到户后资源高度分散，林农面临营林成本高、经营效率低、流转不畅与融资渠道窄等困难；该模式以"保底收益+浮动分成"的阶梯合约，由专业运营主体在林农、社会资本与金融机构之间发挥价格标杆、效率筛选、交易撮合和信用背书功能[33]。一方面，规模化整合降低了交易成本、提高了ρ；另一方面，稳定的长期经营安排为模型中"经营者内化存量影响"的假设提供了制度条件[14]。

4.3 产业组织机制

产业组织把确权后的资源与认证后的品牌转化为有规模、有技术含量的价值链。一方面，链主企业、合作社与科研机构的协同可降低分散经营的学习与协调成本，"丽水山耕"的"母子品牌"模式即通过品牌所有者、运营公司与生产主体的分工实现全产业链整合[29]。另一方面，经济复杂度研究表明，一个地区能够生产的产品取决于其积累的能力组合[18]；生物多样性作为地方的"能力基底"，可支持生态农业、林下经济、中药材、生物制造、种业与自然教育等相邻产业的多样化。商业模式的设计应兼顾价值创造与价值捕获[19]，并以命题 2 所示的强度上限与负面清单约束利用强度。

4.4 反哺与分配机制

反哺与分配机制对应 s、λ、e 三个比例。国内层面，《国家公园法》设"参与和共享"专章，并规定生态管护岗位优先聘用当地居民[4,30]，把社区收益λ以岗位与参与权利的形式制度化；国际层面，"卡利基金"规定使用 DSI 的大型企业"应当"将利润的 1%或收入的 0.1%贡献给基金，且至少 50%用于原住民和地方社区[24]，《行动计划》也涵盖惠益分享与投融资行动[5]。需要指出，上述国际安排并非强制性义务，其约束力有赖于各国配套的国内措施，这正是反哺比例 s需以法定或契约形式确定的原因。

4.5 风险防控与动态反馈

闭环的稳定性取决于风险防控。第一，生态风险：以监测网络动态校准阈值κ，并将产业准入负面清单与红线挂钩，防止"先利用、后治理"。第二，社会风险：金融化与"绿色圈占"可能使外部资本挤占社区权益[21,22]，须通过社区共管、优先聘用与收益保底保障λ。第三，价值风险：高估或虚增生态产品价值会削弱市场信任，核算口径与认证标准需要统一[17,36]。三类风险管理的共同逻辑，是使市场嵌入制度[31,32]。

5 实现路径与政策含义

5.1 分类实现路径

命题 2 与命题 4 表明，路径选择取决于两个维度：生态敏感度κ（决定红线是否约束市场）与制度缺口（I 相对 I_c 的位置，决定三方可行域是否存在）。据此可划分四类路径。（1）高敏感—制度能力充足，宜走“限度利用·品牌溢价型”路径，以特许经营、区域公用品牌和自然教育等低强度利用为主，严守 $h \le h^*$，并以品牌溢价提高ρ。（2）高敏感—制度能力不足，宜走“保护优先·补偿托底型”路径，以财政生态补偿和生态管护岗位保障社区收益，先补足制度门槛，不宜强推产业化。（3）低敏感—制度能力充足，宜走“创新驱动·规模扩张型”路径，依托种业、中药材和生物制造等技术密集型产业，重点完善遗传资源获取与惠益分享规则。（4）低敏感—制度能力不足，宜走“能力培育·渐进转化型”路径，先确权、核算并建立标准，再引入链主企业。四类路径并非静态：随着 I 提升与监测数据积累，区域可沿“能力培育→品牌溢价/创新驱动”逐步迁移。

5.2 政策含义

第一，红线前置。把κ纳入产业准入负面清单，并依据监测数据动态修订。第二，统一核算。GEP 核算与生物多样性本底指标并行，避免单一货币化口径[8,10]。第三，制度供给清单化。把确权、核算、认证、品牌与交易平台作为公共服务清单，提升 I 以越过 I_c。第四，反哺法定化。以法律或特许协议确定 s 的区间并与监测结果挂钩；当η偏低时，优先提升反哺转化效率φ。第五，社区权益保障。通过优先聘用、保底分红与知情同意保障λ，防范“绿色圈占”[22]。第六，对接国际规则。以《行动计划》为依托，完善遗传资源与 DSI 惠益分享的国内规则，衔接卡利基金等多边安排[5,24]。

6 结论与展望

本文从价值显化困境出发，提出“红线—显化—重构—组织—反哺”闭环框架，并构建保护—利用—分配耦合动力学模型。主要结论有三：其一，反哺强度以 $1/(1-\eta)$的乘数放大可持续利用上限，保护与产业化在制度条件下可以相互强化；其二，当生态阈值超过本底的一半时，市场自发的最优利用强度必然越界，红线是高敏感生态下的理性制度，其利润代价仅为$(2\kappa-1)^2$；其三，存在使保护、社区与投资三方相容的制度供给门槛，制度供给通过乘数效应决定产业化是否可行。据此提出的四类实现路径，为昆蒙框架下的中国实践提供了分类施策的理论依据。

本文的局限在于：模型为高度抽象的单一存量模型，假定反哺线性转化、经营者拥有稳定经营权，未纳入不确定性、空间异质性与多物种相互作用；案例部分仅为机制印证，所引溢价等数据多为官方披露口径。未来研究可利用国家公园及周边县域的面板数据估计$\rho(I)$与η，考虑阈值附近的滞后效应与随机冲击，并引入多主体博弈与空间溢出，以检验命题的经验适用范围。

参考文献

[1] DASGUPTA P. The economics of biodiversity: the Dasgupta review[R]. London: HM Treasury, 2021.

[2] Convention on Biological Diversity. Kunming-Montreal global biodiversity framework: Decision 15/4[R]. Montreal: CBD Secretariat, 2022.

[3] 人民日报. 国家公园依法建 不是简单“圈起来”[EB/OL]. 新华网, (2025-09-25)[2026-10-14]. https://www.news.cn/travel/20250925/856c7c84c8c2433fa8d006b434675c72/c.html.

[4] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国国家公园法[Z]. 2025-09-12.

[5] 生态环境部. 生态环境部发布《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023-2030 年)》[EB/OL]. (2024-01-18)[2026-10-14]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/202401/t20240118_1064111.shtml.

[6] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于建立健全生态产品价值实现机制的意见[Z]. 2021.

[7] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[8] DÍAZ S, PASCUAL U, STENSEKE M, et al. Assessing nature's contributions to people[J]. Science, 2018, 359(6373): 270-272.

[9] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
[10] OUYANG Z Y, SONG C S, ZHENG H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(25): 14593-14601.
[11] WUNDER S. Revisiting the concept of payments for environmental services[J]. Ecological Economics, 2015, 117: 234-243.
[12] OSTROM E. Governing the commons: the evolution of institutions for collective action[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
[13] OSTROM E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. Science, 2009, 325(5939): 419-422.
[14] NORTH D C. Institutions, institutional change and economic performance[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
[15] 张林波, 虞慧怡, 李岱青, 等. 生态产品内涵与其价值实现途径[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 173-183.
[16] 王夏晖, 朱媛媛, 文一惠, 等. 生态产品价值实现的基本模式与创新路径[J]. 环境保护, 2020, 48(14): 14-17.
[17] 张林波, 虞慧怡, 郝超志, 等. 国内外生态产品价值实现的实践模式与路径[J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1407-1416.
[18] HIDALGO C A, HAUSMANN R. The building blocks of economic complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(26): 10570-10575.
[19] TEECE D J. Business models, business strategy and innovation[J]. Long Range Planning, 2010, 43(2/3): 172-194.
[20] MAZZUCATO M. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities[J]. Industrial and Corporate Change, 2018, 27(5): 803-815.
[21] SULLIVAN S. Banking nature? The spectacular financialisation of environmental conservation[J]. Antipode, 2013, 45(1): 198-217.
[22] FAIRHEAD J, LEACH M, SCOONES I. Green grabbing: a new appropriation of nature?[J]. Journal of Peasant Studies, 2012, 39(2): 237-261.
[23] HARDIN G. The tragedy of the commons[J]. Science, 1968, 162(3859): 1243-1248.
[24] Convention on Biological Diversity. Digital sequence information on genetic resources: Decision 16/2[R]. Cali: CBD Secretariat, 2024.
[25] SCHEFFER M, CARPENTER S, FOLEY J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems[J]. Nature, 2001, 413(6856): 591-596.
[26] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet[J]. Science, 2015, 347(6223): 1259855.
[27] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[M]. 北京: 人民出版社, 2022.
[28] 林毅夫. 新结构经济学: 反思经济发展与政策的理论框架[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
[29] 国家发展和改革委员会基础司. 丽水山耕: 品牌溢价下的有效机制[EB/OL]. (2021-08-27)[2026-10-14]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/jljqstcpjzsxjz/jdal/202108/t20210827_1294852.html.
[30] 新华社. 首次立法！国家公园筑起“法治屏障”[EB/OL]. (2025-09-13)[2026-10-14]. https://www.news.cn/legal/20250913/d5a3aab1729747d9835255142ffa87cd/c.html.
[31] POLANYI K. The great transformation: the political and economic origins of our time[M]. New York: Farrar & Rinehart, 1944.
[32] GRANOVETTER M. Economic action and social structure: the problem of embeddedness[J]. American Journal of Sociology, 1985, 91(3): 481-510.
[33] 杨超, 高扬, 黄瑜萍, 等. 南平“森林生态银行”推动生态产品价值实现的路径研究[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2026, 25(1): 47-54.
[34] 林亦晴, 徐卫华, 李璞, 等. 生态产品价值实现率评价方法: 以丽水市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 189-197.
[35] 李致远, 谢花林. 我国森林资源生态产品价值实现的基本逻辑、核心机制与模式[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5351-5366.
[36] 廖茂林, 潘家华, 孙博文. 生态产品的内涵辨析及价值实现路径[J]. 经济体制改革, 2021(1): 12-18.

生成式人工智能辅助学习中的能力替代风险与评价机制重构

尹彦浩*

青岛工学院，山东 青岛 266300

摘 要：生成式人工智能能够改善学习任务的完成效率，但辅助条件下的高质量产出是否意味着学生获得了相应能力，仍须结合学习过程和评价证据判断。本文以认知负荷、认知卸载、自我调节学习及评价效度理论为基础，对相关实验研究、元分析和教育评价文献进行问题导向的概念综合。分析认为，能力替代风险形成于人工智能承担关键目标活动、学生缺少对反馈的自主加工、评价以辅助作品推断独立能力的结合情形。现有实验同时报告了人工智能辅导的学习收益与无约束使用的不利结果，说明工具设计、学习者基础与测量条件不可忽略。基于此，本文区分辅助任务表现、学习过程中的认知责任和独立迁移表现，提出与学习目标相匹配的分层证据评价思路，并讨论其实施条件与检验路径。研究为解释人工智能介入后学习成绩与能力形成的关系提供了分析框架。

关键词：生成式人工智能；学习评价；认知卸载；独立能力；评价效度

Risks of Cognitive Substitution and the Redesign of Learning Assessment in Generative AI-Assisted Learning

YIN Yanhao*

Qingdao Institute of Technology, Qingdao, Shandong 650500

Abstract: Generative AI can improve the efficiency and quality of students' task completion, but successful AI-assisted performance does not necessarily demonstrate independently acquired competence. Drawing on cognitive load theory, cognitive offloading, self-regulated learning, and assessment validity, this conceptual paper synthesizes findings from experimental studies, meta-analyses, and educational assessment research. It argues that the risk of cognitive substitution arises when AI performs cognitive operations central to the intended learning outcomes, learners do not meaningfully process the feedback, and assessment practices infer independent competence from AI-assisted products. Evidence of both beneficial AI tutoring and adverse effects of unrestricted use indicates that tool design, prior knowledge, and outcome measures matter. The paper distinguishes AI-assisted task performance, learners' cognitive responsibility during the process, and independent transfer performance, and develops an assessment rationale that aligns these sources of evidence with specific learning goals. The framework links learning goals, task conditions, and assessment evidence to guide the design and examination of assessment practices in AI-mediated educational settings.

