

从模型到应用：基于生态系统服务权衡的乡村生态修复规划工具研究

Model to Application: A Study on a Decision Support Tool for Rural Ecological Restoration Planning Based on Ecosystem Services Trade-offs

董楠楠^{1*} 王怡琪¹ Harald Zepp² Lars Gruenhagen² Malte Bührs² Christin Busch³ 魏维轩¹
DONG Nannan^{1*} WANG Yiqi¹ Harald ZEPP² Lars GRUENHAGEN² Malte BÜHRS² Christin BUSCH³ WEI Weixuan¹

(1.同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2.波鸿鲁尔大学地理学系, 波鸿 44801; 3.ILS-国家和城市发展研究所有限公司, 多特蒙德 D-44135)

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Institute of Geography, Ruhr Universität Bochum, Bochum, Germany, 44801; 3. ILS - Institut für Landes-und Stadtentwicklungsforschung GmbH, Dortmund, Germany, D-44135)

文章编号: 1000-0283(2024)03-0004-09
DOI: 10.12193/j.laing.2024.03.0004.001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-11-29
修回日期: 2024-01-29

摘要

在全球范围内的气候变化背景下, 具有多种功能和服务价值的乡村生态空间成为当下国际生态规划研究与合作的关注热点之一。为实现乡村生态空间的精准管理与规划, 中德双方围绕联合课题“生态系统服务概念在德国鲁尔与中国大都市区韧性发展模式下的绿色基础设施规划应用”进行了深入探索。在土地利用与土地覆盖类型的基础上, 进一步识别了生物群落类型, 并基于调节、供给、文化三大生态系统服务类型, 选取了评估生态系统服务供需权衡的指标和对应权重, 构建了乡村生态空间规划场景下的生态系统服务价值评测模型。以上海市水库村为例, 运用该课题的评测模型, 初步评估了典型乡村生态规划场景下的生态系统服务价值。最后, 从应用尺度、研究范围以及操作流程三个方面总结了该评测模型的优化方向。

关键词

乡村; 生态修复; 生态系统服务; 供需权衡; 决策辅助工具

Abstract

In the context of global climate change, rural ecological spaces, which offer a variety of functions and service values, have emerged as one of the focal points in international ecological planning research and cooperation. To achieve precise management and planning in these rural ecological spaces, the Sino-German joint project “Implementation of the Ecosystem Services Concept in Green Infrastructure Planning to Strengthen the Resilience of the Metropole Ruhr and Chinese Megacities” undertook an in-depth exploration. This project, based on land use and land cover types, further identified biotope types. Utilizing three major ecosystem service types: regulating, provisioning, and cultural, it selected indicators and corresponding weights for assessing ecosystem services trade-offs between supply and demand, thereby constructing a model for evaluating ecosystem service values in rural ecological space planning scenarios. Taking the Shuiku Village in Shanghai as a case study, this paper uses the evaluation model and preliminarily assesses the ecosystem service values in typical rural ecological planning scenarios. Finally, this paper summarizes the optimization directions of this evaluation model in terms of application scale, research scope, and operational procedures.

Keywords

rural; ecological restoration; ecosystem service; trade-offs between the supply and demand; decision support tool

董楠楠

1975年生/男/安徽合肥人/博士/副教授/
研究方向为景观规划与设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: dongnannan@tongji.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金面上项目“光绿组合模式下的屋面绿化夏季调温综合效能及其影响因素研究”(编号: 52378072); 上海同济城市规划设计研究院有限公司2023年教育部产学研合作协同育人项目“基于数字化技术的乡村生态空间规划编制项目案例”(编号: 231100155154454)

1 研究背景

1.1 乡村生态修复的研究趋势

乡村地区作为城乡人居环境的生态基底,在城镇化的过程中面临着景观格局破碎化^[1]、乡村生态系统服务能力降低^[2]、生态环境质量恶化^[3]等诸多问题。面对气候变化的全球挑战,乡村生态空间的保护与修复已成为当下国内外的研究热点话题。联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 在“促进有助于加强粮食安全和营养的可持续农业和粮食体系的生态农业及其他创新方法”中提到,发展生态农业需密切关注与乡村生态系统服务评估与生物多样性保护等方面的协调发展^[4]。全球环境基金 (Global Environment Facility, GEF) 在面向可持续发展的中国农业生态系统创新性转型项目中也强调了通过科学规划农业生态景观,实现农业生态系统循环与生物多样性保护的重要意义^[5]。

国外乡村生态治理与修复的研究重点关注特定乡村空间场景下,乡村生态修复实践对当地生态系统服务综合价值的影响。如在乡村河流生态空间类型研究中关注水质和生物多样性的现状与河岸带植被生长潜力的评估^[6-8]。在农田生态空间类型中,多数研究将农业发展与生物多样性保护相结合,从而促进农业可持续发展^[9-11]。而在乡村林地生态空间类型中,研究重点集中在从变更土地利用类型的角度,恢复林地的综合生态功能与价值^[12-13]。

自2017年国内提出乡村振兴战略以来,乡村生态问题愈加受到重视。在此背景下,当前国内乡村生态修复研究注重在乡村振兴视角下,探索基于“三生”空间的解决路径与发展模式,从而指导实际的工程应用实践^[14-15]。近年来,在全域土地综合整治与环境专项治理的政策指引下,国内学者还围绕乡村用地

规划调整中如何精准识别修复分区展开了系列研究^[16],并强调需要综合考虑多元生态系统服务的过程^[17]。其中,乡村河道^[18]和湿地景观^[19-20]是国内学者重点研究的空间类型。

1994年乡村生态景观保护框架 (The Conservation of Rural Ecological Landscapes Framework, CRELF) 中提出按照乡村景观单元类型进行生态功能的评估^[21]。如何准确评估乡村生态效益,探索有效的生态修复途径是当下乡村生态研究的热点之一^[22-23]。其中,生态系统服务供需匹配是有效发挥乡村生态效益的前提条件^[24]。目前应用较为广泛的以Costanza与千年生态系统服务构建的指标体系为主,主要分为供给、支持、调节与文化服务4类^[25]。国内外乡村地区生态系统服务供需研究主要涉及乡村生态水环境^[26]、乡村生态旅游^[27]、乡村游憩服务^[3]、乡村景观风貌^[28]等领域。生态模型法和市场价值法在较大尺度的乡村生态空间应用较为广泛^[29];小尺度的乡村生态效益研究主要通过实地调研结合参与法,确定特定乡村生态空间类型(如水环境^[30]、生态农园^[27])中的生态系统服务评价因子,构建其分级分类的评价指标并进行综合评价。

