



李千梦,洪秋辰,戴瑶,郝晋珉,艾东. 基于生态系统健康的国土空间生态修复模式研究——以昆明市为例[J]. 中国农业大学学报,2025,30(10):307-317.
LI Qianmeng, HONG Qiuchen, DAI Yao, HAO Jinmin, AI Dong. Study on the restoration model of territorial space ecology based on ecosystem health: A case study of Kunming[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 307-317.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.24

基于生态系统健康的国土空间生态修复模式研究 ——以昆明市为例

李千梦 洪秋辰 戴瑶 郝晋珉 艾东*

(中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要 针对中国高速粗放式城镇化导致国土生态空间遭受严重挤压,逐步逼近生态系统环境承载能力上限的问题,为系统推进国土空间生态修复,以昆明市为研究区域,按照水土保持、生物多样性维护、水源涵养划分生态修复区,构建“生态系统活力-生态系统组织力-生态系统恢复力”评价指标体系,测算昆明市2010年、2015年、2020年生态系统健康状态;并基于健康等级划分4种生态修复模式,根据划分等级提出4个生态修复区的修复措施。结果表明:2010—2015年昆明市生态系统健康状态整体上有显著提升,2015—2020年生态系统健康状态存在变差趋势;依据不同健康等级划分生态维护、干预恢复、辅助再生、生态重建4种生态修复模式,针对4个生态修复区提出针对性生态修复建议。综上,本研究可为基于国土空间本底健康状态针对性确定生态修复模式提供科学依据。

关键词 国土空间生态修复;生态系统健康;生态系统服务价值;生态空间;生态修复模式

中图分类号 X171.4

文章编号 1007-4333(2025)10-0307-11

文献标志码 A

Study on the restoration model of territorial space ecology based on ecosystem health: A case study of Kunming

LI Qianmeng, HONG Qiuchen, DAI Yao, HAO Jinmin, AI Dong*

(College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In response to the severe compression of national ecological space caused by China's extensive and rapid urbanization, which has gradually approached the upper limit of ecosystem environmental carrying capacity, this study systematically advances territorial space ecological restoration by taking Kunming City as the research area. Ecological restoration zones were delineated based on soil and water conservation, biodiversity maintenance, and water source conservation. An evaluation index system of “ecosystem vitality-ecosystem organization-ecosystem resilience” was constructed to assess the ecosystem health status of Kunming in 2010, 2015, and 2020. Four ecological restoration modes were proposed based on health grades, and this study proposed targeted restoration measures for four ecological restoration zones. The results indicated that: From 2010 to 2015, Kunming's ecosystem health significantly improved overall, but a deteriorating trend emerged from 2015 to 2020. Four restoration modes, including ecological maintenance, intervention-based restoration, assisted regeneration, and ecological reconstruction, were classified according to their health grades. The targeted restoration measures were proposed for the four ecological restoration zones. This study provides a scientific basis for determining ecosystem restoration modes based on the intrinsic health status of the territorial

收稿日期: 2025-01-23

基金项目: 昆明市国土空间总体规划(2021—2035年)(4530100HT202101695)

第一作者: 李千梦(ORCID:0009-0008-4550-177X), 硕士研究生, E-mail: qq3234069676@163.com

通讯作者: 艾东(ORCID:0000-0002-1393-8335), 副教授, 主要从事土地利用规划和土地整治相关研究, E-mail: aidong@cau.edu.cn

space.

Keywords ecological restoration of land space; ecosystem health; value of ecosystem services; ecological space; ecological restoration model

伴随中国式城镇化加速,经济发展与城镇扩张过去常以牺牲生态环境为代价,改变粗放发展模式迫在眉睫^[1]。在土地资源紧张的背景下,过往中国式城镇化的粗放扩张^[2],导致生态空间压缩、系统失衡,逐步逼近环境承载极限^[3],且生态修复工程存在多样性保护不足、措施缺乏针对性等问题^[4-5],严重制约可持续发展。为此,国家出台《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》等政策,推进山水林田湖草沙一体化保护和系统化治理。但如何基于区域地理条件,定量评估生态系统健康,精准确定生态修复模式,仍是亟待解决的关键问题。

针对国土空间生态修复模式后续指导,已有研究以问题为导向,提出工程实施方案修复研究区域:田盼等^[6]以茅洲河流域为研究区域,建立指标体系对河流水文、水质、河流地貌、水生生物现状进行评价,根据修复问题的先后形成不同生态系统的修复模式;俞孔坚等^[7]分类分区实施三滩生态修复措施,提出退耕还渔、构建复合农业、打造海绵湿地等工程建议;孙晓玲等^[8]系统梳理中国废弃矿山现状生态问题,明确废弃矿山生态修复的开发利用方向,主要包括地产开发、生态农业等4种;柴丽娜等^[9]构建生态系统服务功能重要性评价指标体系,以高程、水环境等构建生态系统敏感性评价指标体系,共同识别重点保护与修复区域,针对划分的区域,采用辅助再生、生态重建、自然恢复等修复模式;李云鹏等^[10]提出结合受损矿区生态系统的退化程度和现有矿区生态修复技术,将矿区生态系统修复模式分为自然恢复、辅助再生和生态重建3种。

Eggermont等^[11]以实施自然解决方案的生物多样性/生态系统工程水平与生态系统服务提升,将生态修复措施划分为3类:一是充分利用自然或受保护的生态系统,对生态系统实施最低程度的干预;二是修复和管理生态系统,对自然生态系统和景观实施适度的干预,提高生态系统服务价值功能;三是以人工干预方式重构或构建生态系统。周伟奇等^[12]将以上3种措施总结为3种生态修复模式:生态系统的保护、恢复和重建。

