

李 芹, 王 宇, 李 笠, 等. 喀斯特高原湖泊流域基于自然解决的生态修复方案——以云南九大高原湖泊为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 391-401.

DOI: 10.11932/karst2023y012

喀斯特高原湖泊流域基于自然解决的生态修复方案 ——以云南九大高原湖泊为例

李 芹^{1,2,3}, 王 宇^{1,2,4}, 李 笠⁵, 张 华^{1,2,3}, 王 波^{1,2,3}

- (1. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216;
2. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216;
3. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 4. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051;
5. 北京智城联合土地规划设计有限公司, 北京 100081)

摘 要:喀斯特高原湖泊流域由外围向内可分为山区、丘陵区、平坝区和湖泊 4 个生态地质环境分区。山区主要生态问题是植被退化、生物多样性受损、水土流失、石漠化及地质灾害等; 丘陵区主要是植被破坏、山地开垦过度、建材滥采、地貌景观破坏、污染源点多面广、环境地质问题较多等; 平坝区主要是国土空间承载量过大、水资源短缺及污染负荷巨大、生态系统破坏严重、工程建筑挤占湿地和损毁植被、自然流场改造强烈、水环境质量差等; 湖泊主要是人类活动强度大, 农田、村落等严重侵占湖滨缓冲带生态用地, 导致生境受损, 生物多样性降低, 环湖生态屏障功能衰减或丧失, 水质污染严重等。根据高原湖泊流域生态地质环境分异特征、水循环及物质传输规律、资源与环境条件, 从研究自然演替规律和内在机理出发, 分区评价流域生态功能及适宜性, 揭示主要生态问题, 总结实践经验, 探讨基于自然解决方案的思路与原则, 构建适应高原湖泊流域资源与环境条件和社会现实的生态修复方案。山区以保护保育提升生态功能为主, 丘陵区以人工辅助再生、生态重建提升生态与经济功能为主, 平坝区以生态重建和转型利用以消除生态环境隐患、修复生态和恢复土地功能为主, 湖泊主要开展水质修复和生态重建等。目前, 高原湖泊内完成修复面积 593 hm², 基本实现消除地质安全隐患、防治水土流失、恢复植被 3 大目标任务, 稳定和改善云南省九湖流域生态系统功能, 提升土地利用价值, 维护区域生物多样性。

关键词:生态系统; 喀斯特高原湖泊; 地貌形态; 环境问题; 生态修复; 云南

中图分类号: X171.4; P343.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 03-0391-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

云南高原常年水面大于 1 km² 的湖泊有 30 个, 湖水面积达 1 115.81 km², 总蓄水量约 290×10⁸ m³, 主

体为著名的“九大高原湖泊”。高原湖泊主要发育在喀斯特断陷盆地中, 湖泊流域就是一个完整的盆地单元, 这是其最突出的环境特征。全新世以来, 高原隆升趋于稳定, 高原湖泊普遍进入了退化阶段, 资源

资助项目: 国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”(2016YFC0502500); 云南省地质灾害综合防治体系建设(云财资环[2020]68号)

第一作者简介: 李芹(1978—), 女, 高级工程师, 主要从事水工环及国土空间生态修复研究。E-mail: 1321137393@qq.com。

通信作者: 王宇(1960—), 男, 博士, 正高级工程师(二级), 主要从事水工环及灾害地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2022-10-01

与环境承载力随之降低,生态脆弱性增强。而高原湖泊流域聚集的人口、经济负荷最大,对流域生态破坏严重,湖泊生态退化形势严峻。喀斯特断陷盆地均分布在高原面及其边缘,所产生的生态破坏效应,经地表河、地下河可直接传递和影响下游长江、珠江等大江大河的水环境,因此其生态修复对区域水环境及生态安全意义重大。生态修复主要指致力于恢复与重建在人类活动影响下受到破坏的自然生态系统的各项工作,通过科学调查、系统分析、统筹规划,制订和实施自然恢复、辅助再生、生态重建等措施相结合的山水林田湖草综合修复方案,实施系统修复,使生态系统向良性循环方向发展。目前针对高原湖泊生态修复的研究多关注于各专业具体问题和恢复治理技术的研究,实践侧重于湖泊水体和湖滨带^[1-12],而根据喀斯特断陷盆地生态地质环境分异特征、水循环和物质及能量传递规律、资源与环境条件,基于自然解决方案的高原湖泊流域生态修复方案的研究还较薄弱。这导致高原湖泊流域生态修复的系统性不足、修复区生态服务功能较弱、投入产出效益较低、可持续性较差等问题突出。因此,基于自然解决方案的高原湖泊流域生态修复思路、原则、措施和方案的研究是非常必要和迫切的。