1.2 国际化背景下的生态修复工具研究合作

随着全球化的不断深入,跨国和跨地区的合作愈发成为当今应对气候变化挑战的重要趋势。国际农发基金 (International Fund for Agricultural Development, IFAD) 在支持乡村地区恢复自然生态系统和生物多样性方面进行了探索与实践^[31];欧盟各国在恢复退化的生态系统并减轻乡村地区生物多样性丧失方面展开了积极合作^[32];在国际组织的引领下,非洲国家之间开展了乡村地区生态系统修复项目,旨在防止乡村空间的土地荒漠化和生态系统退化等问题^[33]。随着国际间合作关系的

加深,如何将基于不同地区治理经验的知识和经验进行转移转化甚至共同创造新的工具,成为新形势下国际合作的新趋势。首先,国际合作伙伴之间相关政策规定的差异和技术转移的挑战,限制了研究合作的深度。其次,不同地区、不同项目的不同需求,也增加了跨国合作研究关于标准化流程设计与使用推广方面的困难,限制了知识和标准体系与地方实践场景的结合转化。

作为解决这一合作问题的尝试,德国联邦教育与研究部 (Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF) 于2017年设置了面向国际技术合作的“城市地区可持续发展项目” (Sustainable Development of Urban Regions, SURE) 系列,该项目研究已经进行了7年半的研究与实践,围绕可持续性以及韧性两大主题,促进德国研究团队与中国及东南亚研究团队探索相应的技术工具,解决亚洲地区因城市化、自然资源过度使用以及气候变化等因素带来的问题。该系列项目目前在研课题10项,经过了概念阶段之后,目前已进入了研发测试阶段。

2 模型: 基于生态系统服务供需以及协同权衡的生态修复工具研究

2.1 IMECOGIP课题背景

作为SURE系列课题之一,IMECOGIP课题由德国波鸿鲁尔大学 (Ruhr-Universität Bochum) Harald Zepp教授团队主持开展,其全称为生态系统服务概念在德国鲁尔与中国大都市区韧性发展模式下的绿色基础设施规划应用 (Implementation of the ecosystem services concept in green infrastructure planning to strengthen the resilience of the Metropole Ruhr and Chinese megacities, IMECOGIP)。IMECOGIP课题于2019年启动,课题组成员来自不同的学科领域,例如城市生态学、风景

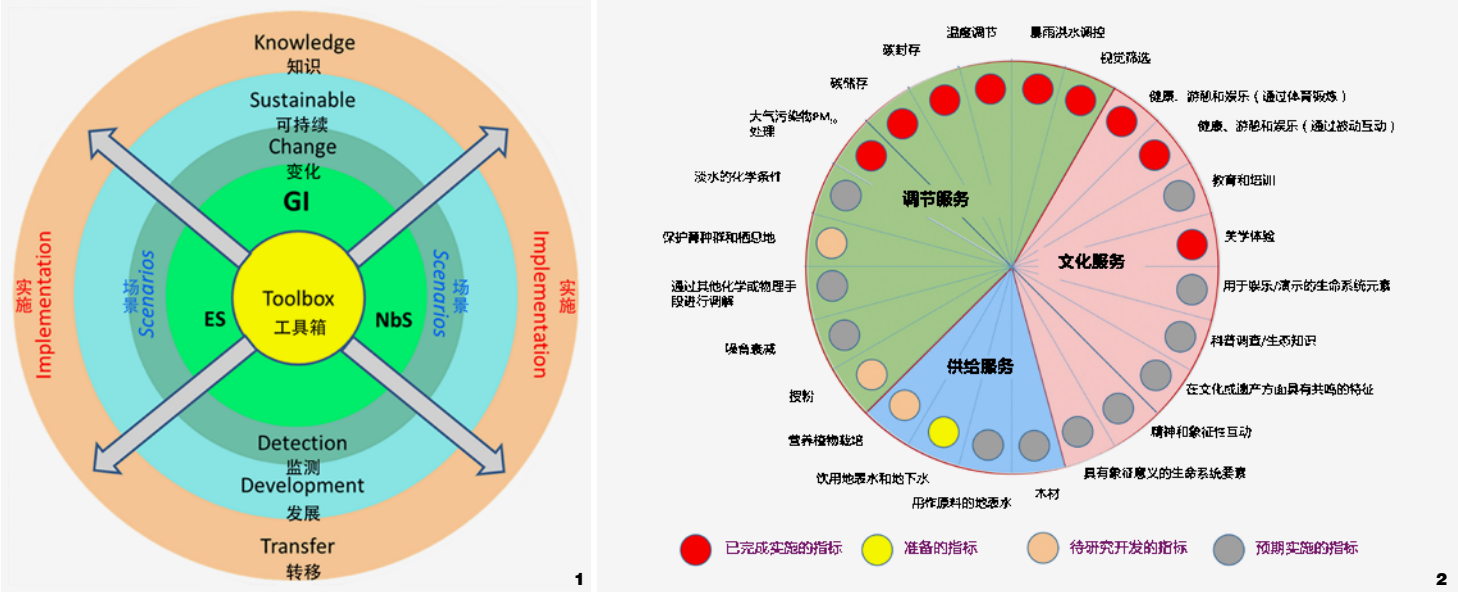


图1 IMECOGIP工具箱开发的核心思路
Fig. 1 Core conceptual framework for the development of the IMECOGIP toolbox

图2 IMECOGIP工具箱的生态系统服务评测指标体系
Fig. 2 Ecosystem services evaluation indicator system of the IMECOGIP toolbox

园林学、地理学、社会学、地理空间信息科学等。在跨学科合作支持下，IMECOGIP 课题尝试不仅为城市规划师、景观师以及相关企业提供便捷的生态系统服务评测数字工具，进行生态现状基底及未来潜力的勘查与识别，还能够为政府部门提供不同规划方案环境绩效的模拟及比较，从而辅助以生态发展为导向的规划决策。

IMECOGIP 课题研究的核心思路是基于土地利用及土地覆盖类型 (Land Use and Land Cover, LULC) 的空间数据，进行绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI) 的生态系统服务 (Ecosystem Service, ES) 供需识别及评估研究。基于 QGIS 软件，开发了一个开源的工具箱，结合研究地区的气候、文化以及社会经济特征，此工具箱能够评估及权衡在不同土地利用方案或发展条件下，城乡绿色基础设施的生态系统服务能力；并且基于评估的结果，提出基于自然的解决提升方案 (Nature-based Solution,