自提出“国土空间生态修复”这个概念以来,针

对生态系统健康评价与生态修复格局的研究成果颇丰。然而,本研究通过对国内外文献梳理发现:对于生态修复模式研究仅存在理论及直接提出工程措施层面,与生态系统客观条件联系较为薄弱;此外,对于评估前期生态系统健康状态指导后续生态修复模式研究较少。如何结合区域内自然地理格局及经济发展实际等客观条件,科学评估各区域所承载的生态系统服务价值,准确判断国土空间生态系统健康状态,进而有针对性地确定生态修复模式,这是当前国土空间生态修复亟需解决的关键问题。

昆明市自然资源丰富,是中国生态资源最富集和生态产品生产条件最好的城市之一。但其生态环境仍存在较为严重的问题:一是由于城市经济快速发展,建设用地不断侵占生态用地,生态系统的完整性遭到破坏;二是水资源过度开发、农村面源污染植被破坏等问题严重^[13];三是地质灾害频发,生态环境脆弱。现阶段亟需针对昆明市生态系统存在的问题,实施生态修复措施,保障生态系统的完整性与健康状态。

因此,为给受损生态空间提供科学的生态修复模式,本研究拟以昆明市为研究对象,构建“生态系统活力-生态系统组织力-生态系统恢复力”评价指标体系,探究不同生态修复区域的生态修复模式,为完善与丰富国土空间生态修复模式及实施措施提供借鉴。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

昆明市作为云南省省会,是云南省乃至西南地区生态安全屏障中的重要组成部分,位于102°10′~103°40′E,24°23′~26°22′N,地处亚热带半湿润季风气候区,行政管辖范围内的土地总面积为21 012.92 km²。

1.2 研究方法

1.2.1 计算生态系统服务价值

生物多样性维护功能在维持物种、基因多样性中发挥重要作用^[14]。本研究采用InVEST模型中生境质量模块测度,从而量化区域生物多样性维护

功能^[15]。计算公式如下：

$$Q_{ij} = H_j \times \left(1 - \left(D_{ij}^2 / (D_{ij}^2 + k^2) \right) \right) \quad (1)$$

式中： Q_{ij} 为第*i*个网格中第*j*类土地利用类型的生境质量指数； H_j 为土地利用类型*j*的生境适宜度； D_{ij}^2 为第*i*个网格中第*j*类土地利用类型的生境退化度； k 为半饱和常数，取最大退化度的一半。

水源涵养功能是生态系统通过其特有的结构与水相互作用，能直观反映区域对降雨的调节作用和对降水的重新分配功能^[16]。本研究采用水量平衡方程来计算水源涵养量，计算公式为：

$$TQ = \sum_i (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中： TQ 为水源涵养量； P_i 为降雨量，mm； R_i 为地表径流量，mm； ET_i 为蒸散发，mm； A_i 为*i*类生态系

统面积，km²；*i*为研究区第*i*类生态系统类型；*j*为研究区生态系统类型数。

水土保持功能能够防治水土流失，保护、改良与合理利用水土资源，维护和提高土地生产力^[17]。依据昆明市资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价，将坡度 $\geq 25^\circ$ 且植被覆盖度 $\geq 80\%$ 的森林、灌丛和草地评价为水土保持功能高区，在此范围外，将坡度 $\geq 15^\circ$ 且植被覆盖度 $\geq 60\%$ 的森林、灌丛和草地评价为水土保持功能较高区并赋值^[18]。

1.2.2 划分生态系统服务价值功能分区

利用 ArcGIS 软件分别对生物多样性维护功能、水源涵养功能及水土保持功能进行冷热点分析^[19]，基于 Getis-Ord Gi*统计，计算公式为：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (3)$$

式中：*i*为中心要素；*j*为领域内的所有要素； x_j 为领域内第*j*个要素的属性值； $w_{i,j}$ 为要素*i*和*j*的空间距离；*n*为领域内的要素总数。

1.2.3 构建生态系统健康评价指标体系

为定量测算生态系统健康状态，研究大都以生态系统活力、生态系统组织力、生态系统恢复 3 个方面来表征^[20-21]。计算公式为：

$$HI = V \times O \times R \quad (4)$$

式中： HI 为生态系统健康指数； V 为生态系统活力，描述生态系统的能量输入和营养循环容量^[22]，选取归一化植被指数(NDVI)和植被净初级生产力(NPP)来表征^[23]； O 为生态系统组织力，描述生态系统结构的稳定性，反映生态系统各组成部分之间的相互关系，由景观异质性及景观连通性决定^[24-25]，选取描述景观密度大小及差异的斑块密度(PD)及描述景观形状的形状指数(LSI)来表征景观异质性，选取描述景观聚散性的聚集度指数(AI)、蔓延度指数(CONTAG)及斑块结合度指数(COHESION)和描述景观多样性的香农多样性指数(SHDI)及香农均匀度指数(SHEI)来表征景观连通性； R 为生态系统恢复力，是系统弹性的相对程度。

参考李魁明等^[26]和刘亦晟等^[27]研究，构建生态系统健康评价指标体系，并基于熵权法计算指标基准权重，结果见表 1。

1.3 数据来源

本研究中所采用的土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所研制的全国 30 m 高精度土地利用现状遥感监测数据。该数据包括耕地、草地等 6 个一级类型以及 25 个二级地类，并将原始数据统一为相同投影坐标系(WGS_1984_UTM_Zone_47 N)和地理坐标系(GCS_WGS_1984)。DEM 数据为 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据，来源于中国科学院地理空间数字云(<http://www.gscloud.cn/search>)。NDVI 数据为中国科学院地理空间数据 MODIS 月合成数据，空间分辨率为 30 m。

