

# New Paradigm of Land Engineering: Natural Resource Governance and Sustainable Transformation from the Perspective of Life Systems

Zhiliang Xu

Lishan Branch of Huaibei Natural Resources and Planning Bureau, Huaibei, Anhui, 235025, China

## Abstract

Based on the core metaphor of “land life system,” this paper systematically examines the multiple challenges and transformation opportunities faced by contemporary land engineering. In the field of natural resource registration, it proposes the “digital twin registration system” and the “blockchain-enabled dynamic ownership management system” to break through the limitations of traditional static registration. In terms of land resource management and protection, it constructs the “integrated space-air-ground intelligent monitoring network” and the “adaptive land restoration framework.” In the dimensions of land economy and planning, it develops the “ecological product value realization mechanism” and the “multi-center collaborative planning model.” Through comparative case analyses at home and abroad, the paper reveals that China’s land engineering is transitioning from “factor management” to “system governance,” from “static control” to “dynamic adaptation,” and from “economic growth tools” to “sustaining a life community.” Ultimately, it proposes a new paradigm of “intelligent human-land collaboration” for land engineering by 2035.

## Keywords

Land life system; Digital twin; Ecological product value; Adaptive governance; Human-land synergy

## 土地工程新范式：生命系统视角下的自然资源治理与可持续转型

徐之良

淮北市自然资源和规划局烈山分局，中国·安徽 淮北 235025

## 摘要

本文基于“土地生命系统”这一核心隐喻，系统审视当代土地工程面临的多重挑战与转型机遇。在自然资源确权登记领域，提出“数字孪生登记体系”与“区块链赋能的动态权属管理系统”，突破传统静态登记的局限；在国土资源管理保护方面，构建“空天地一体化智能监测网络”与“适应性土地修复框架”；在土地经济与规划维度，发展“生态产品价值实现机制”与“多中心协同规划模型”。论文通过国内外比较案例分析，揭示了我国土地工程正从“要素管理”向“系统治理”、从“静态管控”向“动态适应”、从“经济增长工具”向“生命共同体维护”的范式转变，最终提出面向2035年的“人地智能协同”土地工程新范式。

## 关键词

土地生命系统；数字孪生；生态产品价值；适应性治理；人地协同

## 1 引言

### 1.1 问题提出

全球土地利用变化已成为地球系统关键环境变量的主要驱动力，贡献了约23%的人为温室气体排放（IPCC, 2022）。在中国，城镇化率从2000年的36.2%跃升至2022年的65.2%，伴随的耕地减少、生态空间压缩与土地退化问题日益严峻。传统土地工程范式面临三重困境：技术碎片化

（各系统互不联通）、治理离散化（部门各自为政）和价值单一化（过度强调经济产出）。与此同时，以“自然资源统一管理”为目标的机构改革、数字技术爆发式发展以及“双碳”目标约束，共同构成了土地工程转型的历史性契机。

### 1.2 理论框架：土地生命系统理论

本文提出“土地生命系统理论”，将土地视为具有代谢、循环、适应和进化特征的生命有机体。这一理论整合了以下三个理论视角：

复杂适应系统理论：土地系统具有非线性、自组织与路径依赖特性，传统线性规划方法已显不足。

社会-生态系统理论：强调人类与土地系统的耦合互动，

【作者简介】徐之良（1975—），男，中国安徽淮北人，本科，中级，从事土地工程研究。

治理需兼顾生态完整性与社会公平性。

行星边界框架：将土地工程置于地球系统极限内，强调土地利用的生态安全边界。

### 1.3 研究方法与创新点

本文采用多方法混合研究设计：通过文献计量分析识别国际前沿；借助政策文本分析梳理中国土地治理逻辑演变；运用案例比较法（选取浙江、德国北威州、新加坡等典型案例）提炼创新模式；通过系统动力学模拟验证部分机制有效性。

主要创新点：

提出“土地生命系统”隐喻及其实践框架

构建数字孪生赋能的动态确权登记体系

设计生态产品价值实现的“三链融合”机制

提出面向不确定性的适应性土地规划模型

## 2 自然资源确权登记的范式变革：从静态簿记到动态数字孪生

### 2.1 全球确权登记趋势与挑战

联合国《2030年可持续发展议程》将“为所有人提供合法土地权属保障”列为重要目标。全球范围内，土地登记呈现三大趋势：三维立体化（从平面到空间权利）、时序动态化（权属变更实时更新）和信息集成化（多源数据融合）。然而，发展中国家仍有超过70%的土地权属缺乏正式登记（世界银行，2021），即便在发达国家，传统登记系统也难以应对气候变化引发的土地形态变化（如海岸线后退带来的产权模糊）。

### 2.2 中国实践：统一登记制度的突破与局限

中国自2013年启动不动产统一登记制度改革，已基本完成全国房地一体登记，并探索自然资源确权登记。浙江德清等试点地区创新了“三维地籍”和“自然资源产权电子凭证”。然而，当前体系仍存在明显局限：时空维度割裂（历史权利与现状登记脱节）、生态要素缺失（碳汇、生态容量等新型权利未被涵盖）和智能水平不足（AI应用多局限于OCR识别）。