NbS) (图1)。

2.2 IMECOGIP 工具模型的研究重点

IMECOGIP 工具模型的研究重点之一是评测指标的选取。按照欧洲环境署发布的生态系统服务国际通用分类标准 (The Common International Classification of Ecosystem Services, CICES)，将生态系统服务评测指标体系分为了调节 (regulation service)、供给 (provision service) 以及文化服务 (cultural service) 三大类，可细分为 24 项指标 (表1)。图2展示了 IMECOGIP 工具箱包含的各项评估指标，以及各指标现阶段的开发完成情况。在具体组成方面，IMECOGIP 工具箱由针对不同的生态系统服务指标进行价值计算的模块组成。现阶段已投入应用的模块包括冷却强度 (cooling intensity)、空气净化效果 (air filtration)、径流管理 (flow regulation)、碳固定 (carbon sequestration) 等生态系统服务评测模块。

针对所选的评测指标，于2019年10月邀请了17位来自高校、规划部门、市级政府的国际专家人员，围绕LULC分类对应的各项生态系统服务能力重要性进行评级 (图3)。在收集了各个专家的评分后，对所有分数通过平均意见分数法 (Mean Opinion Score, MOS) 进行了最小—最大标准化，并通过计算得到了不同类型LULC对应的每项生态系统服务重要性评级量表。为了验证结果的可靠性，对每类LULC对应的生态系统服务平均评级与各评级的标准差进行回归分析，为测算研究区域综合的生态系统服务供需水平提供了科学验证结果^[34]。

2.3 IMECOGIP 工具模型的流程构架

IMECOGIP 工具模型的设计构思是构建了一个从“知识”到“数据和方法”再到“信息”的逻辑闭环，从而实现了从科研到实践的应用转化。通过建立一个基于标准数字底

表1 IMECOGIP工具箱生态系统服务评测指标体系介绍说明
Tab. 1 Description of the IMECOGIP toolbox ecosystem services evaluation indicator system

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	指标说明 Indicator description
A调节服务	A ₁ 视觉筛选	在缓冲区内遮挡人们视线的难看物体的百分比 (%)
	A ₂ 暴雨洪水调控	空间单元截留单场暴雨的排水量 (m ³)
	A ₃ 温度调节	在用户自定义的热浪期间, 与不透水表面相比, 城市绿地的降温强度 (Kelvin/kW·h)
	A ₄ 碳封存	生物群落从大气中吸收的碳量 (g C·m ⁻² ·a ⁻¹)
	A ₅ 碳储存	生物群落的生物量中储存的碳量 (g C·m ⁻² ·a ⁻¹)
	A ₆ 大气污染物PM ₁₀ 处理	植被表面吸收直径为10 μm的颗粒物量 (kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)
	A ₇ 淡水的化学条件	淡水生态系统化学状况的调节
	A ₈ 保护种群和栖息地	生物群落类型维持作为指示物种的鸟类育幼种群的能力
	A ₉ 通过其他化学或物理手段进行调解	自然过程减缓人为起源的干扰, 涵盖生态系统吸收和减少人类活动引起的环境干扰的作用
	A ₁₀ 噪音衰减	通过植被减少噪声污染的能力
	A ₁₁ 授粉	生物群落类型支持传粉昆虫的能力
B供给服务	B ₁ 营养植物栽培	可重复和可持续种植可食用植物的地点 (地貌、土壤、气候、自然灾害)
	B ₂ 饮用地表水和地下水	可用于饮用目的的土壤生物单位的年地表水和地下水补给量 (m ³)
	B ₃ 用作原料的地表水	可用于生产、加工等目的的土壤生物单位的年地表水补给量 (m ³)
	B ₄ 木材	通过栽培和从野生来源获取的木材
C文化服务	C ₁ 健康、游憩和娱乐 (通过体育锻炼)	直接、现场和户外与生命系统的互动带来的益处, 尤其是通过体育活动
	C ₂ 健康、游憩和娱乐 (通过被动互动)	通过与自然被动互动获得的好处, 包括心理、生理等方面, 而无需积极参与或改变环境
	C ₃ 教育和培训	使用生命系统及其特征作为现场教学和学习活动的主题, 包括在自然环境中发生的教育和培训经验
	C ₄ 美学体验	划定复杂区域, 例如公园, 它们以一种能够提供审美体验的方式结合了生境特征和技术基础设施 (按顺序排列)
	C ₅ 用于娱乐/演示的生命系统元素	与生命系统的知识性和代表性互动密切相关, 自然元素用于娱乐或代表, 常见于文化或艺术背景
	C ₆ 科普调查/生态知识	促进现场研究和获取环境及自然知识的能力
	C ₇ 在文化或遗产方面具有共鸣的特征	被人们认为具有文化、历史或遗产重要性的生命系统元素
	C ₈ 精神和象征性互动	能促进精神或象征性互动的要素, 包括环境中的非生物元素
	C ₉ 具有象征意义的生命系统要素	涉及使用生命系统 (如植物或动物) 作为国家或地方徽章或象征

座与工作流的应用操作框架, IMECOGIP 工具箱实现了对于多尺度、多背景、多源数据的规范化管理与评测。具体的运行流程为: (1) 用户通过在 QGIS 平台上输入待研究区域的基础数据, 并按照相应要求进行标准化处理; (2) 根据项目的不同场景和生态修复的具体

需求, 在工具箱提供的模型基础上, 用户可以自行调整对应的参数与公式, 从而构建精准化的综合生态系统服务评测模型 (图4); (3) 经过评测模型的运算, 可以得到研究区域的生态系统服务评估结果, 结果以空间分析图和评分图表的形式清晰直观地呈现 (图5)。值得一提的是, 在图表展示的评估结果中, 大多数模块参考的土地利用类型是林地, 因为其在提供众多生态系统服务方面表现出最高的水平, 因此被赋值为1; 其他土地利用方案取值均为对比此方案下的相对数值, 赋值范围为0 ~ 1。但是用户可根据基地的具体情况进行调整, 然后将偏离默认值的情况记录在案并说明理由。统一比较基准并进行相对赋值的方法, 不仅使得 IMECOGIP 工具箱的评测结果更加直观清晰, 还方便了同一基地不同方案的遴选。