2 结果与分析

2.1 生物多样性维护、水源涵养及水土保持功能分布

依据生物多样性维护、水源涵养、水土保持三类生态系统服务功能，测算结果见图 1。由图 1(a)可见：生物多样性维护功能分布广泛，而北部东川区生物多样性维护较弱，原因在于矿产资源开采严重形成难以恢复的坑洼，生物难以迁移；滇池流域水质下降明显，水体生物多样性下降严重。由图 1(b)可见：水源涵养功能普遍较弱，且分布不均，仅禄劝县西北部分、石林县东南部分及西山区中部

表1 国土空间生态系统健康评价指标权重
Table 1 Spatial ecosystem health evaluation index weight

要素层 Feature layer	指标层 Indicator layer	说明 Description	权重 Weight	指标正负性 Positive and negative indicator
生态系统活力 Ecosystem vitality	NDVI	NDVI可定量评价植被覆盖及其生长活力	0.584	+
	NPP	NPP反映植物固定和转化光合产物的效率	0.416	+
生态系统组织力 Ecosystem organization	AI	AI表征斑块聚集程度,值越大表示斑块聚集越紧密,反之代表斑块聚集越稀疏	0.057	+
	COHESION	COHESION表征不同土地利用类型的聚散程度,值越大代表连接越强	0.062	+
	CONTAG	CONTAG表征景观不同斑块类型的聚集程度及延展程度,值较大则表示景观中的优势斑块类型之间形成良好的连接	0.101	+
	SHDI	SHDI反映景观在结构及功能上的多样性,当斑块类型增加或各类型斑块所占面积比例趋于相近时,SHDI值增加	0.189	+
	SHEI	SHEI是比较不同景观格局多样性均衡水平的重要指标,当值趋于1时,景观斑块分布的均匀度程度趋于最大	0.161	+
	PD	PD反映景观空间异质性程度以及景观斑块的破碎化程度	0.220	—
	LSI	LSI用于表征景观形状是否规则,当景观中斑块形状不规则或偏离正方形时,LSI增大	0.210	—
生态系统恢复力 Ecosystem resilience	生态弹性度	生态系统恢复力表征生态系统抵御外界风险的能力,并在遭受外界风险时恢复原有结构和功能的能力,多用“生态弹性值”进行计算(参考学者研究 ^[28] ,设定不同土地利用类型的生态弹性度:耕地为0.5;林地为0.9;草地为0.6;水域为0.8;建设用地为0.4;未利用地为0.3)	1.000	+

注:指标为正表示数值越大,生态系统健康状态越好;指标为负表示数值越大,生态系统健康状态越差。
Note: A positive indicator means that the larger the value, the better the health status of the ecosystem. A negative indicator means that the larger the value, the worse the health status of the ecosystem.

呈现高值,其余地方均呈现较低值。由图1(c)可见:水土保持功能分布广泛但也存在地域差异,呈现出北部高于南部,西部高于东部的布局,其中禄劝县、东川区、富民县及寻甸县区域内整体水土保持功能高,而滇池周边区域水土保持功能差。

2.2 国土空间生态修复分区划分结果

本研究利用ArcGIS软件分别对生物多样性维护功能、水源涵养功能及水土保持功能进行冷热点分析,结果见图2。由图2(a)可见:生物多样性维护功能热点区域分布比较广泛,主要聚集在西部及西南部;冷点区域主要集中在滇池流域、其东北部空港经济区、东南部石漠化地区及北部山地。由图2(b)可见水源涵养功能热点区域主要聚集在西北及

东南部分,还有小部分分布在滇池流域周边。由图2(c)可见:水土保持功能热点区域主要聚集在北部区域,分布在东川区及禄劝县;冷点区域主要集中在滇池流域、其东北部空港经济区及东南部石漠化地区。

将生物多样性维护、水源涵养及水土保持功能热点图进行叠加分析,结合昆明市自然地理格局,平滑处理得到昆明市生态系统服务价值功能分区,结果见图3,以便后期根据生态系统提供的不同功能价值测算生态系统健康状态。由图3可见:结合昆明市自然地理格局,依据昆明市生态系统服务价值功能将昆明市划分为以下4个区:北部水土保持修复区、西南部水土保持与生物多样性维护综合修

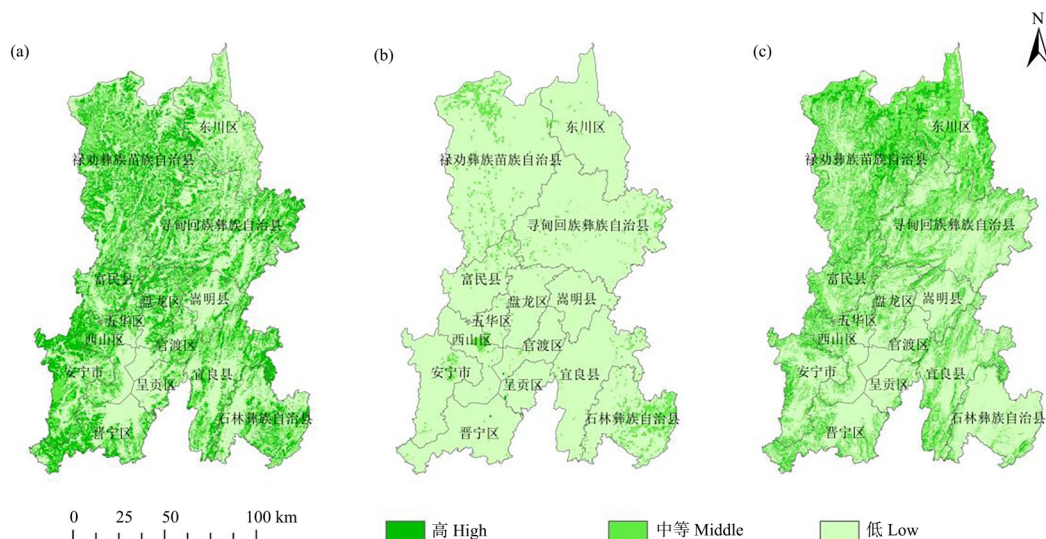


图 1 昆明市生物多样性维护(a)、水源涵养(b)及水土保持(c)功能不同等级区域分布

Fig. 1 Regional distribution of different levels of biodiversity conservation (a), water conservation (b) and soil and water conservation (c) function in Kunming