1 高原湖泊流域生态地质环境特征

1.1 喀斯特断陷湖盆生态地质环境分区

山地、丘陵、平原、河湖等地貌类型是其形成区域地层构造背景、地壳演化过程及内外动力地质作用特征的综合反映,对水土资源形成及运动、贫富状况、生境与生态特征起着最为直接的控制作用,并且与重大生态问题的形成及分布相关性突出,对当地人居聚落格局、产业结构、交通水利、文化教育等经济社会形态与发展水平同样有着明显影响,同时也是最直观和便于识别的生境因子。就最基本的生境要素而言,地表岩土分布状态及特性是生境形成的物质基础,在不同的地貌类型区间变化明显,盆地外围山区基岩大面积裸露,山区与平坝的过渡地带丘陵台地区基岩被土层半覆盖,盆地底部平坝区土层几乎全覆盖。不同的岩土基础可能形成物质成分、结构、厚度和分布、水肥性状不同的土壤,其适宜生长的植物种类不同,动物生存所需食物、水、隐蔽条件不同,而人类生产生活状态自然也不同。水循环

过程主要因地貌类型的区间变化影响而形成了补给、径流、排泄分区,不同的区域地表水和地下水的形成、运动、汇集及赋存形态、贫富程度也不同。山区是主要水源区,径流垂向漏失现象突出,严重干旱缺水;丘陵台地区河溪及地下溶洞管道流较发育,季节性干旱缺水;平坝区径流汇聚,雨季发生局地内涝;湖泊区则水质问题突出。不同地貌类型区生态问题的产生及发展必然存在一定的差异及不同的规律,治理成效悬殊。山区基岩大面积裸露,石漠化严重,治理效果差;丘陵台地区基岩被土层半覆盖,石漠化较严重,治理效果较好;平坝区土层几乎全覆盖,除了少量残丘、孤峰,极大部分无石漠化;湖泊污染负荷集中,治理困难,等等。因此,地貌类型是生态环境地质分区最佳的标志^[13-14]。

以地块断陷为主导,侵蚀及溶蚀共同作用形成的喀斯特断陷盆地,由里到外不同成因和组合形态的地貌呈现环带状的分布特征,总体地势由低平递增至高耸,地形切割由浅到深,地貌分布和变化规律性明显。根据喀斯特断陷盆地地貌类型的区间差异及变化规律,由外向内将盆地划分为:山区、丘陵区、平坝区和湖泊4个生态地质环境分区(图1)。湖盆外围山区主要呈侵蚀、溶蚀中山及古高原面和侵、溶蚀台地形态;丘陵区主要呈侵蚀、溶蚀丘陵、垄岗、槽谷、冲洪积台地及扇地形态;平坝区则主要为冲湖积平原、低阶地及各类湿地展布;湖泊位于湖盆最下游,湖滨多为陡崖或浅滩及沼泽^[15-16]。喀斯特断陷盆地由外围山区、丘陵区、平坝区递降到湖泊区,地表水、地下水由高往低径流汇集到湖泊,湖泊外围任何生态破坏引起的不良环境效应均由径流直接传递到高原湖泊,故应以盆地流域为单元系统地进行生态修复。

1.2 高原湖泊流域生态适宜性评价

生态适宜性是在一个具体的生态环境内,生态环境要素为其中的生物群落所提供的生存空间的大小及对其正向演替的适合程度。对其进行科学合理的评价,是生态修复规划部署的前提。本文对“九大高原湖泊”(表1)生态适宜性进行了初步评价。