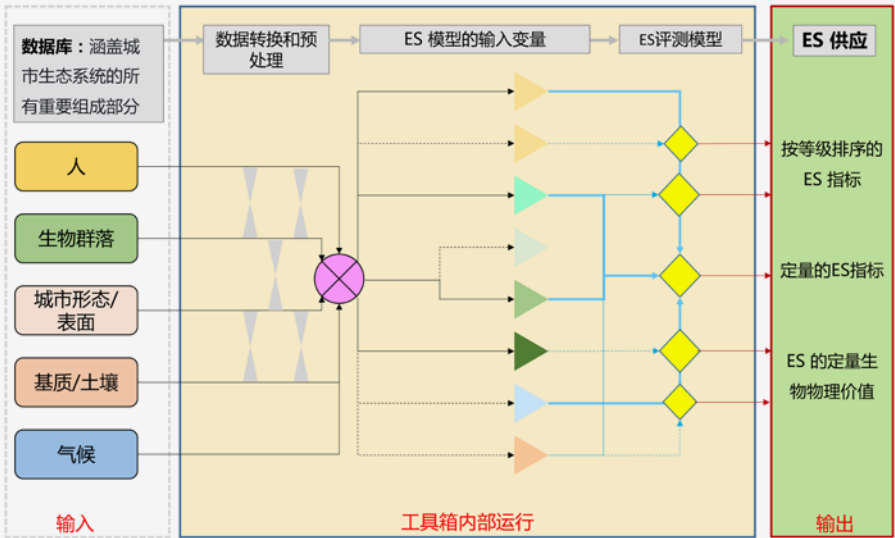
IMECOGIP 工具箱还能实现标准化的数据流管理, 针对不同项目背景, 首先制定和发布通过统一的数据标准, 并结合规则约束、系统控制等手段, 对项目的数据, 例如文件命名、数据格式、坐标系设置等方面进行规范化处理。再在经过数据标准化处理的项目文件中, 导入工具箱的各个模块并进行运算。标准化的数据流, 能够实现工具箱内部数据的完整性、有效性、一致性、规范性、开放性。统一的数字底座与操作流程, 大大减少了 IMECOGIP 工具箱的基础数据处理量, 提升了后续工具箱内部各项生态系统服务模块运算, 以及成果展示和输出的处理效率。同时, 这不仅为用户提供了在数据收集与处理阶段的步骤与参考, 方便其选用工具箱进行生态系统服务的供需评测; 同时还允许用户按照自身需求更改各项参数信息与计算公式, 实现针对不同项目各项生态系统服务指标的精准评测。

等级	城市住宅 (不透水率大)	城市住宅 (不透水率中)	城市住宅 (不透水率小)	农村住宅	城市绿色用地 (公园)	农业用地	温室	农林业用地	林地	水体 (河流)	水体	商业用地	工业用地和仓储用地	体育和娱乐用地	教育和文化用地	交通设施用地	市政基础设施	预留开发用地 (建设中用地)
为营养目的饲养的动物	0.2	0.2	0.6	1.5	1.1	1.8	1.6	1.9	1.3	2.1	1.1	0.3	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.1
以营养为目的的原地水产养殖动物	0.2	0.3	0.4	0.9	0.9	0.6	0.4	1.1	0.8	3.8	3	0.5	0.5	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3
作为材料使用的地表水 (非饮用目的)	1.9	2.7	2.7	2.9	2.9	2.4	2.3	3.0	3.2	3.3	3.1	1.7	1.6	1.3	2.0	0.8	1.9	2.6
作为材料使用的地下水 (和地下水) (非饮用目的)	1.6	2.1	2.5	2.6	2.9	2.9	2.6	3.0	4.7	2.5	1.9	1.2	1.1	1.5	1.5	0.7	1.4	2.2
水文循环和水流调节 (包括防洪)	1.4	1.6	2.1	2.3	3.8	3.1	2.5	3.8	4.5	3.8	2.8	0.8	0.8	1.0	1.3	0.8	1.1	1.4
授粉 (或海洋中的 "配子" 传播)	1.3	1.7	2.1	2.5	3.8	3.3	2.8	4.2	4.5	2.3	1.7	0.6	0.7	1.1	1.2	0.7	0.9	1.5
维持菌圃种群和生境 (包括基因库保护)	0.8	1.1	1.6	2.0	3.6	2.7	2.6	3.7	4.3	3.4	2.1	0.5	0.5	0.8	1.1	0.4	0.7	1.2
分解和固定过程及其对土壤质量的影响	0.8	0.9	1.5	2.1	3.9	3.1	3.1	3.5	4.8	1.9	1.2	0.3	0.4	0.9	0.8	0.3	0.5	0.9
通过生物过程调节淡水的化学状况	1.0	1.1	1.3	1.6	2.5	2.3	1.9	2.5	4.0	4.5	3.2	0.6	0.9	0.7	0.8	0.5	1.3	1.0
温度和湿度的调节, 包括通风和蒸腾作用	2.1	2.2	2.5	2.5	3.8	2.9	2.6	3.5	3.5	3.8	3.0	1.4	1.8	1.9	1.7	1.5	1.6	2.3
促进健康活动的生命系统的特点 (主动)	1.6	1.7	2.1	2.4	4.6	2.3	2.3	3.7	4.3	4.0	2.4	1.2	1.1	3.3	2.3	0.9	1.3	1.9
能够开展促进健康活动 (观察) 的生命系统的特点	1.5	1.6	2.4	2.8	4.3	2.4	2.4	3.3	4.0	4.1	2.5	0.8	0.8	2.4	1.8	1.0	1.6	1.7
促进科学研究的生命系统特征	1.0	1.1	1.3	1.1	4.0	2.4	2.5	3.2	4.8	4.1	2.1	0.5	0.9	1.2	1.8	0.7	1.0	1.0
促进教育和培训的生命系统的特点	1.0	1.1	1.3	1.2	4.1	2.3	2.4	3.3	4.7	4.1	2.2	0.6	0.8	1.9	2.6	0.6	1.4	1.0
可带来审美体验的生命系统特征	1.3	1.4	1.9	2.1	4.6	2.4	2.1	3.7	4.8	4.6	2.9	0.9	0.9	1.5	1.9	0.8	1.3	1.5
最大供给服务	1.9	2.7	2.7	2.9	2.9	2.9	2.6	3.0	4.7	3.8	3.1	1.7	1.6	1.5	2.0	0.8	1.9	2.6
最大调节服务	2.1	2.2	2.5	2.5	3.9	3.3	3.1	4.2	4.8	4.5	3.2	1.4	1.8	1.9	1.7	1.5	1.6	2.3
最大的文化服务	1.6	1.7	2.4	2.8	4.6	2.4	2.5	3.7	4.8	4.6	2.9	1.2	1.1	3.3	2.6	1.0	1.6	1.9
对比 (最高评级与最低评级之间的范围)	1.9	2.5	2.3	2.0	3.7	2.7	2.7	3.1	4.0	2.7	2.1	1.4	1.5	3.1	2.2	1.4	1.6	2.5