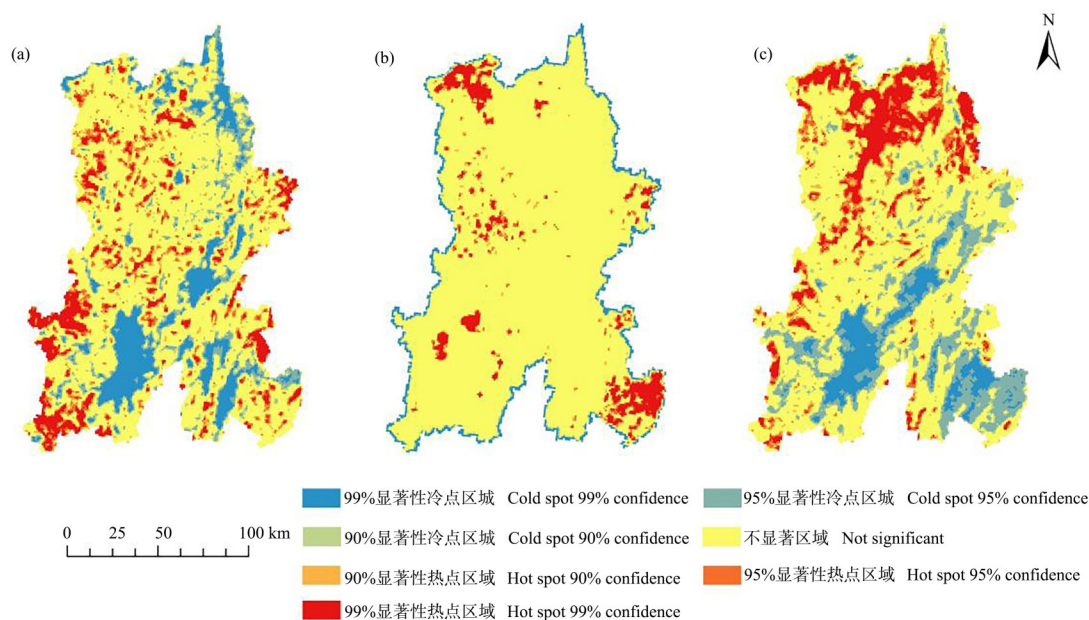


图 2 昆明市生物多样性维护(a)、水源涵养(b)及水土保持(c)功能冷热点分布图

Fig. 2 Cold-hot spots of biodiversity conservation (a), water conservation (b) and soil and water conservation (c) functions in Kunming

复区、中部水源涵养修复区和两翼生物多样性维护修复区。

北部水土保持修复区包含东川区、禄劝县东部及寻甸县北部等区域,面积为 5 332.33 km²,占昆明市总面积的 25.38%。西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区包含富民县西南部分、西山区西北部分、安宁市西部及晋宁区西部等区域,地势平缓,面积为

1 999.96 km²,占昆明市总面积的 9.52%。中部水源涵养修复区包含寻甸县中南部、富民县、嵩明县西部等区域,面积为 9 536.63 km²,占昆明市总面积的 45.38%。两翼生物多样性维护修复区包含禄劝县西部、寻甸县东部、嵩明县东部及宜良县东北部分等区域,以林地与草地为主,面积为 4 206.72 km²,占昆明市总面积的 20.02%。

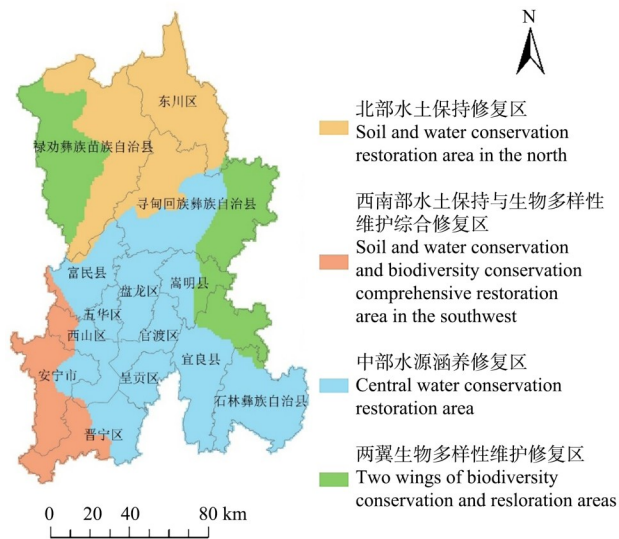


图3 昆明市生态系统服务功能分区图

Fig. 3 Zoning map of ecosystem services in Kunming

2.3 国土空间生态系统健康指数评价结果

依照各分区的特点,采用熵权法对分区内生态系统健康状态进行权重赋值,并基于自然断点法,将健康指数划分为5级,详见表2。可见:依据生态系统健康指数由高到低划分为5个等级。测算网格内生态系统活力、组织力与恢复力各细化指标的数值后,拼合生态系统健康指数,得出昆明市各分区生态系统健康状态(图4)。可见:2015年健康等级