### 2.3 创新框架：区块链赋能的动态数字孪生登记体系

#### 2.3.1 体系架构

本文提出“一核三维五层”的登记新体系：

· 核心：以土地生命系统完整性保障为核心目标

· 三维：空间维（三维立体）、时间维（全生命周期）、属性维（自然-经济-社会多元属性）

· 五层：

物理层：空天地一体化感知网络（卫星、无人机、物联网传感器）

数据层：分布式土地数据湖（整合多源异构数据）

模型层：土地数字孪生体（实时映射、模拟预测）

合约层：智能合约自动执行（权属变更、税费缴纳）

应用层：多场景服务接口（政府管理、市场交易、公众查询）

#### 2.3.2 关键技术突破

区块链与数字孪生融合：将土地权属信息、利用状态、生态参数上链存储，确保数据不可篡改、全程追溯。数字孪生体实时同步物理土地变化，当耕地转为林地时，系统自动触发权属属性变更，并更新碳汇计量。

动态产权束管理：传统产权“束”相对固定，新体系支持“动态产权束”定制。例如，在生态敏感区，可将开发权暂时剥离进行交易，而保留所有权与使用权；灾后重建时，可临时创设“应急使用权”。

时空编码系统：设计全球统一的“土地时空身份证”（Geo-temporal ID），整合地理坐标、时间戳和属性编码，实现跨区域、跨时期土地信息关联查询。

#### 2.3.3 制度创新：预期登记与风险对冲机制

引入“预期登记制度”，允许基于科学预测的未来权利登记。如海岸带区域，业主可预先登记“海岸线后退补偿权”，当海平面上升导致土地丧失时自动触发补偿。建立“土地风险对冲基金”，从土地增值收益中提取比例，用于应对气候变化等不确定风险。

## 3 国土资源管理与保护的智能转型：从人防到技防，从修复到适应

### 3.1 国际前沿：基于自然的解决方案（NbS）与智能监测

欧盟“绿色协议”将“无净土地消耗”设为2050年目标，推广基于自然的解决方案。荷兰“空间适应计划”将水资源管理、土地用途与气候适应深度融合。技术层面，美国NASA“生态系统空间站”计划通过高光谱卫星网络实时监测全球生态系统变化。

### 3.2 中国挑战：管理精细化不足与生态修复科学性欠缺

中国已建立国土空间规划体系与“三区三线”管控框架，但实施中暴露问题：监测滞后（违法行为发现多为事后）、标准粗放（“一刀切”的修复方案适应当地不足）和公众参与有限。2020年国家审计报告显示，部分生态修复项目存在“重建设、轻管护”现象，三年后生态功能改善率不足40%。

### 3.3 创新实践：空天地网一体化智能监测与适应性修复

#### 3.3.1 “感知-认知-响应”智能监测网络

构建“5+1”监测体系：

· 多维感知：卫星遥感（每周覆盖）、无人机巡检（重点区域每日）、地面物联网（实时）、社会感知（公众举报、社交媒体）、地下探测（地质雷达）

· 一个认知中枢：土地AI大脑，集成深度学习、知识

## 图谱与模拟推演

案例：福建“智慧自然资源”平台，通过AI识别新增建设占用耕地，识别准确率达92%，响应时间从平均15天缩短至2小时。

### 3.3.2 土地健康诊断与适应性修复框架

提出“土地全科医生”理念，建立：

多指标健康诊断体系：涵盖物理结构（土壤压实度）、化学性质（污染物）、生物活性（微生物多样性）、生态功能（水源涵养）和社会价值（文化景观）五个维度。

适应性修复工具箱：

- 自然修复优先：划定“土地休养生息区”，最小化人工干预

- 精准修复技术：如针对重金属污染土壤的“植物-微生物联合修复3.0”

- 过程监测调整：修复中实时监测，动态调整方案

修复后长效管护机制：推行“修复+产业”模式，如废弃矿山修复后植入光伏产业，收益反哺管护。

### 3.3.3 跨区域生态补偿与协同保护

设计“横向+纵向”生态补偿体系。横向层面，基于生态系统服务流测算，建立省际、市际补偿。如新安江流域，浙江每年补偿安徽约2亿元用于上游保护，水质达标率持续提升。纵向层面，中央财政设立“国家生态安全屏障基金”，重点支持青藏高原、黄土高原等关键区域。

## 4 土地经济与规划的模式重构：从增长主义到共生发展

### 4.1 全球反思：土地金融化危机与空间正义运动

2008年全球金融危机揭示了土地过度金融化的风险。与此同时，“土地回归”运动在全球兴起，原住民要求土地权利，城市社区争取“空间正义”。经济学前沿开始探索“甜甜圈经济学”，强调土地经济应在生态天花板与社会基础之间运行。