图中色块说明 评级得分 0~1 (包含) 评级得分 1~2 (包含) 评级得分 2~3 (包含) 评级得分 3~4 (包含) 评级得分 4~5 (包含)

注: 其中评级数值越高, 代表此类LULC能够提供的对应生态系统服务的能力越强。

3



4

图3 按土地利用和土地覆盖等级划分的上海生态系统服务重要性分级^[94] (源于CICES 5.1)
Fig. 3 Graded significance of ES (derived from CICES 5.1) by LULC class for Shanghai

图4 IMECOGIP工具箱的生态系统服务价值评测逻辑架构图
Fig. 4 Logical framework diagram for ES evaluation in IMECOGIP toolbox

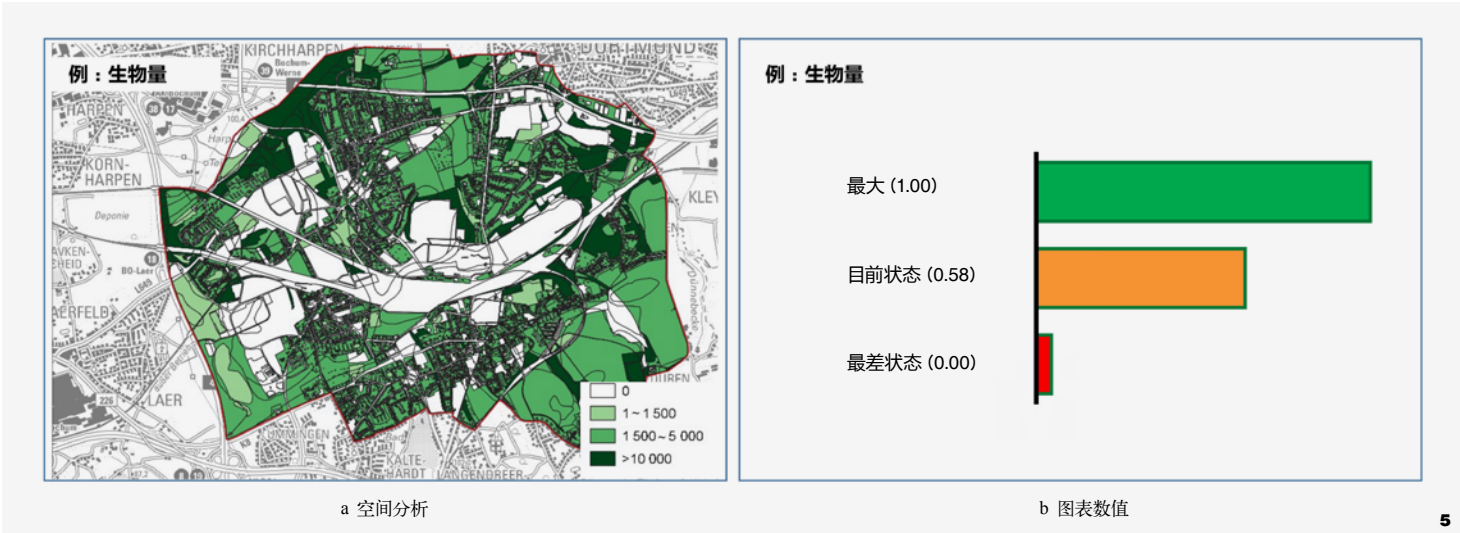


图5 应用IMECOGIP工具箱对德国波鸿地区进行碳固定生态系统服务价值评估的标准化成果展示
Fig. 5 Standardized presentation of the results of carbon sequestration ES evaluation in Bochum, Germany, using IMECOGIP toolbox

3 场景：面向中国乡村生态修复的工具应用

当下中国乡村地区生态系统服务供需研究不仅针对不同类型生态修复工程中土地利用变化对农业产出、水土调节与乡村旅游等生态系统服务能力的影响评价^[35]，而且开始重视对于生态修复工程综合性的生态效益（如生产供给、气候调节、生物多样性水平提高与美学景观服务^[36]等）的精准评估。通过对乡村生态空间的生态系统服务能力进行定性与定量的评估，能够为乡村空间规划、生态保护与修复、土地管理和自然资源利用等决策过程提供参考与指导^[37]。

3.1 基于中国乡村生态空间的LULC分类体系构建

土地利用与土地覆盖类型是IMECOGIP工具箱进行生态系统服务供需评测的基础。IMECOGIP课题组在德国现有的土地利用分类标准基础上，结合国土空间规划、《用途管制用地分类指南（试行）》、《上海市控制性详细规划技术准则（2016年修订版）》，以及《上海市

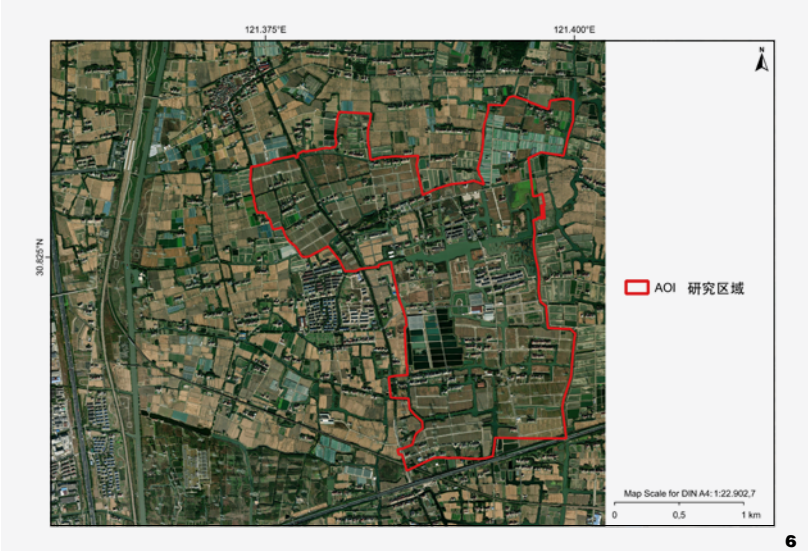
城市总体规划（2017–2035年）》等政策文件，对以上海为代表的乡村生态空间中的用地类型与生物群落类型进行了转译与识别，即将中国乡村用地类型分为了森林、湿地、居住用地等13个大类（表2），并进一步细分为135