Keywords: generative artificial intelligence; learning assessment; cognitive offloading; independent competence; assessment validity

DOI：https://doi.org/10.65192/fe9jq827

© 2026 作者

本文依据 CC BY 4.0 许可协议开放获取

1 引言

生成式人工智能进入学习场景后，学生可以在提出问题的同时获得完整解释、示范解答和修改建议。与传统检索工具不同，这类系统不仅提供资料，还可能直接承担分析、论证和表达等学习任务中的关键步骤。Yan 等指出，生成式人工智能扩大了个性化支持和即时反馈的可能性，也改变了教师判断学习结果的前提条件[1]。当学生提交的作品已经包含工具的认知贡献时，作品质量与学生实际掌握的能力之间不再具有理所当然的对应关系。

作者简介：尹彦浩（1996—），男，硕士研究生，助教，主要研究方向为外国语言文学，外语教育
通讯作者：尹彦浩，yinyanhao1996@163.com

现有研究呈现了不同教学配置下的学习收益与风险。Han 等对实验及准实验研究开展元分析，报告生成式人工智能干预总体上具有积极学习效果，但不同研究之间存在显著异质性[2]。Kestin 等在大学物理课程开展的随机对照试验发现，采用教学法设计的人工智能辅导能够在特定条件下取得优于课堂主动学习安排的测验表现[3]。与之形成对照的是，Bastani 等在高中数学场景中发现，无教学保护的辅助工具改善了练习成绩，却使撤除工具后的独立考试成绩下降；设置引导性提示后，这种不利影响明显减轻[4]。这些结果提出了一个共同问题：相似技术为何在不同教学配置下对应不同的能力结果。

这种差异同时提出了学习评价问题。在传统书面作业中，教师通常依据学生作品推断其知识理解与分析能力；当生成、组织和修订可以由外部系统完成时，作品所体现的能力来源变得混合。即使某种评价能够准确判断文本质量，也未必能够回答学生是否独立完成了核心推理。已有元分析发现，生成式人工智能对学习成绩和语言学习等指标有促进作用，但对元认知结果的作用并不一致[5]。若不说明测量对象，任务分数、能力发展和人机协作熟练程度很容易被混为一谈。

本文以认知加工和评价效度的关系为切入点，讨论两个相互联系的问题：生成式人工智能在什么条件下可能替代学习者应当完成的认知活动；教学评价又应如何识别工具辅助表现与学生能力之间的区别。研究采用问题导向的理论分析，将经典学习理论与已经发表的实验研究、元分析及评价研究加以比较，重点分析不同研究所测结果的差异，从而提出可供教学设计和后续实证研究检验的解释框架。

2 理论基础

2.1 认知负荷与认知卸载

从学习心理学看，降低完成任务所需的认知负担不一定会降低学习质量。认知负荷理论强调，学习者的加工资源有限，某些问题解决活动可能占用本应用于知识结构形成的资源[6]。当工具承担繁复检索、基础排版或重复性运算时，学生有可能将注意力转向概念比较和证据解释。这一作用取决于自动化活动与课程目标的关系。对于学习数据分析的初学者，选择统计模型、解释参数或发现异常可能正是学习目标；若这些步骤由系统直接给出，任务效率的提升便不能直接说明学习效果。

认知卸载研究将个体借助外部环境减少内部加工需求的行为视为普遍认知策略，并指出卸载选择还受到学习者对自身能力判断的影响[7]。这一理论能够解释学生为何倾向于将耗费精力的步骤交给人工智能。决定其教育意义的是卸载发生在何处、学生是否保留必要的理解活动，以及是否仍有独立运用知识的机会。依赖程度的评价需要识别被替代的具体活动，并考察这种替代与能力形成的关系。

2.2 认知投入与自主调节

学习活动还存在可见操作与实际认知加工的差别。Chi 和 Wylie 提出的 ICAP 框架根据学习者行为区分被动、主动、建构和互动等投入方式，为分析学习活动的深度提供了依据[8]。在人工智能交互中，学生反复发送提示语并不必然意味着深入学习；如果互动只是在要求系统重新表述标准答案，学生可能几乎没有形成新的解释。相反，当学生提出自己的假设，针对系统反馈修改论据，并能说明修改理由时，交互才可能与建构性学习活动相联系。认知投入的判断应结合具体任务、学生的解释及其回应质量。

自我调节学习理论进一步关注学习者如何设定目标、监控理解并调整策略。Panadero 对不同自我调节学习模型的综述说明，监控与反思不是学习结束后的附加步骤，而是连接策略使用与学习结果的重要过程[9]。人工智能能够提供即时答案，却不能自动保证学生识别自己是否理解。若学生将答案的流畅程度当作正确程度，可能停止检查前提、证据和推理；如果教师要求学生先尝试、再比较并解释不同解法，工具反馈则更有机会进入自我调节循环。由此，工具使用顺序本身就可能改变学生承担的认知责任。

2.3 学习支持与能力形成

教学支持的价值并不在于替学生持续完成任务，而在于帮助其逐步完成原先难以独立完成的活动。Wood 等关于辅导的经典研究说明，支持需要结合学习者当前能力调整，逐步使问题解决回归学习者自身[10]。生成式人工智能提供了低成本、可重复的支持渠道，但其响应机制并不天然具有教学递进性：直接给出完整答案可能满足即时需求，却跳过学习者最需要练习的步骤。教师制定的提示规则、错误反馈方式和撤除支持的时机，因而成为教学设计的一部分。

对“学会了什么”的判断还需要区分当场成功和延续性能力。本文将辅助任务表现界定为学生在可以使用人工智能的条件下完成任务的质量；将独立能力界定为学生在不依赖该工具完成目标所要求的关键认知活动的能力；将人机协作能力界定为学生能够合理分配任务、核验结果并对最终决定负责的能力。三者可能相关，却不属于同一个评价对象。独立能力的评价着重考察目标认知活动由学生完成的程度，人机协作能力的评价则关注学生如何运用基础知识核验并使用工具结果。评价时应先明确课程培养哪一种能力，再选择相应的表现证据。

3 替代风险

3.1 关键认知活动的外移

能力替代风险首先表现为任务完成过程与目标认知活动发生分离。以论证写作为例，如果教学目标是训练学生建立论点与证据之间的关系，那么由人工智能直接生成完整论证，便可能使学生在没有实际组织证据的情况下交出结构完整的文章。外部文本质量可以提高，学生需要练习的推理却未必发生。若教学目标改为批判性评价机器生成的论证，同样的生成行为又可以成为学习材料。两种情境的区别在于模型执行的步骤与学习目标是否重合。

Bastani 等的研究为这一判断提供了有条件的实证支持：学生使用无教学保护的 GPT 工具时练习成绩改善，但在随后的无工具考试中表现下降；采用教师设计提示的辅导方式则缓解了这种差异[4]。该研究表明，在所考察的高中数学任务中，直接提供答案与提供教学支架对应不同的独立学习表现。人工智能系统在任务中的位置，比抽象的“是否使用人工智能”更接近影响学习的可操作变量。

另一方面，Kestin 等在大学物理教学中发现，依据教学原则构建的人工智能辅导可以促进特定测验中的知识掌握[3]。两项研究分别呈现了无约束答案供给的风险与经过教学设计的对话支持的潜力。学习对象、基线能力、教师参与、对照条件与测验安排均可能影响结果。比较这些结果时，应将工具安排、教学过程和测验条件相互联系。

3.2 反馈使用中的判断让渡

反馈及时并不等于反馈有效。Shute 将形成性反馈的作用指向学习者思维或行为的改变，并指出反馈类型、呈现时机和学习者特征会影响效果[11]；Hattie 与 Timperley 也强调，反馈能否支持学习取决于它回答什么问题以及如何被使用[12]。人工智能可以随时给出修改方案，但如果学生将“接受建议”误当作“理解建议”，反馈只是在作品层面发生了作用。判断让渡可以从学生能否说明建议成立的条件、检验信息来源并识别不适用的情况加以观察。

例如，人工智能可能建议修改一份研究报告的统计分析。学生若只替换结果段落，作品改善主要体现于结果描述；如果学生能够检查变量类型、解释方法选择，并指出建议中的限制，工具反馈才更可能促进学科判断能力。教师可以选取关键修改要求学生解释，将修改理由和证据核验作为认知投入的观察依据。

Barcaui 在一项针对大学生的随机对照研究中报告，使用 ChatGPT 辅助学习的组别在 45 天后的知识保持测验中成绩低于传统学习组[13]。这一结果对应特定课程内容与使用安排下的延迟保持，提示即时任务表现与知识保持需要在不同时间点观察。若评价只覆盖工具使用期间的即时产出，就可能遗漏这种差异。

3.3 风险形成的条件

能力替代风险受到先备知识的制约。具有领域知识的学生更可能识别工具回答中的概念漏洞、遗漏条件与错误引用；初学者则可能因缺乏判断依据而高估答案可信度。相同的建议可能对前者构成高效的比较材料，对后者却成为无法检验的现成结论。因此，课堂规则不能只规定“允许”或“禁止”，还应考虑学生当前是否具备核验所需的基础知识，以及教师是否提供了必要的验证资源。

任务类型同样重要。在学习早期，概念形成、推理练习和诊断性测验通常需要保留学生的独立加工；到了综合应用阶段，适度使用专业工具可以成为真实能力的一部分。Deng 等对实验研究的元分析发现，ChatGPT 干预可以改善部分学习结果，同时降低任务所需的心理努力[14]。降低努力既可能意味着低效负担被消除，也可能意味着关键思维活动被外包。仅凭自报的轻松程度或满意度，很难判断具体发生了哪一种变化。

教学支持方式进一步改变风险。先展示完整答案、在学生尝试后提供提示、仅针对错误环节给予反馈，这些安排可能引发不同的学习行为。只要教师没有区分哪些步骤属于目标能力，人工智能的可用性就可能改变练习任务的实际认知要求。因而，风险由任务目标、学习者基础、反馈结构和可用资源共同形成。

4 评价重构

4.1 从作品质量转向证据效度

生成式人工智能介入后，评价首先需要重新审视分数解释是否成立。Kane 提出，评价效度不仅关乎评分是否一致，更关乎依据分数所作的推断及其用途是否有充分证据支持[15]。教师可以用统一量规准确评价一篇报告的论证质量，但若无法区分学生与工具分别承担的认知活动，就不宜据此直接推断学生能够独立完成相同论证。这一推断需要补充学生独立组织证据和完成论证的表现。

国内研究已经注意到这种转变。沈书生、祝智庭讨论 ChatGPT 类产品对学习评价的影响，强调从答案与知识呈现转向思维过程和问题解决[16]。这一判断提示了改革方向，但评价机制仍须回答更具体的问题：教师需要收集什么证据、采用何种任务验证，以及在多大程度上可以解释学生的能力。过程材料也可能由工具加工，教师需要判断学生在关键选择和修订中承担的认知活动，以及这些活动与学习目标的关系。

过程证据与结果证据应依据评价用途相互配合。Black 与 Wiliam 关于形成性评价的研究说明，学习证据只有进入反馈和教学调整，才能发挥促进学习的作用[17]。因此，本文主张依据评价用途组织不同证据：面向学习改进，重在识别学生在哪一步遇到困难以及反馈如何起作用；面向课程达标，重在确认学生是否达到规定能力；面向人机协作，重在核验学生对工具结果的判断与责任。用途不同，所需证据和工具使用规则也应不同。

4.2 区分三类学习证据

第一类是辅助任务表现，回答“学生在规定工具条件下能把任务完成到什么程度”。它能够评价信息整合、协作决策和作品质量，对于强调专业工具应用的课程尤其重要。独立推理能力则需要学生在相应独立任务中的表现作为证据。第二类是过程中的认知责任，回答“哪些关键选择由学生作出，学生如何检查并修订工具的建议”。可以通过关键节点的草稿、证据核验说明和针对性口头解释收集。第三类是独立迁移表现，回答“在工具撤除或情境变化后，学生还能完成哪些核心活动”。三类证据各有解释范围，应围绕教学目标组合使用。

独立迁移评价需要在保留核心能力要求的同时改变应用情境。Barnett 和 Ceci 指出，迁移研究需要明确知识内容和应用情境之间的距离，不同迁移任务不能简单视为同一种结果[18]。若学生刚练习过某道题，再完成形式几乎相同的无工具题目，更多反映即时再现；若评价旨在判断迁移，则应在保持核心能力要求的前提下改变部分情境条件，并控制难度差异。根据课程目标，还可以设置延迟测验，以区别短暂记忆与较为稳定的掌握。

表 1 将学习目标、工具角色与评价证据相互联系。评价任务应为学生提供展示目标能力的机会，评分解释应对应证据产生的学习条件。

表 1 生成式人工智能辅助学习的目标、工具角色与评价证据

主要学习目标	人工智能的适宜角色	优先观察的评价证据	需要防范的推断偏差
基础概念与独立推理	针对错误提供提示，核心推理由学生完成	无工具解释、关键步骤重建、延迟任务	以辅助解答的正确率推断独立掌握
论证写作与资料核验	生成备选观点、提供反馈、辅助检索	证据与论点匹配、修订理由、错误识别	将语言流畅度等同于论证能力
人机协作与专业应用	在明确责任下参与分析、生成和修订	工具选择依据、结果复核、决策责任	把工具产出全部归因于学生，或否认协作能力

4.3 评价任务的组织方式

在单元教学中，可以通过同一主题的连续任务减少“作品与能力不相符”的判断困难。以大学生论证写作为例，教师首先提供一则包含多方观点的现实议题，要求学生独立写出立场、核心依据和可能的反例；随后允许人工智能帮助寻找论证漏洞、形成替代解释；最后学生提交修订文本，并说明一项被采纳和一项被拒绝的建议。过程记录用于考察学生如何判断、采纳和修订建议。

如果课程目标还包括独立论证，教师可以安排短时的无工具任务，要求学生面对相近但不相同的材料重新提出论点，并在必要时进行口头追问。相反，如果课程明确培养人机协作写作能力，则可以允许工具持续参与，但应评价来源核验、论证责任与错误纠正。评价条件必须在任务开始前告知学生，不能先鼓励使用工具，再用模糊的“人工原创程度”标准追溯扣分。