为I的区域相较于2010年显著增多且较为集聚,健康等级为II到V的区域均存在不同程度的减少,表明2010年—2015年昆明市国土空间生态系统健康状态有显著提升;比较2020年与2015年数据发现五年中健康等级为I的区域减少明显,健康等级为II到

表2 生态系统健康指数与健康等级的对应
Table 2 Corresponding relationship between ecosystem health index and health level

健康指数 Health index	生态系统健康等级 Ecosystem health rating
> 0.825	I
$(0.743, 0.825]$	II
$(0.644, 0.743]$	III
$(0.511, 0.644]$	IV
< 0.511	V

V的区域均出现小幅上升。本研究结果表明:相比于2010年,2020年昆明市生态系统健康状态有变好的趋势;近5年生态系统健康状态有略微下滑,且市内斑块间的健康状态分布不均,连通性不够以致斑块破碎严重,在原高健康指数区域内部出现较多低健康指数的零星斑块,导致市内健康指数变差严重。

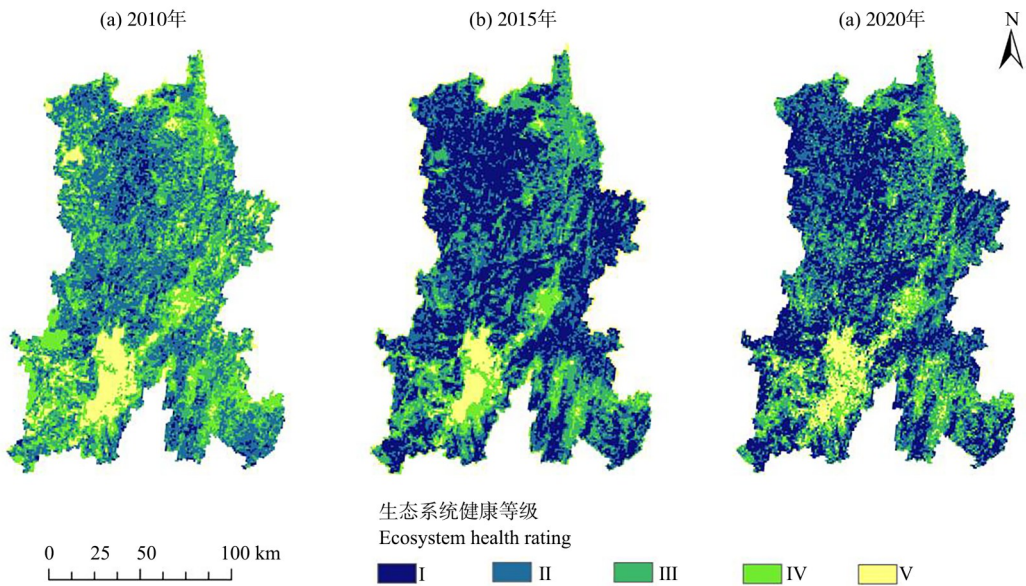


图4 昆明市2010—2020年生态系统健康等级

Fig. 4 Ecosystem health level of Kunming from 2010 to 2020

2.4 昆明市生态修复模式分析

以生态系统健康状态作为不同生态修复模式的选择基础,不同生态健康等级对于生态修复模式的结

果见表 3,可见:以生态系统健康状态的不同等级及自然恢复人工修复的参与程度将生态修复模式划分为生态维护、干预恢复、辅助再生及生态重建。

表 3 生态系统健康等级对应生态修复模式矩阵

Table 3 Ecosystem health level corresponds to ecological restoration model matrix

生态健康等级 Ecological health grade	自然恢复为主 Natural restoration	自然恢复为主人工修复为辅 Natural restoration is the mainstay, supplemented by artificial restoration	人工修复为主自然恢复为辅 Artificial restoration is the mainstay, supplemented by natural restoration	人工修复为主 Artificial repair
I	生态维护			
I+III	干预恢复			
IV	辅助再生			
V	生态重建			

2.4.1 生态维护

生态维护对应生态系统健康等级为I的区域,该区域生态修复到最佳状态,以自然恢复为主,尽量以生态系统本底为支撑,进行维持与保护。

对于北部水土保持修复区,其生态问题为轻度水土流失、采矿导致的土地裸露及植被破坏,可采取的生态维护措施为:一是选择适合本地气候和水文条件的树木种植水土保持林;二是加大对矿山地表植被的复绿。对于西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区,其生态问题为存在小面积水域面源污染、生物多样性维护功能不足,可采取的生态维护措施为:分段清洁流域周边土壤、加大对农田生物多样性的保护。对于中部水源涵养修复区,其生态问题为土壤渗透及蓄水能力有待提高,可采取的生态维护措施为:选择适合本地气候和水文条件的树木种植,减少土壤侵蚀和泥沙输送,有效降低洪水风险。对于两翼生物多样性维护修复区,其生态问题为生物多样性维护功能有待提高,可采取的生态维护措施为:一方面加大力度保护生物栖息地,加强栖息地人为进入的监管,另一方面关注外来生物入侵。

2.4.2 干预恢复

干预恢复对应生态系统健康等级为II及III的区域,该区域生态系统健康状态一般,在自然恢复的基础上要适当增加人工修复,以便恢复到生态系统最佳健康状态。

对于北部水土保持修复区,其生态问题为中度水土流失,且植被覆盖度较低,可采取的干预恢复

措施为:种植水土保持林、农田防护林,种草、建设草场,尽快恢复裸露地表。对于西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区,其生态问题为存在水域面源污染,生物多样性维护功能缺乏,可采取的干预恢复措施为:保护性耕作,生态农业建设。对于中部水源涵养修复区,其生态问题为流域水环境有待提升,且存在植被破坏,可采取的干预恢复措施为:一是加强湿地保护,提高湿地存储雨水径流能力,以便调节水量;二是建立适当的可持续生态系统管理工程,收集雨水,减轻土壤侵蚀,提高土壤肥力。对于两翼生物多样性维护修复区,其生态问题为生物多样性维护功能不足,可采取的干预恢复措施为:进行多树种单独造林工程,保护物种多样性。