个具体的生物群落类型（biotope type）。

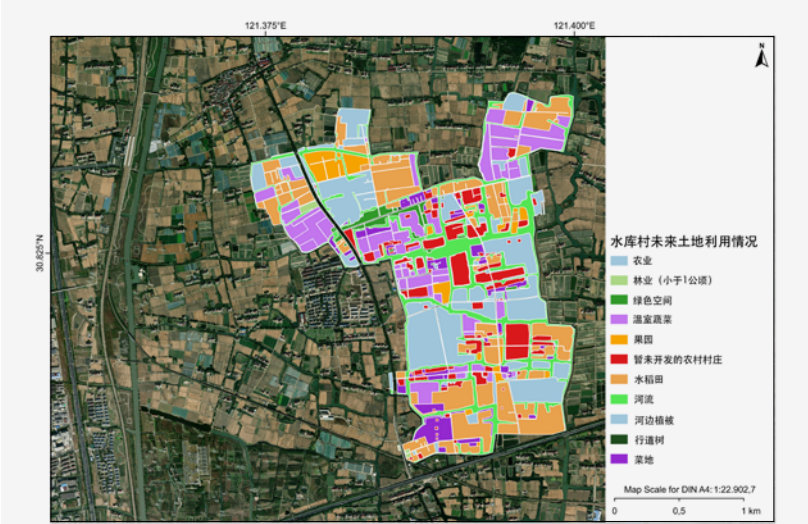
为了验证IMECOGIP工具箱在中国乡村修复场景下的可行性，以上海市金山区漕泾镇水库村为例，在2022年的现状用地与未来规划两个场景下，对全村域范围的生态系统服务

表2 IMECOGIP工具箱针对中国乡村空间的用地类型分类细则
Tab. 2 Detailed LULC classification for China rural areas by IMECOGIP toolbox

代码 Code	用地类型 Landuse	用地描述 Meaning
A	森林	树木面积大于1 hm ²
B	小面积林地	树木面积小于等于1 hm ²
C	湿地	长期或临时淹没的非农用地区，有明显的（半）水生植物植被
D	居住用地	住宅区用地
F	水体	人工或自然溪流/静水
G	农业用地	种植各种作物、水果等的农田
H	闲置用地/棕地	处于不同自然演替阶段的用地
L	工业及矿业用地	用于资源挖采、生产及相关活动的用地
M	公共设施用地（如行政、体育、娱乐和教育设施）	向公众开放的公共服务和便利设施区域
N	交通用地	与交通和移动有关的基础设施和活动区域
O	供应与处理设施用地	资源分配和废物处理区域
R	开发与管理用地	规划增长和控制使用区域
Y	其他用地	其他不属于以上分类的用地类型



6



7



8

价值进行了评测。首先通过遥感影像转译与地块类型识别，得到水库村2022年的现状用地数据(图6)；通过重新定义并分类规划文件中的土地利用数据，得到水库村未来的用地规划图(图7)。

考虑到水库村是一个以农业用地(agricultural land)为主导用地类型的乡村，为进一步细化水库村的农业用地分类，结合目前水库村中实际的作物类型和耕种信息(图8)，得到了在水库村用地分类基础上更精准的生物群落类型数据。同时，通过查阅文献，整理并计算得到了水库村现有作物在一年不同月份中的叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)以及作物系数(Crop Coefficient, Kc)(图9)。这些生态空间信息的补充，大大增强了工具箱在具体农业生产场景下评测各项生态系统服务的准确性与科学性。

通过结合水库村的各项生态基底数据，并运用工具箱提供的生态系统服务评测模型，构建了针对水库村的冷却强度、径流管理以及碳固定的生态系统服务价值评测模型。以评测冷却强度生态系统服务价值为例，此项生态系统服务的定义为，当额外能量输入并导致水汽从充分饱和的1 m³空气中逸出时，该空气冷却到的温度(K)^[38]。使用基于能量平衡的方法^[39]，确定了基于蒸散量(Evapotranspiration, ET)以及作物系数的计算公式，并以环境温度(ambient temperature)、生物群落类型、土壤特征(soil characteristics)、以及初始土壤水分状况(initial soil water conditions)为计算参数，构建了冷却强度生态系统服务价值评测模型。基于水库村2022年现状及规划的用地信息，进一步识别了水库村的生物群落类型，并从上海市气象局获取了水库村的气象数据。以这些数据为模型运算基础，成功实现了对水库村在现状土地利用方案下冷却强度生态系统服务价值的评测(图10)。

图6 上海市水库村2022年用地遥感影像图
Fig. 6 Remote sensing image of Shuiku Village, Shanghai, 2022

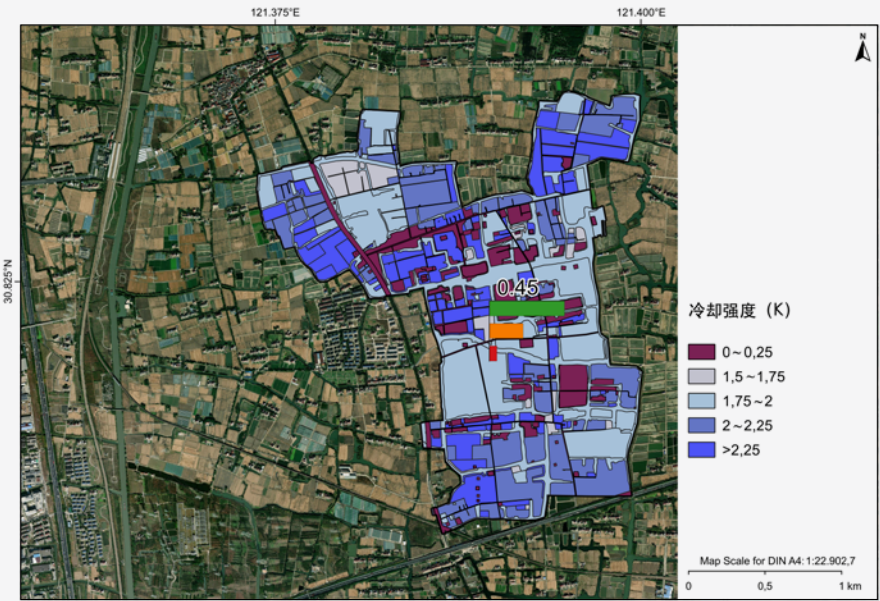
图7 上海市水库村未来用地规划图
Fig. 7 Future landuse plan of Shuiku Village, Shanghai