此次评价依据地理国情坡度分级标准,结合云南省坝区范围线,按 $\leq 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 25^\circ$ 、 $> 25^\circ$ 将流域划分为湖盆外围山区、丘陵区和平坝区三个区域,根据云南省资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价

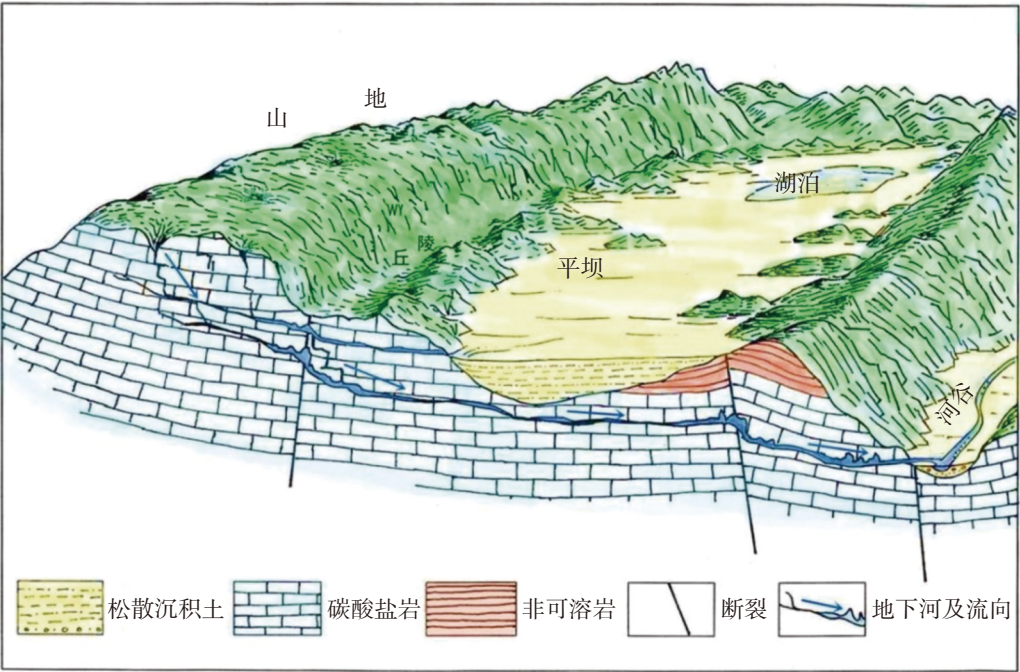


图 1 喀斯特断陷湖盆生态地质环境分区概化图

Fig. 1 Schematic drawing of the zoning of ecological geological environments in karst depression of lake basins

表 1 云南省九大高原湖泊基本情况

Table 1 Basic information of the nine plateau lakes in Yunnan Province

名称	湖泊面积/km ²	平均水深/m	储水量/10 ⁸ m ³	湖面高程/m	流域面积/km ²
泸沽湖	57.2	38.4	21.17	2 692.2	247.7
程海	74.1	25.7	19.79	1 501.0	318.3
洱海	252.0	10.8	29.59	1 966.0	2 565.2
滇池	309.0	5.3	15.60	1 887.4	2 920.0
阳宗海	31.0	20.0	6.17	1 770.5	192.0
抚仙湖	216.6	95.2	206.20	1 722.5	674.7
星云湖	34.7	6.01	1.84	1 723.4	371.1
杞麓湖	37.3	4.0	1.83	1 796.6	354.2
异龙湖	31.0	2.9	1.16	1 414.2	360.4

成果资料(数据时间均为 2019 年)^[17],开展流域生态系统服务功能重要性和生态脆弱性评价,集成得到生态保护重要性,以识别九大高原湖泊生态保护极重要和重要区域分布及面积(表 2,图 2)。

评价结果表明:外围山区虽未直接相邻湖泊,但

从水源涵养、水土保持、生物多样性维护等生态功能上,都对高原湖泊有重大影响,同时由于山高坡陡,谷深流急,地质环境复杂脆弱,生境恢复稳定性差,一经破坏难以还原,就山区而言,生态保护极重要区占比最大。丘陵区生态保护重要区占比最大。平坝