2.4.3 辅助再生

辅助再生对应生态系统健康等级为IV的区域,该区域生态系统健康状态较差,仅依靠自然恢复,难以恢复到生态系统最佳健康状态,故以人工修复为主,自然恢复为辅。

对于北部水土保持修复区,其生态问题为重度水土流失,及植被覆盖度差,可采取的辅助再生措施为:人工改良土壤,种植控水固水的适宜树种,治理水土流失。对于西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区,其生态问题为存在大面积水域面源污染,且生物多样性维护功能较差,可采取的辅助再生措施为:一是遏制土壤退化,人工改良已退化土壤,为保护生物多样性和保障生态系统服务;二是建立生态缓冲带,在治理水土流失的同时,维

护生物栖息地。对于中部水源涵养修复区,其生态问题为流域水资源不足,水环境较差,且植被覆盖严重不足,可采取的辅助再生措施为:一方面,加强水资源管理,加强湿地修复,修建功能性人工湿地,辅助物种迁徙;另一方面,搭建城市绿色基础设施,包括绿色屋顶、雨水花园、生物滞留池等,改善地下水供给。对于两翼生物多样性维护修复区,其生态问题为生物多样性维护功能较差,可采取的辅助再生措施为:在生产性土地上开展生物多样性友好管理,例如混农林业、混牧农业、多样化种植、可持续森林管理等,在保护生物多样性的同时,提升栖息地连通性。

此外,对于昆明拥有的两大高原湖泊——滇池与阳宗海,需要重点开展治理,由于人类活动对湖泊水质带来的影响难以通过自然恢复的方式恢复至健康状态,故采取以人工修复为主,自然恢复为辅的方式,推进湿地与河流生态保护修复:一是加强湖泊水生态修复:严控化肥农药的施用,逐步消除近湖区域生产生活污染源;二是加强环湖湿地的生态修复:采取污染治理、水系连通、植被恢复、栖息地修复和外来有害生物防控相结合的方式,对自然湿地进行修复和生态综合整治,提升湿地生态功能。

2.4.4 生态重建

生态重建对应生态系统健康等级为V的区域,该区域生态系统健康状态最差,生态系统的恢复能力破坏严重,自然恢复已不可能恢复到生态系统原本的地类,为阻止生态环境进一步恶化,必须施加人工措施,如将裸露的废弃矿山恢复成建设用地等。

对于北部水土保持修复区,其生态问题为重度水土流失;景观岩石裸露,几乎没有植被覆盖,可采取的生态重建措施为:一是进行水土保持工程,包括建设各种工程设施,如水平沟、鱼鳞坑和梯田等,增加地表蓄水能力,减轻水土流失;二是建设护坡和防护墙,稳定地形,减少水流冲击,阻挡土壤的流失。对于西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区,其生态问题为大面积水域面源污染严重,且生物多样性维护功能差,可采取的生态重建措施为:一方面,建设人工湿地,能够有效地去除水体中的有害物质,改善水质,并为水生生物提供适宜的生存环境;另一方面,适当种植植被,增加地表覆

盖,减少土壤侵蚀,为野生动物提供食物来源和栖息地。对于中部水源涵养修复区,其生态问题为流域水资源缺乏,水环境差,景观岩石裸露,几乎没有植被覆盖,可采取的生态重建措施为:一方面,通过种植吸污能力强的植物,利用植物吸收和降解污染物的能力,减少面源污染对水源的影响;另一方面,通过生态补水措施来增加水量,提高水体的自净能力,加强对水源涵养区和面源污染区域的监测和监管。对于两翼生物多样性维护修复区,其生态问题为生物多样性维护功能差,可采取的生态重建措施为:一是建设绿道、生态桥等廊道,如在主要交通道路及河流周边种植一定宽度的防护林带,重点保护修复高原湖泊的候鸟重要停息地、越冬地和繁殖地;二是推进污染治理生态工程,排除生态阻力障碍,促进生态系统的恢复及生物多样性维护;三是构建高原湖泊缓冲廊道,实施岸堤外50~100 m绿化提升、森林质量提升和人工造林工程。

3 讨 论

本研究发现基于自然地理格局本底资源判断生态系统健康状态,科学确定后续生态修复模式,能保障生态空间可持续利用,实现生态效益、社会效益、经济效益相统一,这与周盼盼^[23]和吴映梅等^[25]研究生态系统健康与生态修复格局的结果相一致。但与赵筱青等^[19]和曾晨等^[28]研究结果存在差异,究其原因,可能是国土空间生态系统健康评价指标体系多基于自然生态系统进行评价,以土地利用数据进行分析,并未考虑生态系统的旅游文化价值,可能导致国土空间生态系统健康评价结果有所误差,在今后的研究中还需多加考虑生态系统的社会价值与经济价值,以期能够更加全面评估国土空间生态系统健康状态。

此外,本研究仍存在一些不足之处:一是所选取的年份有限,尚未对生态修复工程实施的全过程进行监督评价,生态修复工程也会带来生态系统健康状态的变化,根据生态系统修复的不同状态适时修正生态修复模式,长时间监督检验能够提供更完整系统化的国土空间生态修复模式;二是还可以进一步缩小评价单元,精细化生态修复分区及保护修复单元,深入研究更小研究单元的生态修复模式,方便生态修复工程能够更好落地,有针对性地修复受损地块,更好实现国土空间生态修复目标。