图8 水库村作物耕种时间
Fig. 8 Crop cultivation time in Shuiku Village

叶面积指数 (LAI)												
Code	作物	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月
GF1	桃树	0.88	0.88	0.88	0.93	2.52	3.70	3.47	3.37	3.69	3.46	2.45
GF2	梨树	0.60	0.60	0.60	0.98	2.37	2.81	2.79	2.63	2.45	2.25	1.45
GA3	西瓜	0.00	0.00	0.48	1.82	2.04	2.52	0.48	1.82	2.04	2.52	0.00
GA4	上海青	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37
GA5	生菜	1.33	1.33	1.93	1.93	2.64	3.37	1.33	1.33	1.93	2.64	3.37
GA6	韭菜	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.43	0.43	0.68	0.75	0.75	0.00
GA7	小白菜	3.37	1.33	1.93	2.64	2.64	3.37	0.00	0.00	1.33	1.33	1.93
GA8	莴笋	2.64	2.64	2.64	1.33	2.64	2.64	2.64	2.64	1.33	1.93	1.93
GA9	茄子	0.00	0.60	1.37	1.37	2.56	2.67	0.00	0.60	1.37	2.56	2.67
GA10	番茄	0.60	0.60	0.60	1.37	2.56	2.67	0.00	0.60	1.37	2.56	2.67
GA11	辣椒	0.00	0.00	0.60	1.37	2.56	2.67	0.00	0.00	0.60	1.37	2.67
GA12	混合蔬菜	1.41	1.23	1.55	1.67	2.39	2.65	0.97	1.15	1.67	1.99	2.33
GC	大棚蔬菜	1.70	1.48	1.87	2.01	2.87	3.18	1.16	1.38	2.00	2.39	2.79

作物系数 (Kc)												
Code	作物	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月
GF1	桃树	0.65	0.65	0.80	1.00	1.00	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	0.85
GF2	梨树	0.65	0.65	0.80	1.00	1.00	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	0.85
GA3	西瓜	0.20	0.20	0.40	0.70	0.70	1.00	0.40	0.70	0.70	1.00	0.20
GA4	上海青	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
GA5	生菜	0.70	0.70	0.85	0.85	1.00	1.00	0.70	0.70	0.70	0.85	1.00
GA6	韭菜	0.70	0.70	0.70	0.70	0.85	0.85	0.85	1.00	1.00	0.70	0.70
GA7	小白菜	1.00	0.70	0.70	0.70	1.00	1.00	0.20	0.20	0.70	0.70	0.70
GA8	莴笋	0.88	0.88	0.88	0.70	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	0.70	0.88
GA9	茄子	0.20	0.60	0.85	0.85	1.05	1.05	0.20	0.60	0.85	0.85	1.05
GA10	番茄	0.60	0.60	0.60	0.90	1.20	1.20	0.20	0.60	0.90	0.90	1.20
GA11	辣椒	0.20	0.20	0.60	0.88	1.15	1.15	0.20	0.20	0.60	0.88	1.15
GA12	混合蔬菜	0.67	0.68	0.78	0.83	1.04	1.04	0.56	0.66	0.86	0.87	0.97
GC	大棚蔬菜	0.67	0.68	0.78	0.83	1.04	1.04	0.56	0.66	0.86	0.87	0.97

9



10

图9 水库村作物对应的叶面积指数 (LAI) 与作物系数 (Kc)
Fig. 9 Crop-specific Leaf Area Index (LAI) and Crop Coefficients (Kc) in Shuiku Village

图10 水库村2022年现状土地利用方案下的冷却强度服务评测
Fig. 10 Evaluation of cooling intensity under the current land use plan in Shuiku Village in 2022

4 总结与讨论

IMECOGIP 工具箱在中国乡村场景中的应用成果表明, 乡村土地利用规划可以结合生态系统服务价值的供需评测, 衔接“多规合一”

改革, 响应覆盖全域全要素、差别管控的国土空间用途管制体系要求, 从而为不同生态空间类型中生态系统服务价值供需失衡的重点区域提出精准化的修复策略。

同时, IMECOGIP 课题通过精准识别不同用地分类体系下的生态系统服务供需要求, 基于同一个标准的LULC分类体系, 将不同应用场景中的用地类型进行了整合和统一。这不仅为不同国家、地区提供了生态数据标准化处理的规则, 打破了工具箱在不同任务需求、项目背景下的使用壁垒, 还解决了由于计算基准不同, 而难以直接进行生态系统服务供需评测结果横向比较的应用技术难点。

在该课题项目的应用测试过程中, 可以看出需要从空间信息格式、评测边界、工作流程等方面进一步完善研究模型在具体地方性研究场景中的应用。由于中德两国在具体的用地数据分类中存在一定差异, 因此在以土地利用规划用地类型作为LULC的基础数据识别过程中, 需要将各类型地块内土地覆被类型细分定义。在研究应用范围方面, IMECOGIP 课题关注了项目范围内的生态系统服务评测, 鉴于生态系统服务流传递过程的复杂性与跨尺度性特征, 对于研究范围外的生态服务影响区域尚未纳入识别和评测边界中。相比于德国的乡村生态修复中较为清晰的专项单元 (如土地利用管理、生态环境治理、乡村景观和生物的多样性维护等^[40]), 中国目前的乡村生态修复项目具有综合治理特点^[41], 不仅包括农田林网、灌溉排水、坡岸防护和水质净化等专项工程, 甚至延伸到乡村人居环境改善中的相关基础设施等综合整治工程, 存在利益主体众多、涉及专业跨度较大和实施时序不一致的工作机制特点, 需要在应用中构建相应的数据标准与结构, 统筹基底调查、生态监测等规范文件, 满足相应的工具应用条件。