表 2 云南省高原湖泊流域生态适宜性评价表

Table 2 Evaluation of ecological suitability of plateau lake basins in Yunnan Province

适宜区	占流域面积 比例/%	山区		丘陵区		平坝区	
		面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
生态保护极重要区	28.84	943.29	42.61	385.85	17.43	884.67	39.96
生态保护重要区	37.99	649.81	22.31	1 430.96	49.12	832.30	28.57
生态保护一般重要区	33.21	370.62	14.54	564.43	22.14	1 614.64	63.33

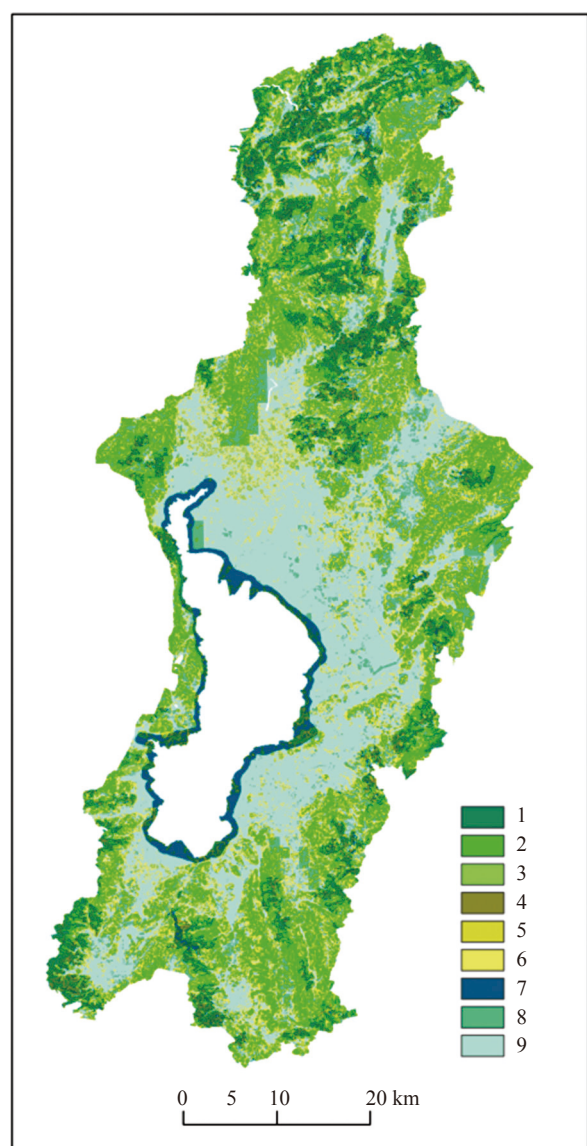


图2 滇池流域生态适宜性分区略图

1-湖盆外围山区生态极重要区 2-湖盆外围山区生态重要区 3-湖盆外围山区生态一般重要区 4-丘陵区生态极重要区 5-丘陵区生态重要区 6-丘陵区生态一般重要区 7-平坝区生态极重要区 8-平坝区生态重要区 9-平坝区生态一般重要区