4 结 论

本研究以昆明市为例,构建国土空间生态系统健康评价指标体系,针对其健康等级的不同匹配适宜的生态修复模式,并提出具体的生态修复措施。主要结论如下:

1)建立生态系统健康与生态修复模式之间的关联,创新提出“健康—功能—修复模式”的国土空间生态修复研究框架,以自然地理格局本底资源为基础,将不同生态系统健康等级作为生态修复模式的选择基础,为完善及丰富国土空间生态修复模式提供一定借鉴意义。

2)构建指标体系评价昆明市国土空间生态系统健康状态。以生态系统活力、组织力、恢复力构建指标体系,定量评估昆明市国土空间生态系统健康状态。依据生态系统服务价值将昆明市划分为4个生态修复区,分别是北部水土修复保持区,占昆明市总面积的25.38%;西南部水土保持与生物多样性维护综合修复区,占昆明市总面积的9.52%;中部水源涵养修复区,占昆明市总面积的45.38%;两翼生物多样性维护修复区,占昆明市总面积的20.02%。2020年昆明市国土空间生态系统健康等级I的区域相较于2015年健康等级为I的区域减少幅度为19.85%,健康等级为II到V的区域均出现小幅上升。2020年相较10年前,生态系统健康状态存在变好趋势,但近五年生态系统健康状态略微下滑,且市内斑块间的健康状态分布不均,连通性不够以致斑块破碎严重。

3)依据自然恢复与人工修复的参与程度,细化生态维护、干预恢复、辅助再生、生态重建4种生态修复模式。根据不同修复区的生态问题,有针对性地提出相关修复措施:针对水土流失,提出加大破损矿山地表复绿、种植水土保持林、人工改良土壤;针对水域面源污染,提出分段清洁流域周边土壤、搭建收集雨水设备减轻土壤侵蚀、建设生态农业、改良退化土壤;针对水资源供应不足,提出加强湿地修复、搭建绿色基础设施;针对生物多样性维护不足,提出加大栖息地人为进入监管、注重外来生物入侵、种植混农林业、多样化种植等。

参考文献 References

[1] 祁敖雪,杨庆媛,毕国华,李佳欣. 我国三大城市群生态环境与社会经济协

调发展比较研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2018, 43(12): 75-84

Qi A X, Yang Q Y, Bi G H, Li J X. A comparative study on the coordinated development of social economy and ecological environment of urban agglomeration—an empirical study on three urban agglomerations in China[J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2018, 43(12): 75-84 (in Chinese)

[2] 郑伟元. 中国城镇化过程中的土地利用问题及政策走向[J]. 城市发展研究, 2009, 16(3): 16-19

Zheng W Y. Study on the problems of land use and the trend of policies during urbanization in China[J]. *Urban Studies*, 2009, 16(3): 16-19 (in Chinese)

[3] 王建英. 基于生物多样性保护的土地利用结构优化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013

Wang J Y. Optimization of land use structure based on biodiversity protection [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013 (in Chinese)

[4] 周旭, 陈妍, 周妍, 张丽佳. 《IUCN基于自然的解决方案全球标准》下的生态保护修复管理对策研究[J]. 风景园林, 2022, 29(6): 20-25

Zhou X, Chen Y, Zhou Y, Zhang L J. Research on management countermeasures for ecological conservation and restoration under the IUCN Global Standard for Nature-Based Solutions[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(6): 20-25 (in Chinese)

[5] 罗明, 周旭, 周妍. “基于自然的解决方案”在中国的本土化实践[J]. 中国土地, 2021(1): 12-15

Luo M, Zhou X, Zhou Y. Localization practice of “Nature-Based Solution” in China[J]. *China Land*, 2021(1): 12-15 (in Chinese)

[6] 田盼, 吴基昌, 宋林旭, 纪道斌, 李斌, 李亚莉, 冯发堂, 张必昊, 陈一迪, 方娇. 茅洲河流域河流类别及生态修复模式研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 13-18, 24

Tian P, Wu J C, Song L X, Ji D B, Li B, Li Y L, Feng F T, Zhang B H, Chen Y D, Fang J. Research on the types of rivers and ecological restoration models in Maozhou River Basin[J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2021(6): 13-8, 24 (in Chinese)

[7] 俞孔坚, 龚瑶. 基于生态系统服务的黄河滩区生态修复模式探索: 以郑州黄河滩地公园规划设计为例[J]. 景观设计学: 中英文, 2021, 9(3): 86-97

Yu K J, Gong Y. Exploration on ecological restoration model for the improvement of ecosystem services of Yellow River floodplains: A case study of Zhengzhou Yellow River floodplain park planning and design [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(3): 86-97 (in Chinese)

[8] 孙晓玲, 韦宝玺. 废弃矿山生态修复模式探讨[J]. 环境生态学, 2020, 2(10): 55-8, 63

Sun X L, Wei B X. Discussion on ecological restoration model of abandoned mines[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(10): 55-58, 63 (in Chinese)

[9] 柴丽娜, 孙兆海, 张磊, 蒋晓威, 杨倩琪. 丘陵岗地区山水林田湖草系统保护修复模式构建研究: 以贾汪区为例[J]. 环境生态学, 2021, 3(9): 49-56

Chai L N, Sun Z H, Zhang L, Jiang X W, Yang Q Q. Construction study on protection and restoration mode of mountain-river-forest-farmland-lake-