注: 图1-图7, 图9-图10由IMECOGIP课题组绘制, 图8由作者绘制。

参考文献

- [1] 彭震伟, 王云才, 高璟. 生态敏感地区的村庄发展策略与规划研究[J]. 城市规划学刊, 2013(3): 7-14.
- [2] 张茜, 李朋瑶, 宇振荣. 基于景观特征评价的乡村生态系统服务提升规划和设计——以长沙市乔口镇为例[J]. 中国园林, 2015, 31(12): 26-31.
- [3] 于法稳. 乡村振兴战略下农村人居环境整治[J]. 中国特色社会主义研究, 2019(2): 80-85.
- [4] 2021_Agroecological_and_other_innovations_ZH_web.pdf[Z/OL]. [2023-11-20]. https://www.fao.org/fileadmin/templates/cfs/Docs2021/Documents/Policy_Recommendations_Agroecology_other_Innovations/2021_Agroecological_and_other_innovations_ZH_web.pdf
- [5] 面向可持续发展的中国农业生态系统创新性转型项目办公室. 农业农村部农业生态与资源保护总站[EB/OL]. (2022-09-27)[2023-11-19]. http://www.reea.agri.cn/stgjxm/202209/t20220927_7900921.htm
- [6] FORGET G, CARREAU C, LE COEUR D, et al. Ecological Restoration of Headwaters in a Rural Landscape (Normandy, France): A Passive Approach Taking Hedge Networks into Account for Riparian Tree Recruitment[J]. Restoration Ecology, 2013, 21(1): 96-104.
- [7] JOSEPH W, KOEBEL J R, STEPHEN G, et al. The Kissimmee River Restoration Project and Evaluation Program, Florida, U.S.A.[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(3): 345-352.
- [8] THEILING C H, JANVRIN J A, HENDRICKSON J. Upper Mississippi River Restoration: Implementation, Monitoring, and Learning Since 1986[J]. Restoration Ecology, 2015, 23(2): 157-166.
- [9] WADE M R, GURR G M, WRATTEN S D. Ecological Restoration of Farmland: Progress and Prospects[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 363(1492): 831-847.
- [10] BENTON T G, VICKERY J A, WILSON J D. Farmland Biodiversity is Habitat Heterogeneity the Key?[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2003, 18(4): 182-188.
- [11] PYWELL R F, MEEK W R, LOXTON R G, et al. Ecological Restoration on Farmland can Drive Beneficial Functional Responses in Plant and Invertebrate Communities[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(1): 62-67.
- [12] JONSON J. Ecological Restoration of Cleared Agricultural Land in Gondwana Link: Lifting the Bar at 'Peniup'[J]. Ecological Management & Restoration, 2010, 11(1): 16-26.
- [13] CONSTANT N L, TAYLOR P J. Restoring the Forest Revives our Culture: Ecosystem Services and Values for Ecological Restoration across the Rural-urban Nexus in South Africa[J]. Forest Policy and Economics, 2020, 118: 102222.
- [14] 高雪媛. 乡村全域土地综合整治与生态修复功能分区研究与实践[J]. 环境生态学, 2023, 5(2): 65-69.
- [15] 杨忍, 刘芮彤. 农村全域土地综合整治与国土空间生态修复衔接与融合[J]. 现代城市研究, 2021(3): 23-32.
- [16] 盛硕, 王云才. 基于生态特征与问题聚类识别的平原农业区乡村生态修复策略——以辽宁省黑山县为例[J]. 中国园林, 2022, 38(12): 20-25.
- [17] 周小平, 冯宇晴, 罗维, 等. 两种生态系统服务价值评估方法比较研究——以四川省金堂县三星镇土地整治工程为例[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1799-1809.
- [18] DONG N, FABRIS L M F, WANG Y, et al. Ecosystem Service Value Evaluation Method for Local-oriented Rural Water Ecological Governance: A Case Study on Shuiku Village in Shanghai[J]. Journal of Chinese Architecture and Urbanism, 2023, 5(3): 1055.
- [19] 袁黛玉, 王蕾, 李晖. 基于生态空间划定的乡村小微湿地修复策略研究[J]. 广东园林, 2023, 45(3): 9-14.
- [20] 任永刚, 张康. 生态设计视野下的乡村振兴研究——洪湖湿地景观生态修复设计[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(5): 137-139.
- [21] YOKOHARI M, BROWN R D, TAKEUCHI K. A Framework for the Conservation of Rural Ecological Landscapes in the Urban Fringe Area in Japan[J]. Landscape and Urban Planning, 1994, 29(2): 103-116.
- [22] 戴月坤. 乡村振兴背景下乡村旅游发展中土地利用效益评价研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- [23] 杨毅栋, 蒋迪刚, 李云娜, 等. 杭州乡村单元生态修复评价与实施路径研究[C] // 人民城市, 规划赋能——2022中国城市规划年会论文集(08城市生态规划). 北京: 中国城市规划学会, 2023.
- [24] STEPNIIEWSKA M. Ecosystem Service Mapping and Assessment as a Support for Policy and Decision Making[J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2016, 44(10): 1414-1422.
- [25] COSTANZA R. Ecosystem Services: Multiple Classification Systems are Needed[J]. Biological Conservation, 2008, 141(2): 350-352.
- [26] 纪然. 基于生态系统服务供需关系的苏南乡村水域空间适应性规划研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
- [27] 郑悦. 北京市典型休闲农业园生态系统服务评估及供需分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [28] 刘滨谊, 陈鹏. 乡村人居环境风貌评价与优化[J]. 中国城市林业, 2020, 18(6): 1-8.
- [29] 马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [30] 汪洁琼, 邱明, 成水平, 等. 基于水生态系统服务综合效能的空间形态增效机制——以峨边田蚕水敏性乡村为例[J]. 风景园林, 2017(1): 82-90.
- [31] International Fund for Agricultural Development (IFAD). The China-IFAD South-South and Triangular Cooperation Facility: Leveraging SSTC for rural development[EB/OL]. (2021-03-24)[2023-11-20]. https://www.ifad.org/en/web/latest/-/the-china-ifad-south-south-and-triangular-cooperation-facility-leveraging-sstc-for-rural-development?p_i_back_url=%2Fen%2Fsearch%3Fq%3Drural%2Bcooperation
- [32] 安德鲁·库帕斯, 黄勇. 促进乡村—城市关系的欧盟政策[J]. 国际城市规划, 2013, 28(5): 10-16.
- [33] ZHAO Y. China - Africa Development Cooperation in the Rural Sector: an Exploration of Land Tenure and Investments Linkages for Sustainable Resource Use[J]. Environment, Development and Sustainability, 2013, 15(2): 355-366.
- [34] ZEPP H, FALKE M, GÜNTHER F, et al. China's Ecosystem Services Planning: Will Shanghai Lead the Way?[J]. Erdkunde, 2021, 75(4): 271-294.
- [35] 刘世梁, 安南南, 王军. 土地整理对生态系统服务影响的评价研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1010-1019.
- [36] 罗维, 易海杰, 李红举, 等. 洋河流域土地利用时空变异及其对生态服务功能价值的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5342-5351.
- [37] PINTO-CORREIA T, KRISTENSEN L. Linking Research to Practice: The Landscape as the Basis for Integrating Social and Ecological Perspectives of the Rural[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 248-256.
- [38] ZEPP H, GESSNER M, GRUENHAGEN L, et al. Modeling the Cooling Effect of Urban Green Spaces: The Neglected Control Variables of 'Soil Moisture' and 'Biotope Types'[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 90: 128137.
- [39] ALLEN R G. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. repr. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2000.
- [40] 干靓, 张立, 董舒婷, 等. 德国市镇建设指导规划及对我国乡镇国土空间规划的启示[J]. 小城镇建设, 2020, 38(12): 12-20.
- [41] 李红举. 全域土地综合整治的新探索[J]. 小城镇建设, 2020, 38(11): 1.