Fig. 2 Sketch map of the zoning of ecological suitability in Dianchi lake basin

区中因包含湖体,生态保护极重要区比例高于丘陵地区,生态保护一般重要区占比最大,达50%以上,其次是生态保护重要区。

2 高原湖泊生态现状及问题

2.1 高原湖泊生态现状

在九大高原湖泊中,流域单位人口和经济负荷较轻的泸沽湖、抚仙湖生态保护和修复效果较好,水

质处于Ⅰ、Ⅱ类水平。其他湖泊生态破坏和退化均较严重,保护和修复困难。其中,滇池流域生态系统的复杂多样性、问题的种类及严重性最具代表性。滇池流域内自然生态系统可包括森林生态系统、湿地生态系统、河流生态系统、农田生态系统、城市生态系统和湖泊生态系统。其中森林面积 $12.51 \times 10^4 \text{ hm}^2$,森林覆盖率为41.71%,主要分布于北部盘龙区、南部晋宁区,多涉及水源保护区与自然保护地;呈现由湿润、半湿润型向干旱贫瘠型退化的趋势,针叶林占总面积的73.4%,阔叶林仅占3.6%,其余为经济林和果木林,流域森林植被总面积及总质量不高,植被存在明显次生化,景观差,生物多样性降低等问题。滇池流域湿地面积达 $1\,218.66 \text{ hm}^2$,主要分布在滇池周边,近年来陆续建成昆明捞渔河国家湿地等十多处环湖湿地,这对提升生态环境质量,有效保护生物多样性起到了积极作用,但在配水系统、运营管理、监测手段上仍有不足。水系由周围群山沟谷呈向心状注入滇池,主要入湖河流有35条,皆源近流短,根据河流水体功能定位,用水域岸线自然状况、生态流量满足程度、水质优劣程度、水体自净能力等11项指标进行评价,据《滇池流域国土空间保护和科学利用专项规划(2021-2035年)》13%河流处于健康状态,74%河流处于亚健康状态,13%河流处于不健康状态。滇池流域农田生态系统总面积有 $3.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占流域面积的12.63%。农业生产以花卉和蔬菜种植为主,农业生产大量施用农药化肥,2020年单位耕地面积施肥量为 $1\,021.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于国家平均水平的 $643.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产生大面积的农业面源污染。滇池流域城市生态系统主要分布在环滇池北部、东部和南部区域,总面积占滇池流域面积的22%,主要为次生和人工植被,城镇生活污染是水质不能稳定达标的主要原因之一。总体来说,滇池流域生态系统退化,导致生态系统中各类群内部的生态位补偿效应减弱,生态系统结构和功能的稳定性降低。

2.2 高原湖泊生态问题分析

2.2.1 水资源短缺及污染负荷巨大导致水质恶化

高原湖泊流域产流量有限,山地丘陵区径流流失严重,水资源调节功能弱,干旱频发。例如,滇池流域多年平均自产水量 $5.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,到2013年跨流域调引水量达到 $8.89 \times 10^8 \text{ m}^3$,但人均水资源量也仅

为 $393 \text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$, 约为全国平均水平的 19%。采矿、地下工程疏排水导致地下水位下降、含水层疏干, 部分泉流量减小或断流加剧了水资源短缺。例如, 流域北部的翠湖九龙池泉群是滇池水源之一, 因地下工程排水和打井取水影响而断流^[18]。广泛的废水、废渣对水环境的污染严重^[19]。2008 年 6 月阳宗海砷污染, 就是企业生产的废水、废渣通过地表河沟直接排放, 溶隙、洼地渗入含水层, 雨水淋漓渗入三种方式所造成, 砷含量最高的谭葛营湖中下降泉水, 砷含量为 $29.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20]。而坝区的土壤污染通过地表水、地下水淋滤、径流迁移污染湖泊^[21]。

2.2.2 生态系统破坏导致生态服务功能衰减

高原湖泊流域地质环境脆弱, 水芦苇、水葫芦等耐污性水生植物大量生长繁殖, 原生土著物种的生存受到严重影响, 导致生物多样性受损。在不合理的人类活动和自然因素作用下, 植被损毁、覆盖率降低、退化, 植被涵养水源和水土保持的功能降低, 水土流失、土壤涵养水源能力降低等生态环境问题严重, 山地地质灾害多发, 石漠化发育造成严重的生态破坏等问题。2005 年滇池流域水土流失总面积为 141.64 km^2 , 中度和强度水土流失主要分布于外围山区和丘陵区^[22-23]。滇池流域分布有建筑石料 16 类 220 个历史遗留矿山, 开采方式以露天开采为主, 矿山开采损毁土地达 $1\,761.09 \text{ hm}^2$ 。湖盆外围山区地质灾害发育, 以滑坡为主, 滇池流域地质灾害隐患点约 210 处, 洱海流域地质灾害隐患点 190 余处, 山区沟口泥石流较发育。根据第三次全国国土调查数据, 滇池流域范围内 0.88 万 hm^2 林地还处于裸露状态, 2.09 万 hm^2 退化林需要修复, 0.86 万 hm^2 森林需要抚育, 0.18 万 hm^2 林地需要封山育林, 林草生态保护修复需求迫切。