评分时应避免把所有证据机械合成为一个总分。辅助作品、过程判断与独立表现可能服务于不同目标，先给三者设定固定权重，容易造成解释混乱。较合理的做法是根据课程学习成果明确主要评价对象：若是基础概念掌握，以独立解释为主要证据；若是研究性写作，以论证质量与来源核验为核心；若是人机协作素养，则需要观察学生能否识别工具边界并承担最终决策责任。评分标准应有可见的行为锚点，并通过共同批阅样本提高评分者一致性。

4.4 实施条件与责任分配

重构评价机制需要考虑教师工作负担。增加全过程记录和频繁口头答辩虽可获得更多材料，却未必提高判断质量，反而可能挤占教学时间。较可行的选择是围绕关键学习目标设置有限的核验节点：对基础概念进行独立检验，对高风险结论要求证据核对，对重要推理要求简短解释。这样的设计能够使额外成本与获得的评价信息相匹配。学校应通过教师培训和统一的使用规则，支持工具版本管理、数据安全与评分争议处理。

在学术诚信方面，辨识人工智能生成文本与判断学习成果并不是一回事。Kofinas 等通过英国高校情境中的实验发现，评分者难以稳定地区分人工智能参与程度不同的作品，而真实性较高的任务本身也未能保证能够识别这种参与[19]。由此，评价改革不宜主要依赖文本检测，而应通过任务设计和学习证据降低作品来源不清造成的判断风险。对疑似不当使用情形，应依照明确规则核实，保障学生解释和复核的机会，不能将单一检测结果视为行为认定。

使用条件的公平性也会影响评价结论。不同学生可获得的模型版本、付费功能和设备条件并不一致，允许自由使用工具的成绩可能混入资源差异。UNESCO 关于生成式人工智能教育应用的指导强调人类主体性、隐私和公平等要求[20]。OECD 在 2026 年教育数字化展望中也将学习者能力发展与人工智能辅助表现的区分列为评价的重要议题[21]。对于以能力比较为目的的评价，学校应尽可能统一工具条件；无法使用工具的学生应获得目标等价的替代任务。需要处理学生身份、作业草稿或其他敏感信息时，教师还应限制上传内容并说明数据用途。

5 讨论

5.1 能力替代的解释边界

生成式人工智能对能力形成的影响，取决于工具承担的认知活动与学生保留的目标加工。认知卸载可以降低不必要的操作负担，认知支持也可能促成更有效的反馈循环。但当工具直接完成应由学生练习的核心步骤时，任务质量的提升便可能与能力形成脱节。

该解释也帮助理解现有研究为何呈现不同结果。一方面，实验和元分析提供了人工智能能够改善部分学习结果的证据；另一方面，直接供给答案或缺少学习保护的配置可能产生不利的独立表现。评价结果的差异还可能源于不同研究使用了即时成绩、延迟保持、知识迁移或自我报告等指标。若一项研究测量的是允许工具参与的学习成果，而另一项研究测量的是撤除工具后的独立考试，两者虽然都使用“学习效果”一词，却未必在检验同一能力构念。

5.2 评价重构的教育意义

从评价理论看，本文的核心贡献是把人工智能介入后的表现归因问题纳入学习评价的效度判断。传统课堂也存在同伴协作、教师帮助和家庭辅导等外部支持，因此作品与个人能力并非从来完全一致。生成式人工智能的特殊性在于，它能够快速完成过去通常由学生亲自完成、又被教师用于推断能力的认知活动，从而扩大了“作品可见、过程不可见”的范围。评价改革需要将学生的关键选择、独立解释和迁移表现纳入这一推断链条。

分层证据的选择应依据具体学习目标，重点收集能够解释目标能力的表现。在形成性评价中，过程判断可以帮助教师发现学生何时依赖现成答案；在总结性评价中，必要的独立任务可以支持基础能力认定；在人机协作学习中，核验质量和决策责任则应成为正式评价对象。戴岭等关于教育数字化转型的讨论将“学、教、管、评”视为相互联系的系统[22]，这意味着评价改变应与任务设计、学生工具使用规范及教师支持方式相互衔接。

5.3 局限与研究方向

相关文献的覆盖范围与教学情境影响理论综合的解释范围。现有研究在学段、学科、工具使用方式和结果测量方面存在差异，跨情境比较需要明确这些条件。认知责任的评价还需在具体课程中考察证据采集的可行性、评分一致性及其与独立迁移表现的关系。

未来研究可在具体课程单元中比较直接答案、引导性反馈和不使用人工智能等不同条件下的学习表现，重点考察工具辅助成绩与独立学习能力之间的关系。研究中还应关注学生的先备知识、教师反馈和任务特点，并结合学生解释、作业修订记录及课堂观察，分析不同工具使用方式如何影响学生的认知投入与自主判断。进一步的跨学科、跨学段研究有助于明确能力替代风险的发生条件，并完善相应的学习评价机制。

6 结论

生成式人工智能辅助学习中的关键评价问题，是如何将工具参与下的任务产出与学生真正获得的能力区分开来。能力替代风险产生于工具承担关键目标活动、学生缺少自主判断且评价据辅助作品过度推断独立能力的结合情形。基于认知加工与评价效度理论，本文提出按学习目标组织辅助表现、认知责任与独立迁移三类证据的评价思路。这一思路将评价对象、任务条件与表现证据相互连接，为教师组织教学任务、选择核验节点和解释学习结果提供依据。

参考文献

[1] YAN L, GREIFF S, TEUBER Z, et al. Promises and challenges of generative artificial intelligence for human learning[J]. Nature Human Behaviour, 2024, 8: 1839-1850. DOI: 10.1038/s41562-024-02004-5.

[2] HAN X, PENG H, LIU M. The impact of GenAI on learning outcomes: A systematic review and meta-analysis of experimental studies[J]. Educational Research Review, 2025, 48: 100714. DOI: 10.1016/j.edurev.2025.100714.
[3] KESTIN G, MILLER K, KLALES A, et al. AI tutoring outperforms in-class active learning: An RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 17458. DOI: 10.1038/s41598-025-97652-6.
[4] BASTANI H, BASTANI O, SUNGU A, et al. Generative AI without guardrails can harm learning: Evidence from high school mathematics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2025, 122(26): e2422633122. DOI: 10.1073/pnas.2422633122.
[5] CHEN S, CHEUNG A C K. Effect of generative artificial intelligence on university students learning outcomes: A systematic review and meta-analysis[J]. Educational Research Review, 2025, 49: 100737. DOI: 10.1016/j.edurev.2025.100737.
[6] SWELLER J. Cognitive load during problem solving: Effects on learning[J]. Cognitive Science, 1988, 12(2): 257-285. DOI: 10.1016/0364-0213(88)90023-7.
[7] RISKO E F, GILBERT S J. Cognitive offloading[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2016, 20(9): 676-688. DOI: 10.1016/j.tics.2016.07.002.
[8] CHI M T H, WYLIE R. The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes[J]. Educational Psychologist, 2014, 49(4): 219-243. DOI: 10.1080/00461520.2014.965823.
[9] PANADERO E. A review of self-regulated learning: Six models and four directions for research[J]. Frontiers in Psychology, 2017, 8: 422. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00422.
[10] WOOD D, BRUNER J S, ROSS G. The role of tutoring in problem solving[J]. Journal of Child Psychology and Psychiatry, 1976, 17(2): 89-100. DOI: 10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x.
[11] SHUTE V J. Focus on formative feedback[J]. Review of Educational Research, 2008, 78(1): 153-189. DOI: 10.3102/0034654307313795.
[12] HATTIE J, TIMPERLEY H. The power of feedback[J]. Review of Educational Research, 2007, 77(1): 81-112. DOI: 10.3102/003465430298487.
[13] BARCAUI A. ChatGPT as a cognitive crutch: Evidence from a randomized controlled trial on knowledge retention[J]. Social Sciences & Humanities Open, 2025, 12: 102287. DOI: 10.1016/j.ssaho.2025.102287.
[14] DENG R, JIANG M, YU X, et al. Does ChatGPT enhance student learning? A systematic review and meta-analysis of experimental studies[J]. Computers & Education, 2025, 227: 105224. DOI: 10.1016/j.compedu.2024.105224.
[15] KANE M T. Validating the interpretations and uses of test scores[J]. Journal of Educational Measurement, 2013, 50(1): 1-73. DOI: 10.1111/jedm.12000.
[16] 沈书生, 祝智庭. ChatGPT 类产品：内在机制及其对学习评价的影响[J]. 中国远程教育, 2023, 43(4): 8-15. DOI: 10.13541/j.cnki.chinade.20230223.001.
[17] BLACK P, WILIAM D. Assessment and classroom learning[J]. Assessment in Education: Principles, Policy & Practice, 1998, 5(1): 7-74. DOI: 10.1080/0969595980050102.
[18] BARNETT S M, CECI S J. When and where do we apply what we learn? A taxonomy for far transfer[J]. Psychological Bulletin, 2002, 128(4): 612-637. DOI: 10.1037/0033-2909.128.4.612.
[19] KOFINAS A K, TSAY C H H, PIKE D. The impact of generative AI on academic integrity of authentic assessments within a higher education context[J]. British Journal of Educational Technology, 2025, 56(6): 2522-2549. DOI: 10.1111/bjet.13585.
[20] MIAO F, HOLMES W. Guidance for Generative AI in Education and Research[M]. Paris: UNESCO, 2023. DOI: 10.54675/EWZM9535.
[21] OECD. OECD Digital Education Outlook 2026: Exploring Effective Uses of Generative AI in Education[M]. Paris: OECD Publishing, 2026. DOI: 10.1787/062a7394-en.
[22] 戴岭, 胡姣, 祝智庭. ChatGPT 赋能教育数字化转型的新方略[J]. 开放教育研究, 2023, 29(4): 41-48. DOI: 10.13966/j.cnki.kfjyyj.2023.04.005.

中小企业数字化转型中的流程互补与收益形成

张正跃*

百万鲸创（重庆）数字科技有限公司，重庆 401331

摘 要：数字工具的普及使中小企业更容易获得信息处理能力，但技术投入如何转化为经营收益仍取决于组织内部的配合。本文结合数字化转型与动态能力研究，从业务流程的相互依赖出发，分析数据质量、决策权配置和跨岗位协调在收益形成中的作用。研究提出，信息可见性通过异常识别进入经营过程，处置权限决定信息能否转化为行动，流程之间的协调则影响局部改进能否形成整体收益。外部服务降低技术进入门槛，同时改变企业需要保留的判断能力与合作边界。由此，转型范围应围绕完整业务事件确定，绩效评价应对应流程变化及其成本。以业务问题组织试点、根据互补条件扩大应用，有助于解释不同企业采用相似工具后出现的绩效差异。

关键词：中小企业；数字化转型；流程互补；决策权；经营绩效

Process Complementarity and Value Creation in SME Digital Transformation

ZHANG Zhengyue*

Million Whale Creation (Chongqing) Digital Technology Co., Ltd., Chongqing 401331

Abstract: Digital tools make information processing more accessible to small and medium-sized enterprises, yet converting technology investment into business value requires organizational coordination. Drawing on digital transformation and dynamic capability research, this article examines data quality, the allocation of decision rights, and coordination across interdependent business processes. Information visibility enables the detection of operational exceptions; decision rights determine whether these signals lead to action; and coordination determines whether local improvements translate into enterprise-level gains. External services lower technical entry barriers while changing the judgment capabilities and cooperation boundaries that firms need to retain. Transformation should therefore be organized around complete business events, with performance assessment linked to changes in processes and their associated costs. Problem-oriented pilots and expansion guided by complementary organizational conditions offer an explanation for differences in performance among firms adopting similar tools.