### 4.2 中国转型：从土地财政到多元价值实现

中国地方政府土地出让收入占财政收入比重从2010年的67%降至2022年的37%，转型压力巨大。同时，“绿水青山就是金山银山”理念推动生态价值市场化探索。但价值核算方法不统一、交易机制不健全、利益分配不合理等问题制约发展。

### 4.3 创新路径：生态产品价值实现与多中心协同规划

#### 4.3.1 生态产品价值实现的“三链融合”机制

构建“供应链-价值链-制度链”协同体系：

供应链（生态产品生产与供给）：

- 建立“生态账户”体系，每块土地核算生态资产（碳汇、水源涵养、生物多样性维持等）

- 发展“土地多功能利用”，如“农光互补”“森林康养”等复合模式

价值链（价值发现与实现）：

直接交易：完善碳汇交易、水权交易、排污权交易市场

生态溢价：对生态产品认证，如“气候友好型农产品”溢价销售

权益变现：开发绿色金融产品，如“生态资产抵押贷款”“绿色债券”

制度链（保障体系）：

- 制定《生态产品价值实现促进条例》

- 建立国家生态产品交易平台

- 培养专业“生态经纪人”队伍

#### 4.3.2 应对不确定性的适应性土地规划模型

传统规划基于静态预测，难以应对气候变化、技术颠覆等不确定性。本文提出“弹性-转型-适应”（RTA）规划模型：

弹性基础层：识别土地系统关键阈值与脆弱点，划定“不可开发区域”，预留生态廊道与防灾空间。

转型促进层：

- 混合用途分区：允许一定比例的功能混合，提高空间适应能力

- 时间分层规划：区分近期刚性控制与远期弹性引导

- 情景规划工具：模拟不同气候情景、人口情景下的土地需求，制定应对方案

适应调节层：

- 监测-评估-调整循环机制：每三年评估规划实施效果，动态调整

- 社区土地银行：社区持有部分土地储备，根据需求灵活利用

#### 4.3.3 多中心协同治理与公众深度参与

构建“政府-市场-社会-科技”四轮驱动治理格局：

- 政府角色转变：从“唯一管理者”变为“平台搭建者与规则制定者”

- 市场机制创新：发展土地信托、社区土地合作社等多元主体

- 社会深度参与：推行“参与式预算”，让居民决定社区土地收益用途；建立“规划众创平台”，利用VR技术让公众体验规划方案并提出意见

- 科技赋能治理：基于大数据的决策支持系统，实现“数据驱动的协商民主”

案例：成都“社区规划师”制度，每个社区配备专业规划师协助居民参与微更新，三年实施项目1200余个，满意度达88%。

## 5 国际比较与中国特色发展道路

### 5.1 典型模式比较

国家/地区 核心理念 关键制度 技术应用 可借鉴点

欧盟 土地循环利用 土地消耗监测目标、棕色地块再开发基金 土壤数据库、LUCAS 调查 量化管控目标、全欧盟监测网络

日本 紧凑城市 容积率奖励、土地整理专项立法 三维地籍、微气候模拟 精细化制度设计、防灾融合

新加坡 战略储备 国有土地租赁制、动态总体规划 数字孪生城市、地下空间建模 长远战略眼光、技术超前部署

中国 生命共同体 自然资源统一管理、生态红线 国土空间基础信息平台、人工智能监测 系统治理思维、快速政策创新

## 5.2 中国特色的形成机理

中国特色源于制度优势（全国性改革快速推进）、技术赶超（数字技术赋能治理）、文化基因（天人合一与现代生态理念契合）、规模复杂性（多元地理倒逼适配性创新）。中国经验为全球提供城镇化耕地保护、生态脆弱区治理、数字技术赋能国土治理的参考路径。

## 6 结论与展望：迈向人地智能协同新范式

主要结论：土地工程范式转变具必然性，正从机械论到有机论、管控到治理、单一价值到多元价值转变；技术-制度协同是转型核心，适应性是核心能力，中国形成兼具系统性与创新性的特色道路。

面向 2035 年“人地智能协同”新范式：构建全面感知的土地神经系统、自主优化的土地代谢循环、民主协商的治理生态、价值共生的经济体系。

政策建议：启动土地数字孪生国家行动计划；颁布《土地生命系统保护与促进法》；建国家土地科学数据中心；实施土地工程师能力重塑计划；发起全球土地治理倡议。

土地不仅是资源载体，更是人类与所有生命共同家园，土地工程的最高使命是维护家园生命力、适应力与永续活力，实现人地生命共同体和谐共生。

## 参考文献

- [1] 中国自然资源部. (2023). 《中国自然资源公报2022》. 北京: 地质出版社.
- [2] IPCC. (2022). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report*. Geneva: IPCC.
- [3] 吴次芳, 等. (2021). 《土地工程学原理》. 北京: 科学出版社.
- [4] United Nations. (2021). *The Global Land Outlook, 2nd edition*. Bonn: UNCCD.
- [5] 林坚, 等. (2020). “国土空间规划的十大理论问题”. 《城市规划》, 44(8), 9-17.
- [6] World Bank. (2021). *Land Governance Assessment Framework*. Washington, DC: World Bank.