2.2.3 国土空间承载量过大, 制约生态修复效果

由于经济社会的不断发展, 建设用地、工矿用地等生活生产用地占比大, 滇池流域尤其明显。根据第三次全国国土调查, 滇池流域人类高度开发的土地面积占 41.65%, 林地和草地占 45.99%, 水域及水利设施用地占 12.35%, 生态空间严重不足。城镇化建设挤占了流域内维持自然生态更新的空间, 湖泊河流水环境被破坏, 流域生态功能退化。高原湖泊湖滨带地势相对平坦, 房地产、旅游业等均有挤占开发生态廊道现象。人口密度的快速提高, 旅游、房地

产开发所带来的污染负荷增长, 使流域水环境保护压力剧增。湖滨湿地严重破坏, 生物物种急剧减少, 水生与湿生植物由深水区、浅水区向湿地、陆地逐步消亡, 浮游动物、螺贝类底栖生物明显偏少, 土著鱼类濒危或消失。根据卫星及无人机遥感影像显示, 20 世纪 80 年代滇池水生植物覆盖率为 12.60%, 而 2019 年占全湖水域面积的 3.77%, 下降 70%。

3 高原湖泊生态修复实践

高原湖泊生态保护和修复已有 20 多年的历史^[24], 积累了不少好的经验, 也存在诸多问题, 对其分析总结, 是构建基于自然解决的生态修复方案的必要环节。

3.1 高原湖泊生态修复概况

从 20 世纪 90 年代至 2017 年, 高原湖泊的治理主要围绕湖泊开展水质污染治理, 实施点源污染治理、环湖截污、环湖生态及水循环系统保护与重建等。2017 年至今, 在总结前期治污的基础上, 湖泊水质治理的观念逐渐调整为全流域范围的保护修复。在生态问题诊断的基础上, 划分保护修复单元, 布局修复工程子项目。湖盆外围山区、丘陵区一般划分为水源涵养与生物多样性保护修复单元, 主要布局林草、矿山生态修复、石漠化治理等项目(山上); 平坝区一般划分为农业生态系统保护修复单元, 主要布局生态型的土地整治及农业农村面源污染综合治理项目(山下)、入湖河流水生态环境保护 and 修复项目(岸上); 湖滨区一般划分为湖滨缓冲带生态廊道保护修复单元, 主要布局农业产业结构调整、湖滨湿地及生态廊道建设工程(岸下), 同时严格管控建设用地。主要做法有:

(1) 在山区和丘陵区部署封山育林自然修复措施, 辅于人工措施, 以恢复和稳定流域外围山区生态及生物多样性、增强水源涵养功能、减轻或消除水土流失及地质灾害隐患, 维护自然生态系统的完整性、原真性;

(2) 在丘陵区和平坝区部署生态重建、转型利用等措施, 以消除地质环境隐患、重建生态环境和恢复土地功能, 提升土地利用价值;

(3) 在平坝区采取生态重建或转型利用等措施, 消除或阻断城乡生活污染源及平坝区农业面源对湖泊水质的污染, 同时考虑湖泊流域生态修复的社会属性, 拓展生态修复的经济属性, 调整优化土地利用

结构,进一步优化“三生空间”布局;

(4)湖滨地带依托现有脉络,保护生态廊道,实施河湖连通、生境修复等,形成森林、农田、湿地、河湖等完整的生态网络;

(5)城镇建设用地秉持高质量、合理布局,优化存量,集约利用原则。城镇建设发展边界确保符合城镇开发边界与生态保护、永久基本农田保护红线,同时合理避让生态脆弱区域与用地不适宜地区。