Keywords: small and medium-sized enterprises; digital transformation; process complementarity; decision rights; business performance

DOI：https://doi.org/10.65192/cs51v049

© 2026 作者

本文依据 CC BY 4.0 许可协议开放获取

1 问题提出

订单、库存和客户服务可以通过低成本软件获得更及时的记录。对资源有限的中小企业，这意味着部分过去依赖专门人员的信息处理工作能够由通用工具承担。然而，记录及时并不直接意味着交付及时，客户信息完整也不直接意味着服务改善。数字化转型涉及价值创造方式及其组织安排的变化，技术只是这一过程的组成部分。Vial 将技术引发的变化、组织的战略回应以及结构和组织障碍纳入同一解释框架，表明转型的结果需要沿着价值创造过程理解[1]。

Verhoef 等区分信息数字化、业务数字化和数字化转型，分别涉及信息形态、流程应用及更广泛的组织变化[2]。这种区分对于中小企业尤其有用：一家企业可能已经使用在线接单和电子记账，但采购、生产与销售仍以彼此分离的规则运行。若用工具数量衡量转型程度，就会把信息记录的变化与经营关系的变化放在同一尺度上，难以解释投入相近而收益不同的现象。

作者简介：张正跃（2000—），男，高级工程师；百万鲸创（重庆）数字科技有限公司总经理，主要研究方向为中小企业数字化转型、科技成果转移转化、创业孵化与创新管理。

通讯作者：张正跃，电子邮箱：17623215231@163.com

OECD 的 2024 年中小企业数字化调查围绕冲击应对与持续转型展开，2025 年调查进一步将人工智能、可持续性、金融科技和数字安全纳入考察[3][4]。应用范围的扩大使资源不足的问题更为具体：企业需要判断哪些信息值得采集，哪些工作适合委托外部服务，以及哪些处置必须由业务人员完成。一次采购可以增加工具的可获得性，却无法同时解决这些相互关联的组织问题。

本文考察数字化投入进入业务流程后形成收益的条件，重点解释三个衔接关系：记录与异常识别、异常识别与处置行动、局部行动与整体经营结果。研究采用问题导向的理论分析，对数字化转型、组织能力和中小企业相关文献进行比较，将流程互补作为连接这些关系的分析视角。流程互补指一个业务环节的改进需要其他环节相应调整，才能发挥预期作用。它既包括信息接口，也包括权限、任务顺序和绩效目标之间的配合。

2 理论基础

2.1 可购买的工具与形成中的能力

信息系统、云服务和外部顾问属于企业可以购买的资源。能够识别业务问题、判断数据含义并调整工作安排，则需要在使用过程中形成。Eller 等对 193 家中小企业的调查将信息技术、员工技能和数字战略与数字化联系起来，并发现数字化程度与财务绩效存在显著关系[5]。这些资源与绩效的联系并非完全相同，说明把投入统一归入“数字化水平”，会掩盖不同资源发挥作用的环节。

一条订单的执行涉及销售需求、库存数量与生产安排。销售端信息更加完整，还需要可靠的库存记录、可知的生产能力和明确的交付规则，才能支持新的承诺。任何环节使用不一致的信息，局部便利都可能被后续核对抵消。转型收益因此取决于资源及其连接方式。

中小企业常由少数人员兼任多个岗位，流程知识集中在负责人或熟练员工手中。这种安排在业务稳定时可以降低沟通成本，但当信息系统要求统一记录时，原本依靠经验协调的规则需要被说清楚。例如，临时插单由谁批准、不同客户的交付承诺如何排序、库存差异何时允许修正，都决定数字记录进入经营活动的方式。将这些规则转化为可共享的工作安排，是企业吸收外部技术的重要部分。

工具采用还会改变原有知识的使用条件。熟练员工可能能够在没有完整记录的情况下完成协调，新系统则要求其经验转化为字段、规则和异常分类。转化过程中，某些经验可以被共享，另一些依赖客户关系或现场判断，仍需保留人工处置。企业若把后者全部压缩为固定选项，可能获得更整齐的数据，却损失处理特殊业务的能力。因此，流程标准化需要识别可以重复的工作与必须保留判断的工作，技术选择也应容纳这种差异。

2.2 动态能力在流程调整中的作用

Teece 以感知、把握和重构解释企业应对变化的能力，并将技能、组织结构与决策规则视为其微观基础[6]。在数字化转型中，感知涉及识别新的需求和业务损失，把握涉及为具体问题配置资源，重构涉及改变原有职责和协作关系。数字工具能够为这些活动提供信息，但信息被用于何种行动仍由组织安排决定。

这一视角有助于区分日常操作能力与改变操作方式的能力。员工熟练录入订单，可以提高记录效率；企业据此调整报价、采购和排程的联系，才涉及工作安排的重构。两者相互依赖，却具有不同的学习要求。仅培训系统操作而不讨论业务规则，会使员工掌握界面功能，却继续沿用与新系统不一致的决策方式。

王京滨等基于中国制造业上市企业的研究，将资源配置效率与数字化转型和全要素生产率联系起来，并考察供应链运作和投资效率[7]。这为从流程关系解释生产率提供了经验线索。中小企业中可追踪的过程可能更窄，例如重复采购、等待确认或在制品积压，但其理论位置相似：数字信息需要改变资源的使用与协调，才能进入经营结果。通过追踪这些中间过程，可以解释数字化投入如何影响资源使用和经营收益。

2.3 流程互补的分析层次

资源互补讨论不同投入共同发挥作用的条件，流程互补则进一步考察这些投入在哪一项业务活动中发生联系。软件与技能相互配合，可以提高某个岗位的操作水平；销售承诺与生产排程相互配合，才可能改变订单履约。前者主要发生在资源或岗位层面，后者涉及组织内部的依赖关系。将二者区分，有助于解释为什么个人熟练度已经提高，整体交付却仍然缓慢。

这种层次差异也影响绩效的解释。局部指标可以反映操作时间、录入错误或信息更新，组织指标则涉及交付、资金占用和客户结果。局部改善进入组织结果，需要经过一个或多个接口。接口处的等待、返工和责任移交因而具有理论意义，它们为判断互补关系是否形成提供了可追踪的过程证据。本文据此把业务事件作为观察单位，将资源配置和能力调整放回相互依赖的活动中分析。

3 从信息可见到经营收益

3.1 数据质量决定异常能否被识别

数字记录增加了业务的可见性，但数据首先需要具有共同含义。一笔订单的“完成”可能指生产完工、出库或签收。若部门分别使用不同定义，系统汇总后仍无法识别交付延误发生在哪里。定义、更新时间和责任人的一致性，构成信息进入业务判断的基础。数据质量在此既涉及记录是否准确，也涉及记录是否对应企业需要处理的事件。

记录范围同样影响异常识别。只保留已经交付的订单，会遗漏取消和严重延误的订单；只统计已处理的客户请求，会遗漏无人接收的请求。此时看似改善的指标可能源于记录对象变化。企业应以完整业务事件为单位建立记录，将进入、等待、处置和结束状态相互连接，才能判断损失来自何处。

信息过量也会削弱其作用。小企业如果同时追踪大量与日常决策无关的指标，有限的管理注意力可能被分散。有效的数据安排应围绕可处置的问题展开：指标发生变化以后，是否有人能够辨别原因，是否存在可采取的行动，以及行动是否能被再次观察。与这条关系无关的数据，即使能够自动生成，也可能只是增加报表负担。

3.2 处置权限连接信息与行动

发现异常之后，行动需要相应权限。仓库人员看见账实差异，却只能等待负责人逐笔批准，实时记录便可能与缓慢处置并存。授权过少使系统成为展示工具，授权过宽又可能产生无法追踪的修改。决策权的配置应与事件的重要性及可恢复性相匹配，使日常异常能够及时处理，同时保留重大调整的审核与追溯。

陈灿君等在上市家族企业中区分股权控制和管理权控制，并分析其与资源配置、动态能力以及数字化转型效果的关系[8]。这一研究提示，治理方式影响技术进入经营活动的路径。对中小企业而言，关键问题是实际处置是否始终集中于少数人，以及专业人员能否根据业务信息提出并实施调整。所有权类别本身不足以回答这些问题，具体授权和反馈关系更接近流程运行。

数字化也可能改变负责人对授权的判断。过去无法观察的操作过程变得可追踪，负责人便有条件将部分决策交给一线人员。然而，若监督只是增加填报要求，而员工仍不具有处置权，可见性提高会转化为更密集的控制。因而，记录、授权和追责需要共同设计。稳定的记录使授权更可行，适当授权又使记录具有行动价值。

3.3 流程协调决定局部收益能否保留

部门目标之间的冲突会消耗局部改进。生产部门扩大批量可以减少切换时间，却可能增加库存和交付等待；销售部门加快接单可以扩大收入机会，却可能使生产承诺超过现有能力。共同信息能够暴露这些冲突，但协调仍需要明确整体业务目标，并允许局部目标在特定条件下调整。

流程互补也改变了转型范围的选择。实施范围过小，可能使新的数据与旧的工作规则相互抵消；范围过大，又可能同时改变过多条件，增加学习和排错负担。较合适的起点是一个具有完整输入、处置和结果的业务事件。例如围绕交付改造时，销售承诺、库存确认、排程与异常反馈应形成最小的协作闭环。闭环可以跨越部门，却不必覆盖企业全部业务。

表 1 将上述衔接关系与相应的经营观察联系起来。三个环节具有先后依赖，也存在反馈：处置经验可以修正数据定义，整体结果可以促使企业重新分配权限。若流程中的关键接口长期缺失，增加采集精度可能难以继续产生收益。扩大应用应优先补齐限制作用最大的接口，使新增工具能够进入完整业务流程。

表 1 流程互补的衔接关系与经营观察

衔接环节	组织条件	可追踪的业务变化
记录与识别	共同定义、完整事件、更新责任	异常能否被定位及修正
识别与处置	授权、审核、反馈和追溯	等待、重复确认与处置时间
处置与整体结果	接口一致、目标协调、资源调配	交付、返工及完整流程成本

3.4 互补关系的形成与转换成本

形成新的流程联系通常需要一段调整时间。数据录入规则改变后，旧记录需要转换，员工需要学习，负责人也需要重新判断哪些决策可以授权。这些工作先发生，经营结果可能随后才变化。若仅观察系统上线当期的利润，就可能把转换支出与常态成本混在一起。评价应沿业务事件记录调整过程，辨别成本发生在规则建立、人员学习还是长期运行阶段。

转换期间保留两套记录，有时能够维持业务连续性，但也可能成为持续负担。两套记录的终止条件应由信息一致性和处置可靠性决定。当关键业务能够在新流程中被完整追踪，旧记录才具有退出基础。若旧记录始终承担实际决策、新记录只用于报送，技术采用与流程改变就发生分离。此时增加使用频次难以解决问题，企业需要查明哪一种记录具有可信度，以及为何原有决策方式仍不可替代。

流程互补还可能受到激励错位的影响。一个岗位承担更多录入和核验，收益却主要表现为另一岗位减少等待，前者可能缺乏持续配合的动力。企业应将新增工作和可获得收益放在同一流程中讨论，调整责任分配和绩效要求。共享收益并不必然要求统一奖金，而是需要使承担调整成本的人员看见工作目的，并具有提出修正的渠道。

随着互补关系形成，数字化的边际收益也会变化。早期建立共同数据可能消除明显差错，后续更精细的信息则需要更及时的行动能力才能产生收益。若行动速度受采购周期或生产工艺限制，进一步增加数据精度的价值可能较小。企业应据此判断下一项投入究竟是在补齐接口，还是在已有接口上增加精细程度。两种投入具有不同的资源要求和收益路径。

4 外部服务与转型范围的选择

4.1 技术委托改变内部能力的重心

外部服务可以承担系统维护、接口连接和部分数据处理，使企业无需在每个技术领域建立专门团队。但供应商通常掌握产品知识，企业掌握业务知识。双方合作的有效性取决于能否将具体事件、异常规则和经营目标转化为可执行要求。业务判断完全由供应商替代，容易使实施围绕可展示的功能展开，企业自身的问题却仍未被清楚定义。

OECD 关于生成式人工智能与中小企业劳动力的调查，考察使用方式、感知收益、技能需求及员工准备等问题[9]。这种新工具进一步凸显业务判断的重要性。文本生成可以减少某些起草工作，但客户答复、合同说明和经营分析仍需要核验来源、适用条件和责任。企业节省的生成时间与新增的核验时间，应在同一业务流程中计算。

因此，外部服务降低的主要是部分技术门槛，内部能力则向需求表达、输出核验和合作管理集中。企业应保留数据定义、关键业务规则与结果解释的能力，明确服务中断时的恢复安排。具

备这些能力以后，更换供应商或调整方案才有现实选择空间。缺少可迁移数据和可解释规则的合作，会使短期便利伴随较高的后续调整成本。

4.2 试点的学习价值与扩大条件

试点承担两个任务：改善一个具体业务问题，并让企业了解新工具对工作关系的要求。试点期间出现的重复记录、权限争议和接口错误，能够揭示扩大应用之前需要处理的组织条件。若只考核是否按时上线，这些信息容易被当作实施瑕疵处理，其学习价值便被忽略。

扩大应用需要依据已形成的互补关系。数据定义稳定、异常能够被处置、流程结果能够持续观察，说明企业具备复制部分安排的基础。若试点依赖供应商驻场或负责人持续介入，扩展以后这些支持可能无法保持。此时需要先将临时支持转化为可持续的工作安排，再决定扩大范围。实施速度与覆盖面积因而应服从组织吸收能力。

试点终止同样可以产生有用信息。当投入集中于少数低频事件、维护负担超过可节省的工作量，或现有人工流程已经能够较好满足需求时，企业可以保留必要记录而停止新增系统。停止的依据应对应业务目标和完整成本。这样，试点的价值既包含获得收益，也包含以较小投入识别不适合继续扩展的方案。

4.3 成熟度评测与经营评价的衔接

中小企业数字化水平评测指标 2024 年版，从数字化基础、经营、管理和成效四个维度组织评测[10]。统一口径有助于描述企业所处状态，也能为项目诊断提供参照。经营评价则需要进一步追踪企业为某项改善付出了什么，以及改善经过哪些流程产生。两者的衔接点在于，把评测中识别的薄弱环节与企业具体业务事件相连。

交付场景应同时观察履约、取消和返工，采购场景应联系库存准确性、缺料和资金占用。结果指标的分母与时间窗口需保持一致，成本包括采购、培训、重复录入、核验、维护和迁移。一次性支持可以单列，因为它决定试点结果能否在常态资源下维持。若工具减少了单项操作，却增加其他岗位的核对，总体收益应以完整流程的净变化判断。