- grass system in hilly land: A case study of Jiawang District [J]. *Environmental Ecology*, 2021, 3(9): 49-56 (in Chinese)
- [10] 李云鹏, 孔胃, 楚储, 蔡永宁. 矿区生态系统演变与修复模式研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(1): 60-66
- Li Y P, Kong W, Chu C, Cai Y N. Study on the evolution and restoration model of mining area ecosystem[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(1): 60-66 (in Chinese)
- [11] Eggermont H, Balian E, Azevedo J M N, Beumer V, Brodin T, Claudet J, Fady B, Grube M, Keune H, Lamarque P, Reuter K, Smith M, van Ham C, Weisser W W, Le Roux X. Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe[J]. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(4): 243-248
- [12] 周伟奇, 朱家蓐. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151
- Zhou W Q, Zhu J L. Review on Nature-based Solutions and applications on urban waterlogging mitigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5137-51 (in Chinese)
- [13] 程圆圆. 昆明城市风险评价与管理对策研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015
- Cheng Y Y. Study on risk assessment and management countermeasures of Kunming City [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)
- [14] Hodson P V. Indicators of ecosystem health at the species level and the example of selenium effects on fish [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1990, 15(3): 241-254
- [15] Rosenberg D M, Resh V H. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates[J]. *Choice Reviews Online*, 1993, 30(11): 30-6159-30-6159
- [16] 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 张萍, 姬兰柱, 邓红兵, 陆兆华. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486-490
- Kong H M, Zhao J Z, Ma K M, Zhang P, Ji L Z, Deng H B, Lu Z H. Assessment method of ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486-490 (in Chinese)
- [17] Rapport D J. What constitutes ecosystem health?[J]. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132
- [18] 王文丽, 张安录, 刘蒙罢. 长江经济带城市土地利用效率与生态系统健康耦合时空格局分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 352-62
- Wang W L, Zhang A L, Liu M B. Analysis on the spatial-temporal pattern of coupling between urban land use efficiency and ecosystem health in the Yangtze River economic belt[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 352-362 (in Chinese)
- [19] 赵筱青, 石小倩, 李取豪, 李益敏, 黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756
- Zhao X Q, Shi X Q, Li Y H, Li Y M, Huang P. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the Karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 736-756 (in Chinese)
- [20] Costanza R, Farber S C, Maxwell J. Valuation and management of wetland ecosystems[J]. *Ecological Economics*, 1989, 1(4): 335-361
- [21] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402
- [22] 孙玮婕, 乔斌, 于红妍, 赵彤, 陈奇. 基于活力-组织力-恢复力的黑河源区高寒湿地景观生态健康评估[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 301-313
- Sun W J, Qiao B, Yu H Y, Zhao T, Chen Q. Ecological health assessment of the alpine wetland landscape in the Heihe River source area based on vigor, organization, and resilience[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(2): 301-313 (in Chinese)
- [23] 周盼盼. 四平市生态系统健康评价及生态修复格局构建[D]. 长春: 吉林大学, 2023
- Zhou P P. Ecosystem health assessment and ecological restoration pattern construction in Siping City [D]. Changchun: Jilin University, 2023 (in Chinese)
- [24] 刘芳锐, 张正栋, 王欣怡, 毛源远, 董剑彬, 黄楚珩, 刘钰坤. 粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2594-2604
- Liu F R, Zhang Z D, Wang X Y, Mao Y Y, Dong J B, Huang C H, Liu Y K. Spatio-temporal variation of ecosystem health and its response to urbanization in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2594-2604 (in Chinese)
- [25] 吴映梅, 李琛, 高彬媛, 王梦娇, 武燕, 郑可君. 高原湖泊城市生态安全格局构建: 以大理市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 8153-8166
- Wu Y M, Li C, Gao B P, Wang M J, Wu Y, Zheng K J. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cites: The case of Dali City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19): 8153-8166 (in Chinese)
- [26] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰. 京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 218-227
- Li K M, Wang X Y, Yao L L. Spatial-temporal evolution of ecosystem health and its influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 218-227 (in Chinese)
- [27] 刘亦晟, 侯鹏, 王平, 朱健. 生态系统水源涵养服务功能定量评估方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 275-288
- Liu Y S, Hou P, Wang P, Zhu J. Research advance on quantitative assessment methods of ecosystem water conservation service functions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 275-288 (in Chinese)
- [28] 曾晨, 程轶皎, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区: 以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3118-3135
- Zeng C, Cheng Y J, Lv T Y. Research on land-space ecological restoration zoning based on ecosystem health: A case study of the urban agglomeration in the middle reaches along the Yangtze River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3118-3135 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介：李千梦，硕士，现就职于深圳市规划国土发展研究中心。硕士毕业于中国农业大学，本科毕业于南京农业大学。本科期间先后获得三好学生、一等奖学金、二等奖学金、国家励志奖学金、第五届全国大学生不动产估价技能大赛校内二等奖及优秀毕业生。硕士期间获得二等学业奖学金。先后参加云南省资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(4530000HT201909019)、昆明市国土空间总体规划(2021—2035年)(4530100HT202101695)等项目。对生态修复领域有浓厚兴趣。



通讯作者简介：艾东，副教授，博士生导师，主要从事农业发展与国土空间规划研究。现任中国农业大学土地科学与技术学院土地管理系党支部书记、副系主任。主要从事国土空间规划和乡村振兴研究，参与主持多项国家与省部级项目，荣获国土资源科学技术二等奖和黑龙江省科学技术三等奖。2015—2019年多次赴德国等地考察乡村规划、产业发展，近年来重点开展省市县各级规划，参与或主持云南省、新疆生产建设兵团、云南昆明市、河北省曲周县等国土空间规划，参与或主持北京大兴区长子营镇北蒲州营村、河北省顺平县小水村等乡村规划。