3.2 实施效益评价

云南省针对高原湖泊实施的国土绿化、天然林保护、草原生态修复、公益林建设、石漠化治理、湿地与河湖保护修复、生物多样性保护、土地综合整治、水土保持、矿山地质环境治理等重点生态工程,取得了显著成效。九大高原湖泊中的抚仙湖、泸沽湖水质稳定保持Ⅰ类,洱海、程海、阳宗海水质保持稳中向好,滇池、星云湖、杞麓湖、异龙湖富营养化水平持续降低。其中2020年滇池水质达到1988年建立滇池水质监测数据30年以来的最好水平^[25]。

抚仙湖是云南第一个国家立项支持的以盆地流域为单元,以基于自然解决方案的理念开展生态修复的高原湖泊,修复项目在2020年已基本完成。通过生态修复,抚仙湖流域生态环境持续改善,2020年与2015年水质指标相比,高锰酸盐、化学需氧量、氨氮、营养状态指数分别下降了13.3%、41.2%、40.0%、1.0%,透明度上升了18.6%^[26];通过用地结构优化,流域内生态用地和建设用地实现“一增一减”,恢复湿地2800余亩,建成湖滨缓冲带7400余亩,生物多样性明显增加,入湖河流径流区森林覆盖率和生态承载力显著提高。

3.3 经验及问题

云南省高原湖泊流域生态修复成效初显,初步扭转了生态系统退化趋势。主要经验有:(1)修复思路从单点示范向区域系统治理转变;(2)统筹考虑流域的完整性、生态系统的关联性,工程实施范围不仅限于重要生态空间,还包括与之关联的流域空间,在国土空间开发利用格局和用途管制下分区分类开展生态保护修复,体现整体保护和系统修复原则;(3)重视各生态系统要素之间的协调性和整体性,综合开展山水林田湖草等各类自然生态要素的保护和修复;(4)实行多学科、多领域技术整合,综合运用保护保育、自然恢复、辅助再生、生态重建等修复模式,提升综合治理的成效;(5)按照“以块为主,条线结合”

的思路,提出统筹整合各类生态保护修复子工程 and 项目,形成对流域的一体化保护和修复合力,在提升生态效益的同时兼顾社会效益和经济效益,逐步实现人与自然是和谐共生。

现存主要问题为:(1)以流域为单元、加强源头保护和治理的力度不够,体现在针对湖泊治理方面投入较多,山地丘陵投入较少;(2)对资源与环境和生态变化规律认识不足,急于求成,人为的生物和工程措施多,自然修复措施少,自然的良性演替和繁衍差,后期维护工作量大,生态效益的可持续性较差。

4 基于自然解决的生态修复方案构建

基于自然解决方案的理念、思路、方法都强调生物多样性的保护、采用近自然的方法、强调过程导向、自然力量主导等^[27-29]。

4.1 基本概念、思路与原则

4.1.1 尊重自然、顺应自然的理念

高原湖泊的保护修复应利用现有的森林、农田、湿地、河流、城市、湖泊生态系统,利用本地物种,所采取的措施可以是完全绿色的(仅包括生态系统要素),也可以是混合的(结合生态要素与工程措施),但要从原来的“人类引导、自然助力”转向基于自然的解决方案(NbS)提出的“自然引导、人类助力”,给予自然休养生息的时间,让它按照自然规律进行自我修复,最终达到让自然主导发挥作用。

4.1.2 认识自然、遵循规律的思路

开展高原湖泊生态修复要经过全面、科学的调查,充分了解区域自然地理、生态地质环境条件,摸清生态系统内在机理和演替规律,准确识别和诊断生态问题,选用的修复模式和治理措施要顺“势”而为,要适应本地资源与环境条件和社会现实,维护生物多样性,促进生态系统正向演替。

4.1.3 师法自然、系统修复的规划

坚持以流域为单元,充分考虑流域生态环境的分异和分区特征、生态适宜性,聚焦区域自然禀赋,依据生态系统内各生态要素的内在关联性,统筹规划,实行整体保护、系统修复、综合治理。

4.1.4 因地制宜、综合治理的方案

根据流域资源与环境条件、社会现状及其变化规律,经科学调查、系统分析、统筹规划,制订和实施综合修复方案,开展系统修复。以问题为导向,采用适宜的自然恢复、辅助再生、生态重建、转型利用等措施,提高修复的科学性、针对性。按照国土空间规划和管控要求,因地制宜开展修复,切实解决问题,实现生态良性循环。