绩效变化还需要放回业务周期中解释。订单规模和产品结构改变时，平均交付时间可能随之变化；前期学习支出增加时，利润可能先承压。对于规模较小、数据记录有限的企业，稳定追踪少数关键业务事件，通常比频繁更换综合评分更有助于识别问题。评价应据此识别持续投入、调整配置或停止扩展的条件。

4.4 外部协作中的判断权与数据边界

企业接入供应商或核心客户的平台以后，业务接口会延伸至组织外部。统一字段可以减少反复核对，但交付要求、数据更新和异常处置也可能由外部主体规定。企业需要区分哪些规则服务于共同履约，哪些规则改变自身资源配置。若数据更加透明而临时变更频繁，内部流程仍可能承受较大协调成本。平台接入的收益应联系交易和处置过程观察。

外部协作尤其需要明确异常状态。延误由谁发现、何时通知、哪些信息能够共享、费用如何承担，都会影响企业是否愿意及时记录问题。只建立正常订单的数据接口，可能在需要协调的事件中留下空白。企业可以围绕高频异常统一状态和反馈方式，再逐步扩展协作范围，使数据连接同时具有可执行的责任联系。

数据可迁移性也具有经营含义。导出文件只有在字段定义、历史状态和客户对应关系能够保留时，才有助于更换服务。企业应在合作形成时明确这些内容，并保留关键业务规则的解释权。如此，外部服务能够补充技术资源，企业仍可以根据结果选择调整或退出。合作边界清楚，是持续学习和资源再配置得以进行的条件。

5 讨论与结论

流程互补将数字化转型的解释单位从单一工具移向相互依赖的业务活动。资源基础说明企业具备何种投入条件，动态能力说明企业如何调整这些条件，流程分析则进一步指出调整发生在哪里。由此可以理解一种常见状态：系统已经上线，信息已经可见，但收益尚未形成。该状态可能对应数据含义不一致、行动权限受阻或跨岗位目标冲突，不同问题需要不同的组织调整。

资源约束也会随实施变化：记录问题解决以后，权限可能成为瓶颈；处置效率提高以后，上下游协作可能决定下一阶段收益。后续研究可以沿同一业务事件追踪这些变化，辨别互补条件的形成顺序及其作用。

流程视角适合解释经营活动高度相互依赖的转型。标准化独立任务可能通过工具替换获得部分收益，组织调整要求较小。企业规模、产品复杂性和客户承诺方式改变流程依赖程度，也使相似技术需要不同实施范围。

这一分析可以转化为有区别的经验观察。当记录准确性提高而异常等待未缩短，需要考察授权和处置规则；当处置加快而交付未改善，需要继续追踪上下游约束；当业务结果改善但常态成本增加，则需要判断新增核验和维护是否抵消收益。沿这些关系追踪同一事件，可以将技术使用、流程改变和价值形成分别识别，也为比较不同能力组合提供较清楚的观察依据。

中小企业数字化转型的收益形成，依赖数据进入行动、行动进入协调以及协调进入经营结果的连续联系。企业应围绕完整业务事件安排转型，把数据责任、处置权限与整体目标放入同一实施范围，并依据这些互补条件决定扩展。以流程变化和完整成本解释绩效，能够使技术投入与企业真正需要解决的经营问题保持联系。

参考文献

[1] VIAL G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda[J]. The Journal of Strategic Information Systems, 2019, 28(2): 118-144. DOI: 10.1016/j.jsis.2019.01.003.

[2] VERHOEF P C, BROEKHUIZEN T, BART Y, et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda[J]. Journal of Business Research, 2021, 122: 889-901. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.09.022.

[3] OECD. SME digitalisation to manage shocks and transitions: 2024 OECD D4SME survey[R/OL]. Paris: OECD Publishing, 2024[2026-10-13]. https://doi.org/10.1787/eb4ec9ac-en.

[4] BIANCHINI M, LASHERAS SANCHO M. SME digitalisation for competitiveness: The 2025 OECD D4SME Survey[R/OL]. Paris: OECD Publishing, 2025[2026-10-13]. https://doi.org/10.1787/197e3077-en.

[5] ELLER R, ALFORD P, KALLMÜNZER A, et al. Antecedents, consequences, and challenges of small and medium-sized enterprise digitalization[J]. Journal of Business Research, 2020, 112: 119-127. DOI: 10.1016/j.jbusres.2020.03.004.

[6] TEECE D J. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance[J]. Strategic Management Journal, 2007, 28(13): 1319-1350. DOI: 10.1002/smj.640.

[7] 王京滨, 刘赵宁, 刘新民. 数字化转型与企业全要素生产率——基于资源配置效率的机制检验[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(3): 23-33. DOI: 10.6049/kjjbydc.2022100126.

[8] 陈灿君, 吕乐琳, 许长新. 家族控制视角下数字化转型对企业全要素生产率的影响研究[J]. 财经论丛, 2025, 41(8): 100-111. https://cjlc.zufe.edu.cn/CN/Y2025/V41/I8/100.

[9] OECD. Generative AI and the SME workforce: New survey evidence[R/OL]. Paris: OECD Publishing, 2025[2026-10-13]. https://doi.org/10.1787/2d08b99d-en.

[10] 工业和信息化部办公厅. 关于发布中小企业数字化水平评测指标（2024 年版）的通知：工信厅企业〔2024〕56 号[EB/OL]. (2024-09-04)[2026-10-13]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/qyj/wjfb/art/2024/art_2817ddce6c39400099c294ac7b6f8439.html.

储能技术成本排序的时长与利用率条件

魏少康*

极天高科（云南）有限公司，云南 丽江 674100

摘 要：储能技术的经济性比较受到服务时长、调用频率和成本计量方式的共同影响。本文结合储能技术经济文献，建立统一输出边界下的成本分解模型，推导功率成本、能量成本和效率影响技术排序的条件。分析表明，延长放电时长能够摊薄单位交付电量中的功率费用，但能量费用仍受循环频率约束；高频调用提高效率收益，低频备用则使年化容量费用更为突出。两种技术的成本交点取决于固定费用差异能否被运行费用差异抵消，交点还须满足实际充电和放电条件。进一步比较表明，日内移峰、持续供电保障与季节性储备需要不同的评价口径。储能选择应先确定服务剖面，再开展寿命成本与系统配置分析，将容量可用性和能源交付成本分别纳入决策。

关键词：储能技术；平准化储能成本；放电时长；循环频率；系统价值

Duration and Utilization Conditions for Cost Rankings of Energy Storage Technologies

WEI Shaokang*

Jitian Hi-Tech (Yunnan) Co., Ltd., Lijiang, Yunnan 674100

Abstract: Economic comparisons of energy storage technologies depend on service duration, dispatch frequency, and cost accounting. Drawing on techno-economic literature, this article develops a cost decomposition with a common electricity delivery boundary and derives conditions under which power costs, energy costs, and efficiency alter technology rankings. Longer discharge duration spreads power-related expenditure over more delivered energy, while energy-related expenditure remains sensitive to cycling frequency. Frequent dispatch increases the value of efficiency, whereas infrequently used reserves place greater weight on annualized capacity costs. A cost crossover occurs when differences in fixed expenditure are offset by differences in operating expenditure, subject to feasible charging and discharging conditions. Intraday shifting, sustained supply adequacy, and seasonal reserves consequently require different evaluation criteria. Technology selection should begin with a service profile and then combine lifetime cost analysis with system planning, treating capacity availability and the cost of delivered energy as distinct decision quantities.

Keywords: energy storage technologies; levelized cost of storage; discharge duration; cycling frequency; system value

DOI：https://doi.org/10.65192/323zwd59

© 2026 作者

本文依据 CC BY 4.0 许可协议开放获取

1 引言

储能装置具有额定功率和可用能量两个基本规模。功率决定单位时间可以输出多少电力，可用能量决定这种输出能够持续多久。将项目投资只除以千瓦时，可能使较长时储能呈现较低单位费用；将同一投资除以千瓦，又可能得到相反的变化。NREL 的 2024 年年度技术基线分别讨论功率与能量费用，并针对不同持续时长给出系统假设[1]。因此，成本计量方式需要与装置提供的服务一致。

Schmidt 等将平准化储能成本置于具体应用中比较，分析不同技术在时长和调用条件下的竞争关系[2]。这使储能经济性从静态设备价格转向寿命期运行。同一技术在频繁移峰与低频应急中交付的电量不同，即使建设规模相同，单位交付电量承担的固定费用也会发生变化。技术名称无法单独决定成本排序。

工程比较还面临参数层级问题。电芯价格、储能系统投资和并网项目总投资包含不同费用。Ziegler 与 Trancik 对锂离子电池成本下降的研究说明，技术进步的衡量需要明确指标及数据口径[3]。

作者简介：魏少康（1992—），男，学士，总经理，主要研究方向为能源技术。
通讯作者：魏少康，电子邮箱：81438519@qq.com

历史电芯成本变化可以解释部分技术趋势，但用于项目比较时，需要再考虑变流、热管理、土建、接入以及寿命期替换等费用。

本文考察放电时长、循环频率与往返效率对储能技术成本排序的影响。以并网点交付电量为统一计量边界，将初始投资分解为功率相关费用和能量相关费用，结合年化费用与运行参数，推导两种方案的成本差异及交叉条件。在此基础上，结合日内移峰、持续供电保障和季节性储备的服务需求，分析不同运行条件下的技术取舍。

2 成本模型与基本假设

2.1 统一计量边界

对于能够以额定功率持续放电的装置，持续时长可写为式（1）。其中，D 为放电时长，单位 h；E 为并网点对应的可用能量，单位 kWh；P 为输出功率，单位 kW。额定能量若在直流侧定义，需要先换算为相同边界下的可用能量。辅助用电和运行保留容量也会影响装置实际可以交付的能量。

$$D = \frac{E}{P} \tag{1}$$

储能类型综述将电化学、机械、热和化学等技术按储存方式及应用特征进行组织[4]。这些技术的成本构成不同。电池增加能量容量通常需要增加相应器件，液流电池可以通过电解液和储罐扩展能量部分，抽水蓄能与压缩空气储能则受到场址和工程规模影响。功率与能量分解有助于比较，但它是一种局部近似，需在相应规模范围内使用。

接入工程、控制系统和部分土建具有固定或阶梯费用。本文将其按设计功率折算，并保持比较范围一致。扩容跨越设备规格或工程阈值时，需要重新计算费用。

2.2 将建设费用转化为年度负担

设 a 为每千瓦输出功率对应的年化功率费用，单位为元/（kW·年）；b 为每千瓦时可用能量对应的年化能量费用，单位为元/（kWh·年）。年化处理纳入投资、寿命、折现及固定维护，必要时将替换和残值按一致口径折算。则每千瓦输出功率的年度固定费用为 $a+bD$。a 与 b 分别保留了功率设备和能量容量对费用的影响。

设 n 为每年的等效满循环次数，则单位功率的年交付电量为 nD。等效满循环按并网点累计交付电量除以可用能量计算，用于将不同深度的调用换算到同一吞吐口径。n 既与可获得的充电时段有关，也与输出服务有关。对于长期储备，应按全年运行计入储存等待时间和待机损耗，再计算输入能量。

设 p 为输入电量的平均充电费用，单位元/kWh；η为同一计量边界下的往返效率；v 为按交付电量计量的其他变动费用，单位元/kWh。在稳定年度运行、费用和效率可用平均值表示的条件下，单位交付电量成本 c 可表示为式（2）。若衰减、价格和调用逐年变化，应回到逐年折现的寿命现金流与交付电量计算。

$$c = \frac{a}{nD} + \frac{b}{n} + v + \frac{p}{\eta} \tag{2}$$

式（2）的三个费用项分别对应固定支出的摊销、交付相关的变动费用和输入能源费用。其量纲均为元/kWh。容量补充若已在年化能量费用中计入，就不再作为变动费用重复计算；退化费用若按吞吐量计入 v，年化费用中也须相应调整。保持这种一致性，是将不同来源参数代入同一模型的前提。

2.3 运行口径与寿命费用的一致性

稳定年度模型要求费用和运行之间具有相同口径。若以满容量交付电量计算 n，却以容量衰减后的输出计算效率，固定费用和能源费用就会对应不同服务。工程核算可以先指定评价期内的可

用容量，再根据逐年交付和替换安排计算年化费用。设备是否通过补充容量维持输出，也应在功率和能量费用中得到一致处理。

充电费用 p 应按实际输入电量加权。不同充电时段的电价与可用能量通常不同，简单平均各时段价格可能偏离项目实际支出。若相应价格中已经包含网络或交易费用，就不再重复计入 v。对多种充电来源，还需保留各自输入和费用记录。这样得到的平均值，才能与相同边界下的往返效率一起计算能源费用。

年化费用的比较还需要一致的评价年限与服务要求。寿命较短的部件可以在项目期内替换，寿命较长的设施可能在期末仍具有残值。将各自支出和残值折算到共同评价期，比直接采用设备标称寿命更适合方案比较。模型中的 a 和 b 由这些工程记录形成，其作用是将寿命费用转化为年度负担，保留技术之间的费用结构差异。

3 成本排序变化的解析条件

3.1 时长改变功率费用的摊销

由式（2）可见，在 n 保持不变时，增加 D 会降低 $a/(nD)$，而 b/n 不随 D 变化。这意味着较长时配置能够分摊功率设备费用，但增加能量容量本身仍有代价。若只看到按千瓦时表示的总投资下降，容易把功率费用被摊薄误读为所有费用同步下降。时长变化究竟带来多少收益，需要同时观察 a、b 和实际调用。

这一关系也解释了不同扩容方式的经济差异。功率设备费用较高、增加能量容量较便宜的方案，较可能在长时服务中改善相对位置；能量费用较高的方案，则需要足够调用来分摊容量投入。Sepulveda 等在低碳电力系统模型中发现，能量容量成本和放电效率对长时储能的系统作用具有重要影响[5]。该结果与成本分解在方向上相呼应，进一步说明时长选择需联系系统的供需事件。

实际运行中，n 和 D 往往不能独立改变。延长放电需要更多输入能量和更长充电时间，也可能减少一年内可以完成的循环。若额定容量增加而累计交付电量增长不足，n 便会下降。此时式（2）中的 b/n 可能上升，抵消部分功率摊销收益。因而，评价扩容应根据新的服务剖面重新计算可实现的调用次数。

3.2 效率优势如何抵消固定费用

比较提供相同功率、时长和调用次数的方案 A 与 B，并令两者面对相同的充电费用 p。记 $\Delta a=a_A-a_B$、$\Delta b=b_A-b_B$、$\Delta v=v_A-v_B$，则成本差 $\Delta c=c_A-c_B$ 如式（3）。下标 A 和 B 分别代表两种方案，Δc 小于 0 时方案 A 的单位交付电量成本较低。

$$\Delta c=\frac{\Delta a}{nD}+\frac{\Delta b}{n}+\Delta v+p\left(\frac{1}{\eta_A}-\frac{1}{\eta_B}\right) \tag{3}$$

若 A 的效率较高，即 $\eta_A>\eta_B$，其输入能源费用项低于 B。这个优势随 p 增加而扩大。与此同时，如果 A 的年化固定费用较高，低调用状态下仍可能由固定支出主导成本差。调用频率提高后，固定费用差被更多电量分摊，效率与变动费用的相对作用增强。高效率方案的经济价值因此取决于它能够节省多少实际付费的输入电量。

令 $g=p(1/\eta_B-1/\eta_A)-\Delta v$，表示 A 相对于 B 每单位交付电量的运行费用优势。在 $g>0$ 且 $\Delta a/D+\Delta b>0$ 的条件下，令式（3）等于 0，可以得到成本相等时的循环次数 n^*，如式（4）。在其余参数不变且运行可实现的范围内，$n>n^*$ 时 A 的成本较低，$n<n^*$ 时 B 的成本较低。

$$n^*=\frac{\frac{\Delta a}{D}+\Delta b}{g} \tag{4}$$

成本交点只有在条件满足时才存在。当 A 同时具有较低固定费用和较低运行费用，模型中无需通过提高循环次数实现排序反转。若 $g\le 0$ 而 A 固定费用较高，则增加循环也不会使其在该比较条件下形成优势。即使计算得到正交点，也需检查充放电时间、可用电价时段和衰减是否允许达到 n^*。数学交点与可实现的工程运行是两个相互衔接的判断。

将式（3）中的固定费用差记为 $K=\Delta a/D+\Delta b$，在 $K>0$、$g>0$ 的条件下，有 $\Delta c=K/n-g$，且 $n^*=K/g$。令 $x=n/n^*$、$y=\Delta c/g$，则成本差可以写为 $y=1/x-1$。图 1 据此表示循环次数相对于交点变化时的排序关系。图中坐标均为无量纲量，曲线由代数关系直接得到；横坐标为 1 时成本相等，小于 1 时 A 成本较高，大于 1 时 A 成本较低。

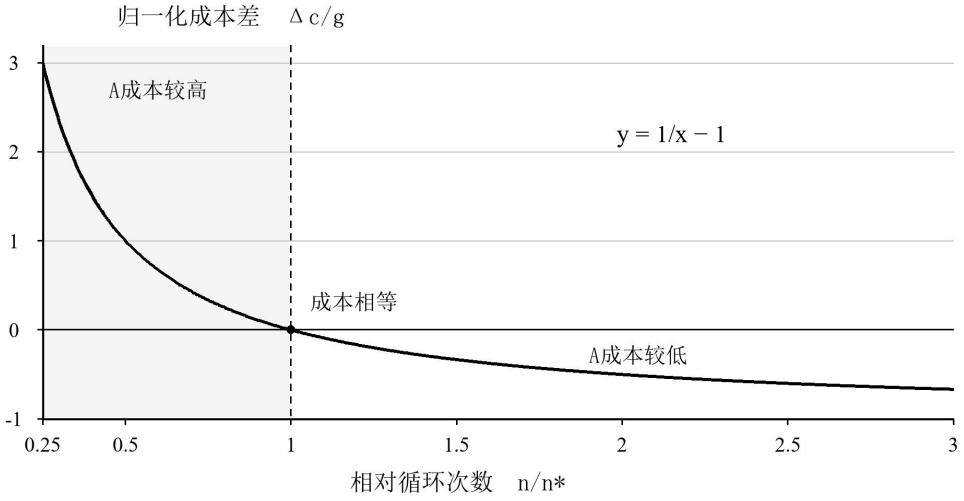


图 1 循环频率与归一化成本差的关系

归一化关系使交点的位置与曲线形状得到区分。设备费用、充电费用和效率会改变 n^*，而在上述条件下，循环增加对归一化成本差的作用遵循同一关系。越接近低循环端，增加调用对摊薄固定费用差的作用越强；调用已经较高时，成本差逐渐接近运行费用差。对于主要承担备用的装置，能否提高循环仍由服务和库存要求决定，图中的高循环区间需要通过运行条件检验。

3.3 调用与退化改变参数关系

频繁运行增加交付电量，也可能增加容量损失和维护。NREL 的 2024 年技术基线将部分容量补充费用纳入固定运行维护，并给出相应寿命和循环假设[1]。采用不同调用方式时，容量补充、替换和可用容量需要同步核对，利用率与费用由此形成相互联系的模型输入。

对于存在明显循环退化的系统，v 可以表示与吞吐相关的维护或损耗费用，年化费用则处理时间相关的支出。对于长期备用，日历变化、待机损耗及定期检测更为突出。工程计算应按技术和运维方式选择费用归属，并保持一致的有效寿命。装置寿命、项目评价年限和质保期限具有不同含义，直接混用会改变替换次数及成本结果。

IEA 的电池报告将储能部署与电力系统、供应链和制造条件相联系[6]。因此，技术性能还需要转化为稳定可获得的设备与服务。采购期的成本优势可能受到交付、维护和停运影响。对于需要在特定时段可用的装置，计划与非计划停机应进入服务评估，名义效率较高但关键时段不可用的方案无法按完整服务计算收益。

4 不同电力服务中的技术取舍

4.1 日内移峰

日内移峰以重复出现的供需错配为对象，运行通常具有相对稳定的充放电窗口。在这一服务中，较高 n 使充电费用和效率差异更有分量，但循环退化也随之进入评价。比较时需要使用同一输出功率和实际可交付能量，将温控与辅助损耗计入输入，并核对峰谷时段能否容纳所需充放电。

国内年度技术综述整理了锂离子、液流、压缩空气、热储能等路线的技术与示范进展[7]。这些进展扩大了方案选择范围，而具体取舍仍需沿式（2）的费用项展开。对于同一日内服务，不同方

案可能通过降低初始投入、减少输入损耗或延长有效寿命改善成本，其作用需要在相同运行口径下合并。

4.2 持续供电保障

持续低风低光或高负荷事件，需要储能在较长时间内提供可用容量。此时调用次数可能较低，年化容量费用和能量扩展方式更为重要。较低η增加输入需求，但如果服务一年只发生少数次，其对年度总费用的作用可能小于建设和维护。低频服务应同时报告年化容量费用与一次事件可持续输出能力。

Staadecker 等在不同电网条件下分析长时储能，发现其价值受输电条件、储能费用和其他资源配置共同影响[8]。装置时长的选择由此与输电条件及其他资源配置相联系。网络互联可以改变缺电事件的持续时间，其他可调度资源可以改变储能的调用频次。比较应先确定资源组合中的服务缺口，再计算储能满足该缺口的费用。

4.3 季节性储备与能量转换

季节性储备面对较长库存时间和较少完整循环。式（2）中较低 n 会提高能量容量的摊销费用，同时要求η包含等待期间损耗。低能量容量费用、可维持的库存以及场址条件成为关键。评价应采用与季节性储备相匹配的参数组合，并与日内高频调节的运行条件分别计算。

热泵型储电利用热状态储存能量，再通过动力过程输出电力，其构型、温度条件及设备匹配影响整体性能[9]。比较时应把“电—热—电”的全部转换计入输出边界。若终端需求为热，产品已经改变，就应与提供相同热服务的方案比较。跨部门利用可以增加价值，但需要明确哪些输出属于电力储存，哪些属于其他能源服务。

表 1 归纳不同服务中需要优先核对的条件。服务剖面决定成本模型输入，而成本分析帮助筛选满足服务的方案。方案筛选应依据服务所需的实际调用，综合比较建设投入、运行费用及可用性。

表 1 电力储能服务与比较条件

服务	主要运行特征	优先核对的条件
日内移峰	重复调用、相对稳定的窗口	效率、充电时段、循环退化
持续供电保障	较长事件、调用次数有限	年化容量费用、连续输出、可用库存
季节性储备	库存时间长、完整循环较少	能量费用、等待损耗、场址与转换路径

4.4 技术结构与场址条件的筛选

技术选择可以先从费用结构识别候选方案，再核对工程条件。增加能量容量相对便宜的路线，在较长时服务中可能改善相对位置，但储能介质、场址和接入仍决定这种扩展能否实现。抽水蓄能需要相应地形与水系统，压缩空气储能需要匹配储气方式与热过程，电化学系统则需要考虑设备布置、温控和维护。技术分类所提供的是筛选范围，项目条件决定实际可用的组合[4]。

对于功率与能量能够较独立扩展的方案，设计可以分别调整输出设备与储存介质；对于两者联系紧密的方案，延长时长可能同时改变系统规模和辅助设备。经济模型应跟随这种设计变化更新 a、b 和η。若延长时长使设备运行偏离原有高效区间，原先采用的效率参数也需要调整。比较同一技术的不同构型，因而与比较不同技术一样需要保持服务和计量边界。

部署周期也是系统配置的组成部分。服务缺口发生在某一时间，而大型工程、场址调查和接入建设需要相应周期。即使长期费用较低，方案仍需满足预定投入运行时间。规划可以将近期需求与远期需求分别安排，再比较过渡资源和最终资源的共同费用。这样，经济性与可部署性才能在同一决策中衔接。

5 从装置成本到系统配置

系统规划需要进一步判断新增储能能够减少哪些支出，以及能否改善可靠性。弃电减少、备用能力和网络约束缓解对应不同价值，配置应在共同服务要求下比较储能、需求响应、输电与可调度资源的组合。

美国能源部 2024 年的长时储能报告分析不同技术降低成本的创新路径，并讨论实施时间和费用[10]。这种技术发展分析适合识别参数改善的方向，项目计算则需要使用当前可获得的技术条件。创新情景、工程报价和长期运行数据各自回答不同问题，进入比较时应分别标明年份、规模和对应费用项。

多服务运行可以提高利用，也产生容量冲突。日内套利后是否保留持续供电库存，需要在时序运行中判断。辅助与能量服务收入只有在共同功率、荷电状态和可用性约束下能够实现，才可计入联合方案。低频备用还需考虑保留容量对可靠性的作用。

工程应用需补入非线性费用、时序电价和天气变化。范围分析应保持参数的联系：高循环伴随退化，低价充电受时段限制，长时配置可能减少循环。技术排序的稳定性取决于比较条件能否同时实现。

参数分析可以围绕交点开展。先以服务允许的循环范围比较 n 与 n^*，再识别使 n^*发生明显移动的费用或效率条件。当全部可行运行都位于交点同一侧，排序相对清楚；可行范围跨越交点时，需要进一步获取充电、调用和维护资料。与分别改变每个参数相比，这种方法能够定位最影响方案选择的不确定性。

供电保障还需要关注多年天气中的连续事件。一个平均年度可以具有足够可充电量，但在持续低出力事件中，补充库存的机会可能很少。系统模型应检查事件之前的库存、事件期间的交付和事件之后的恢复，将储能同其他资源一起安排。Staadecker 等讨论电网条件下长时储能的价值，也说明这种时序联系需要进入资源组合评价[8]。

对于多服务方案，评价可以先确定必须保留的功率和能量，再计算可用于其他任务的部分。由此得到的循环次数才与库存约束一致。若成本优势主要来自提高利用率，运行计划应说明新增调用发生在何时，以及是否减少关键事件中的可用容量。成本分解和时序模型在这里承担相互衔接的任务：前者解释参数如何改变排序，后者检验形成该排序的运行是否可行。

6 结论

储能成本排序由功率费用、能量费用与运行费用在具体服务中的相对作用决定。延长时长能够摊薄功率费用，能量费用仍由调用频率分摊；效率优势能否抵消较高固定费用，则取决于充电费用、变动费用和可实现的循环次数。由成本分解得到的交点为技术比较提供了条件判断，工程运行决定这些条件能否满足。

日内移峰应重视效率与退化的共同影响，持续供电保障应同时评价容量费用和事件期间的可用性，季节性储备则需要关注能量扩展和长期库存。先确定服务剖面，再统一输出和寿命成本边界，最后将装置放入多资源系统中评价，有助于使技术选择与实际供电需求相一致。

参考文献

[1] NREL. 2024 Annual Technology Baseline: Utility-scale battery storage[DB/OL]. (2024)[2026-10-13]. https://atb.nrel.gov/electricity/2024/2023/utility-scale_battery_storage.

[2] SCHMIDT O, MELCHIOR S, HAWKES A, et al. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies[J]. Joule, 2019, 3(1): 81-100. DOI: 10.1016/j.joule.2018.12.008.

[3] ZIEGLER M S, TRANCIK J E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(4): 1635-1651. DOI: 10.1039/d0ee02681f.

[4] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101047. DOI: 10.1016/j.est.2019.101047.

[5] SEPULVEDA N A, JENKINS J D, EDINGTON A, et al. The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems[J]. Nature Energy, 2021, 6(5): 506-516. DOI: 10.1038/s41560-021-00796-8.
[6] IEA. Batteries and secure energy transitions[R/OL]. Paris: IEA, 2024[2026-10-13]. https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions.
[7] 陈海生, 李先锋, 胡勇胜, 等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
[8] STAADECKER M, SZINAI J, SÁNCHEZ-PÉREZ P A, et al. The value of long-duration energy storage under various grid conditions in a zero-emissions future[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9501. DOI: 10.1038/s41467-024-53274-6.
[9] 孙健, 陶建龙, 胡芸蓉, 等. 基于热泵型储电技术国内外研究综述[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1963-1976. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0938.
[10] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Achieving the promise of low-cost long duration energy storage[R/OL]. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2024[2026-10-13]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-08/Achieving%20the%20Promise%20of%20Low-Cost%20Long%20Duration%20Energy%20Storage_FINAL_08052024.pdf.

城市自然解决方案的空间配置与受益公平

雷雅涵*

云南轻纺职业学院，云南 昆明 650300

摘 要：城市自然解决方案能够通过生态过程缓解高温和雨洪压力，其规划价值还取决于服务能否到达需要保护的居民。本文综合城市降温、雨洪调节和绿色空间公平研究，分析生态功能、空间连通与受益分配之间的关系。研究认为，降温与雨洪调节具有不同的作用尺度，多功能空间需要依据水文联系、植被条件和居民活动组织，面积增长不足以表征适应成效。风险暴露、空间可达性与居住稳定性共同影响居民获得收益的机会，建设优先级应将高风险和服务不足地区相互叠合，并保留生态可行性与维护条件的约束。进一步提出，以服务路径确定干预范围，将日常维护、极端事件应对和居民参与纳入规划全过程，使生态改善与居民持续受益形成可追踪的联系。

关键词：基于自然的解决方案；城市适应；空间配置；生态系统服务；环境公平

Spatial Planning and Equitable Benefits of Urban Nature-Based Solutions

LEI Yahan*

Yunnan Light And Textile Industry Vocational College, Kunming, Yunnan 650300

Abstract: Urban nature-based solutions can alleviate heat and stormwater pressures through ecological processes, but their planning value also depends on whether services reach residents who need protection. This article synthesizes research on urban cooling, stormwater regulation, and greenspace equity to examine the relationships among ecological functions, spatial connections, and benefit distribution. Cooling and stormwater regulation operate at different spatial scales, requiring multifunctional spaces to be configured according to hydrological connections, vegetation conditions, and residents' activities. Additional green area alone does not adequately represent adaptation outcomes. Exposure, accessibility, and residential stability shape opportunities to benefit. Intervention priorities should combine high risk with service deficits while retaining ecological feasibility and maintenance constraints. Planning around service pathways and incorporating routine maintenance, extreme-event responses, and resident participation can establish traceable connections between ecological improvement and sustained benefits for urban residents.

Keywords: nature-based solutions; urban adaptation; spatial planning; ecosystem services; environmental equity

DOI：https://doi.org/10.65192/hdyngw56

© 2026 作者

本文依据 CC BY 4.0 许可协议开放获取

1 引言

城市高温与内涝发生在具体空间中：居民在无遮阴道路上通行，雨水沿不透水地表汇入低洼街区。绿色空间可以通过遮阴、蒸散、入渗和蓄滞改变这些过程，但新增面积与居民获得保护之间还存在空间联系。一个远离日常步行路径的公园，能够改善局地环境，却可能无法缓解通勤过程中的暴露。设置在错误汇流位置的设施，也可能难以接收需要调蓄的径流。

基于自然的解决方案以保护、管理和恢复生态系统回应社会问题，并同时关注生物多样性和人的福祉。Seddon 等强调，应将这一概念放在生态保护和气候行动的关系中理解，避免以单一目标替代生态系统的完整功能[1]。对于城市规划，问题因而从“增加多少绿色空间”进一步转向“通过何种生态过程，在何处改变风险，并由谁获得收益”。

Raymond 等关于城市自然解决方案协同收益的研究，将效益识别、实施和评价相互连接[2]。协同收益涉及多种服务，但不同服务具有不同作用尺度和受益条件。降温可能主要发生在树冠和周边活动空间，雨洪调节则取决于上游汇水、下游排放和设施间的连接。若将所有效益直接汇入一个综合得分，具体空间关系及其取舍容易被掩盖。

作者简介：雷雅涵（1988—），女，硕士，助教，经济师，主要研究方向为经济管理，区域经济史，中国史。
通讯作者：雷雅涵，电子邮箱：3283382774@qq.com

本文从空间规划角度分析城市自然解决方案的配置与受益公平。研究采用文献综合，围绕降温、雨洪调节及绿色空间分配的相关研究，比较服务产生、服务到达和居民持续受益三个环节。理论讨论以城市社会与生态过程的相互联系为基础，重点考察干预范围、建设优先级和长期维护如何影响适应成效。

2 生态过程与空间尺度

2.1 降温服务与居民活动的联系

Li 等利用遥感资料分析全球主要城市绿色空间的降温，发现城市间降温能力存在明显差异，并将其与绿色空间数量和质量联系起来[3]。这一研究说明，绿化具有可观的空间调节作用，但同样面积的绿色空间并不对应相同降温。背景气候、城市形态及植被状态影响效能，城市内部的空间位置则进一步影响服务所覆盖的人群。

树木降温主要通过遮阴和蒸散实现。Haiwei Li 等综合不同城市研究，讨论背景气候、城市形态和树木性状对降温效能的影响[4]。遮阴能够直接改变人在活动空间中接受的辐射，蒸散则与供水和植被生理状态有关。规划因此需要同时考虑树冠与活动空间的对应、土壤与水分条件，以及建筑布局对空气交换的影响。

降温评价应将测量对象与规划目标相连。遥感地表温度反映表面状态，近地气温反映空气环境，人体热感受还与辐射、湿度、风速和活动有关。若目标是缓解户外通行暴露，步行路线的遮阴连续性和使用时段就具有直接意义。城市平均地表温度下降能够说明环境变化，却仍需结合居民活动位置判断谁获得了改善。

大型公园与街道绿化承担的作用不同。公园能够提供相对完整的生态空间和集中休憩环境，街道树冠则与日常通勤、候车和接送活动联系更紧密。对服务不足的密集街区，仅增加远端公园可能难以改变居民必须经过的暴露路段。空间规划应将集中绿地和分散遮阴组织为可使用的网络，使居民从住宅到公共设施的路径能够获得连续服务。

2.2 雨洪调节依赖汇流与排放关系

雨水花园、下凹绿地和绿色屋顶可以改变径流形成与传输，但其调节能力受到土壤、设施容积、前期含水状态和降雨过程影响。Neumann 等通过地表与管网耦合模型比较分散自然措施，发现减轻洪涝的作用随降雨强度和配置方式变化[5]。规划评价需要将设施配置纳入汇水系统，考察径流传输与蓄滞的共同作用。

汇水位置决定设施能够处理多少径流。上游设施可能减少进入管网的水量，低洼空间则可能承担临时蓄滞；两者通过地形、道路和排水系统连接。若只按可用土地布置设施，而不考虑水从何处来、向何处去，设施可能无法承担预期功能。自然措施的干预边界应沿水文联系确定，行政边界则主要用于组织实施责任。

在强降雨中，入渗和蓄滞可能达到容量限制。规划需要预留超过设施能力之后的流路，将安全排放、道路通行和重点设施保护衔接起来。自然措施与排水管网、泵站及应急空间应组成连续系统。即使日常降雨下可以较多保留径流，极端事件仍需按照相应情景判断水深、持续时间及溢流去向。

雨洪调节与日常使用还存在时间差异。平时可休憩的下凹空间在降雨期间承担蓄滞，使用规则和事件后的恢复便成为规划的一部分。维护通道、积水警示与淤积清理影响空间能否持续发挥功能。将维护作为建成后的附属工作，会使设施的设计容量与实际可用容量逐渐脱离。

2.3 多功能空间中的协同与取舍

降温、雨洪调节与生境营造可以在同一空间发生，但其关系需要根据具体过程判断。增加植被能够提供遮阴和蒸散，也需要足够生长空间与供水；扩大蓄滞容积有利于调节径流，却可能改变日常活动布局。某些生境需要减少干扰，而高频公共活动需要更便捷的进入和管理。多功能规划需要确定空间内部如何分配这些需求。

黄馨等将城市社会与生态系统的理论和分析框架进行整合，强调多尺度关系以及脆弱性、韧性和适应性之间的联系[6]。这一视角使多功能空间超出设施清单：生态过程与居民活动相互影响，空间形态与制度安排共同决定功能能否维持。因此，生态质量、公共使用和维护能力需要在规划阶段同时考虑。

建设时序也影响协同。树冠形成需要时间，雨洪设施的部分作用则在完成接入后即可发生。建成当年的验收应依据实际树冠与植被状态评价降温，成熟期收益则对应后续成长阶段。规划可区分近期可实现的服务和植被成长后的服务，并在成长期间提供必要的遮阴和使用安排。这样，空间的预期功能才能与居民实际经历相互对应。

2.4 干预尺度与服务外溢

地块是建设和产权管理的常见单位，生态服务却可能跨越地块边界。上游绿地调节径流，其受益对象可以位于下游；街道树冠提供遮阴，其使用者也包括不在该街区居住的通勤者。若评价只统计建设地块内部的变化，跨界服务和外部负担便容易遗漏。规划应分别识别建设范围、过程影响范围和居民使用范围，再判断三者如何连接。

不同目标的尺度也可能相互嵌套。单个树池影响植被生长与入渗，连续街道影响步行路径，多个汇水单元共同影响下游流路。设施在较小尺度上的良好表现，需要通过空间连接才能进入更大尺度的结果。黄馨等所讨论的多尺度社会与生态关系，为识别这些联系提供了分析基础[6]。对于同一街区，可先沿主要服务路径检查关键断点，再决定哪些局部设施需要补充或调整。

图 1 将生态过程与居民受益之间的空间联系展开。降温路径依次联系树冠和水分条件、遮阴与蒸散、居民活动空间；雨洪路径联系土壤与蓄滞条件、入渗和径流调节、受保护的道路与设施。居民获得的服务还受开放条件、空间可达性与居住稳定性影响。规划和维护同时作用于这些联系，因此生态改善与受益公平需要在同一空间过程中考察。

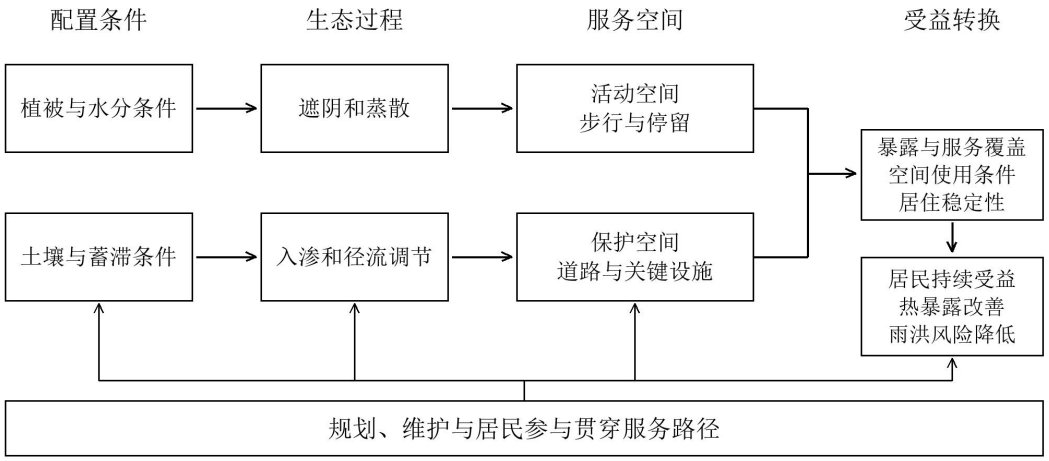


图 1 从生态过程到居民受益的空间联系

服务外溢也改变了协作范围。承担绿地维护的主体与获得下游保护的主体可能不同，若费用与责任只在建设地块内部安排，持续维护便缺少相应支持。跨界协作可以围绕共享的服务目标组织，将贡献位置与受益位置连接起来。这样，生态功能的空间范围与管理责任的范围才有机会相互匹配。

3 谁能持续获得生态改善

3.1 风险暴露与服务供给的错位

环境公平首先涉及不同居民承担的风险与获得的服务是否相称。高温暴露、绿地不足和较弱的应对能力可能集中在同一街区，城市平均绿化水平难以显示这种叠合。Wolch 等将绿色空间、公

共健康和环境正义联系起来，讨论改善环境与维护居民受益之间的关系[7]。服务缺口需要在居民所处生活环境中识别，结合街区风险、日常活动和现有服务判断配置需求。

配置优先级可以从风险暴露与现有服务的交叉识别开始。高暴露且服务不足的地区具有较强改善需求，随后还需核对可用空间、生态条件与设施连接。老年人、儿童和户外劳动者等群体的活动时间与位置不同，若以常住人口均匀分配需求，可能遗漏白天的实际使用。需求识别应结合人口分布、活动场所与时间，定位不同群体的服务需求。

3.2 可达性连接空间与使用

绿色空间靠近住宅并不总意味着居民能够使用。交通障碍、出入口、开放时段和步行环境都影响可达性。对行动不便的人群，过街距离和坡度可能比直线距离更关键。服务范围应沿实际可进入的路线确定，并观察途中是否存在无遮阴、积水或无障碍设施中断。

空间内部条件进一步影响使用。遮阴主要覆盖草地而缺少可停留设施，或降温较好的区域在日常时段不开放，都可能使供给与需求脱节。居民参与在此提供的是具体使用知识：在哪里候车、何时通行、哪些空间难以进入。这些信息能够修正规划对服务到达的判断，比仅询问居民是否支持绿化更有助于设计。

3.3 居住稳定性影响受益持续性

绿色空间改善还可能与住房和土地市场变化相互作用。Anguelovski 等在北美和欧洲 28 个城市考察新增绿色空间与绅士化的时间联系，在其中 17 个城市发现相应关联[8]。这种联系涉及城市发展路径及住房条件，其关键启示是：生态改善的受益者可能随人口迁移而改变。评价应追踪原有居民能否继续居住和使用空间。

对于租住比例较高的街区，居民持续受益需要与居住稳定安排相衔接。建设之前可以识别租赁负担、土地更新和搬迁压力，实施中将住房部门、社区组织及空间管理者纳入协调。土地增值与居民获得降温或休憩服务属于不同结果，二者应分别观察。将环境改善与居住成本变化放在一起分析，有助于识别收益是否到达原先承担较高风险的人群。

空间使用规则也可能改变受益分配。大型活动占用、收费项目扩大或管理方式改变，会减少原有日常使用机会。因而，公平不仅是初始选址的属性，也取决于运行期间的管理。公共空间服务对象、开放条件和反馈渠道需要长期保持可核对，居民的使用经验应能够进入管理调整。

3.4 居民参与与受益需求的识别

参与过程影响哪些需求能够进入方案。工作时间固定的居民、承担照护的人群和行动不便者，参加集中活动的机会不同。仅统计参加人数，难以判断意见是否覆盖主要使用群体。规划可以结合路径观察、不同时间的访谈和可持续的反馈渠道，了解居民日常暴露与使用障碍，再将这些资料与生态和工程调查相互核对。

居民意见需要对应可判断的空间问题。希望增加绿色空间，可以进一步联系候车点是否缺少遮阴、学校通行是否绕行、雨后哪一段道路难以使用。具体问题能够进入设计，也便于建成后观察是否得到改善。若意见只汇总为满意度，原本需要处理的地点和时段便可能丢失。参与的实际作用在于补充专业调查不容易获得的使用知识。

不同群体之间也可能存在真实取舍。安静休憩、生境保护与高频活动需要不同空间安排，连续遮阴和公共活动场地也可能争用有限土地。规划应保留这些差异，说明方案怎样分配空间，以及哪些需求通过相邻设施或时间安排得到满足。将取舍具体呈现，比要求所有群体对同一方案作总体赞成更有助于形成可持续的使用规则。

4 以服务路径组织规划与维护

4.1 将适应目标转化为配置顺序

不同适应目标要求不同配置。缓解通勤高温需要联系连续步行路径和高频活动节点，减少内涝损失需要联系汇水过程和受保护对象，恢复生境则需要考虑生态连通及干扰。规划可先确定主要风险和服务对象，再定位生态过程能够介入的位置，随后协调多种功能。这样形成的空间范围，可能跨越地块或行政界线，但能够保持清楚的服务联系。

徐琳琳等对国外自然解决方案研究的梳理，将蓝绿基础设施、生态恢复和参与式规划治理列为重要议题[9]。从这些研究转向本地配置，需要明确城市已有空间和管理条件。存量街区受土地和管线约束，可以优先修复现有树冠、打通使用路径及改善关键汇水位置；新开发地区则有机会在道路与排水系统形成之前统筹空间。两类地区具有不同干预起点。

表 1 给出从适应目标到规划判断的对应关系。表中各项应分别保留，因为较高降温效能无法抵消不可达的公共空间，较大蓄滞容积也无法抵消不安全的溢流路径。规划方案可在满足必要约束以后比较资源投入和改善范围，将取舍交给明确的目标和公共讨论。

表 1 适应目标与空间配置的对应

适应目标	空间判断	运行与受益检查
缓解户外高温	树冠与活动节点及通行路径相连	高温时段的遮阴、可进入性与使用
减少内涝损失	汇水、蓄滞和安全排放形成连续系统	事件容量、溢流去向与恢复
保持生态质量	生境、土壤与植被条件相匹配	植被成长、维护及活动干扰
改善受益公平	风险暴露与服务不足地区叠合	不同群体可达性与居住稳定性

4.2 从建设验收到长期生态过程

IUCN 在 2025 年发布第二版自然解决方案全球标准，强化生态、社会和经济维度的联系，并进一步强调公平、保障措施、财务可行性和适应性管理[10]。这些要求指向同一问题：自然解决方案的功能需要在持续运行中形成，建成面积和初始验收只能描述其中一个阶段。

维护责任应对应生态过程。树木需要生长空间、土壤管理和适当供水，雨洪设施需要清淤及进出水检查，公共空间需要保持可达和日常使用。预算可按成熟期、极端事件后恢复和常规维护分别安排，使责任与需要处理的状态对应。维护人员应能够记录功能变化，并把故障或植被退化反馈至规划和更新部门。

跨部门协调应围绕完整服务路径展开。街道树冠涉及道路、园林和管线管理，蓄滞空间涉及排水、绿化与公共使用。若部门分别以自身资产完好作为目标，服务中断可能发生在接口处。协调机制需要明确接口责任：谁处理入口堵塞，谁调整活动安排，谁在极端事件后决定重新开放。职责清楚才能让空间设计在运行中维持连续性。

4.3 将监测尺度与居民受益相连

监测需要区分空间功能与受益结果。树冠覆盖、土壤状态和设施容积描述生态条件，温度和径流变化描述功能表现，居民暴露、通行和使用则描述服务结果。三类指标之间可以相互解释，但应保留各自计量位置与时间。对降温，应联系高温时段和使用路径；对雨洪，应联系降雨过程与下游对象；对公平，应联系不同群体的服务变化。

一次建设前后比较还可能受到天气、周边开发和人口变化影响。监测可保留季节和事件记录，在可行条件下设置具有相近背景的参照空间，解释变化发生于何种条件。遥感适合观察较大范围的空间差异，地面观测和居民活动资料适合补充日常使用。不同证据的配合能够使生态变化与实际受益之间的联系更加清楚。

规划的适应性体现在依据监测调整配置。若植被成活而居民通行暴露仍高，应检查树冠位置与活动路径；若设施保持完好而下游积水持续，应检查汇流连接和排放条件。评价由此成为定位问题的工具。其目标是让服务路径更完整，并使受益不足的群体进入下一轮调整。

对于受益分配，监测还应保留人口和使用者的变化。一个改造地块的使用量增加，可能来自原居民使用更频繁，也可能来自新的使用者进入。两种变化都具有规划意义，但对于原先服务不足的人群，关键是其获得服务的机会是否改善。将居住、活动和开放条件的变化一起记录，可以使公平评价保持明确的受益对象。

4.4 有限资源下的配置优先序

规划优先序可以先处理不可替代的约束，再比较可改善的范围。需要保护的通行和关键设施、必要的安全流路以及现有高质量生境，构成方案应满足的条件。在这些条件下，进一步比较高暴露人群覆盖、空间连通和长期维护投入。这一顺序将必要约束与预期改善相互联系，为配置优先级提供清楚的判断依据。

对存量街区，修复服务断点可能比孤立增加面积更直接。已有公园难以进入，可以改善出入口和通行连接；连续街道存在少数无遮阴路段，可以结合植被生长条件补齐节点；蓄滞设施难以接收径流，可以调整汇流接口。是否采用这些措施仍取决于现场条件，但判断依据可以始终围绕服务路径保持一致。

项目组合也需要考虑时间。保护成熟树冠能够保留现有服务，新种植需要等待成长，土壤和排水调整则可能先改变雨洪过程。规划可以将保留、修复和新增措施相互配合，使近期服务与长期生态质量衔接。分阶段推进时，每一阶段都应说明居民能够使用的空间及服务，避免建设进度与可获得收益脱离。

资金安排应随这些阶段变化。建设投资确定空间的初始条件，常规维护维持生态过程，事件后恢复保障再次使用。IUCN 第二版标准进一步强调长期财务可行性与适应性管理[10]，意味着预算需要同时支持功能维持和问题修正。将维护及恢复责任落实到服务路径，能够使有限资源持续作用于城市适应目标。

5 结语

城市自然解决方案的适应价值，通过生态过程、空间连接和居民使用共同形成。降温依赖植被与活动环境的匹配，雨洪调节依赖汇水、蓄滞与排放的联系，多功能空间则需要协调不同服务的尺度和时间。规划以具体服务路径确定范围，才能把绿色空间建设转化为可追踪的风险改善。

受益公平需要同时考虑风险暴露、空间可达性和居住稳定性。建设优先级应关注高风险且服务不足地区，并以生态可行性、公共使用和维护条件约束方案。将居民经验、跨部门责任和长期监测纳入规划过程，可以使生态改善与居民持续受益保持联系。

参考文献

[1] SEDDON N, SMITH A, SMITH P, et al. Getting the message right on nature-based solutions to climate change[J]. Global Change Biology, 2021, 27(8): 1518-1546. DOI: 10.1111/gcb.15513.

[2] RAYMOND C M, FRANTZESKAKI N, KABISCH N, et al. A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas[J]. Environmental Science & Policy, 2017, 77: 15-24. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.07.008.

[3] LI Y, SVENNING J C, ZHOU W, et al. Green spaces provide substantial but unequal urban cooling globally[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 7108. DOI: 10.1038/s41467-024-51355-0.

[4] LI H, ZHAO Y, WANG C, et al. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 754. DOI: 10.1038/s43247-024-01908-4.

[5] NEUMANN J, SCHEID C, DITTMER U. Potential of Decentral Nature-Based Solutions for Mitigation of Pluvial Floods in Urban Areas—A Simulation Study Based on 1D/2D Coupled Modeling[J]. Water, 2024, 16(6): 811. DOI: 10.3390/w16060811.

[6] 黄馨, 韩玲, 赵永华, 等. 城市社会-生态系统研究理论基础与分析框架[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6892-6905. DOI: 10.20103/j.stxb.202310232308.

[7] WOLCH J R, BYRNE J, NEWELL J P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 234-244. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.017.
[8] ANGUELOVSKI I, CONNOLLY J J T, COLE H, et al. Green gentrification in European and North American cities[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3816. DOI: 10.1038/s41467-022-31572-1.
[9] 徐琳琳, 胡文浩, 徐文辉. 国外基于自然的解决方案（NbS）研究进展[J]. 中国城市林业, 2024, 22(3): 176-183. https://cjournal.hep.com.cn/1672-4925/CN/1179775598677107096.
[10] IUCN. IUCN launches the Second Edition of the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions[EB/OL]. (2025-10-10)[2026-10-13]. https://iucn.org/press-release/202510/iucn-launches-second-edition-iucn-global-standard-nature-based-solutionstm.

回应发展之问
以创新之智

主办/出版： 亚太社会创新研究院
出版周期： 月刊
投稿渠道： https://journal.apsiri.com/JID
出版日期： 2026年11月

ISSN 3137-2813
01
9 773137 281000