4.1.5 良性循环、可持续发展标准

高原湖泊作为人口密集的经济活跃地区,其保护修复应坚持 NbS 准则中提出的“经济可行、适应性管理及持续主流”标准。高原湖泊基于自然解决的保护修复方案,不仅要考虑自然环境的恢复、土地利用价值的提升,还要将生态修复与绿色发展、循环经济、绿色产业相关联,使修复对象从自然要素转向社会-生态要素,使修复目标从生态系统结构与功能优化扩展到人类生态福祉的提升。

4.1.6 激励机制、长效的政策保障

建立健全激励机制,由政府主导,职能部门协同配合,针对生态修复中耕地和建设用地指标流转挂钩、产权关联、资源利用、碳排放指标交易、林木采伐、土地出让、财税支持、金融扶持等方面,制订切实可行的激励机制;积极探索市场化发展机制,鼓励社会资本参与生态修复全过程;搭建信息服务平台,加强宣传引导等。

4.2 修复方案构建

根据高原湖泊的实际,以系统科学和基于自然解决方案的理论为指导,在总结经验和分析问题的基础上,遵循上述原则构建高原湖泊生态修复一般方案(表 3)。

以喀斯特断陷湖盆流域为单元,在生态系统详细调查研究,精准识别盆地生态地质环境分异特征、水循环及物质传输转换规律、资源与环境条件及社会现实、问题的特征及成因、流域生态系统演替趋势和生态保护修复需求的前提下,遵循自然规律和生态系统内在的演化机制,统筹规划,以解决生态问题、改善生态环境质量为基础,以提升生态功能和生物多样性为目标,全面部署山水林田湖草一体化保护修复。湖盆外围山区、丘陵区以保护和恢复涵养水源、水土保持、生物多样性维护为主,平坝区以国土综合整治及污染源治理为主,在湖滨带以构建生态廊道、湿地修复为主,湖泊以水质修复和生态恢复重建为主等(图 3)。

5 结语与建议

- (1)高原喀斯特断陷盆地汇水范围即为湖泊流域。盆地地表水、地下水流由外围高中山区、丘陵区、平坝区汇集到湖泊内,湖泊外围任何生态破坏引起的不良环境效应均由径流直接传递到湖泊,应以盆地流域为单元系统进行生态保护和修复;
- (2)高原湖泊主要生态问题为水资源短缺及污染负荷巨大导致水质恶化;生态系统破坏导致生态

表 3 高原湖泊流域生态修复方案基本构架
Table 3 Basic framework of the ecological restoration scheme for plateau lake basins

生态地质环境分区	地貌组合形态	生态与经济功能	主要生态问题	修复措施
山区	山岭台面深谷	以涵养水源,保持水土及生物多样性等生态功能为主,部分矿产和能源开发	植被退化、生物多样性受损、水土流失、石漠化及地质灾害	保护保育、自然恢复
丘陵区	丘陵台地浅谷	生态屏障、水土保持、水资源调蓄、产业开发与休闲旅游等生态与经济功能并重	植被破坏、山地开垦过度、建材滥采、地貌景观破坏、污染源点多面广、环境地质问题	人工辅助再生、生态重建
平坝区	平原阶地塘沼	以水土资源高效利用,城镇建设、经济社会发展、湿地恢复重建、缓冲人为及自然危害的影响等经济功能为主,兼及生态功能	国土空间承载量过大、水资源短缺及污染负荷巨大、生态系统破坏严重、工程建筑挤占湿地和损毁植被、自然流场改造强烈,水环境质量差	生态重建、国土综合整治、转型利用及污染源治理
湖泊区	边滩陡崖湿地及湖泊水域	缓冲隔离带功能、生物多样性及生境保护功能、护岸功能和经济美学价值	人类活动强度大,农田、村落等严重侵占湖滨缓冲带生态用地,导致其生境受损,生物多样性降低,环湖生态屏障功能降低	构建生态岸坡、生态廊道,消除生境破碎化的胁迫因子

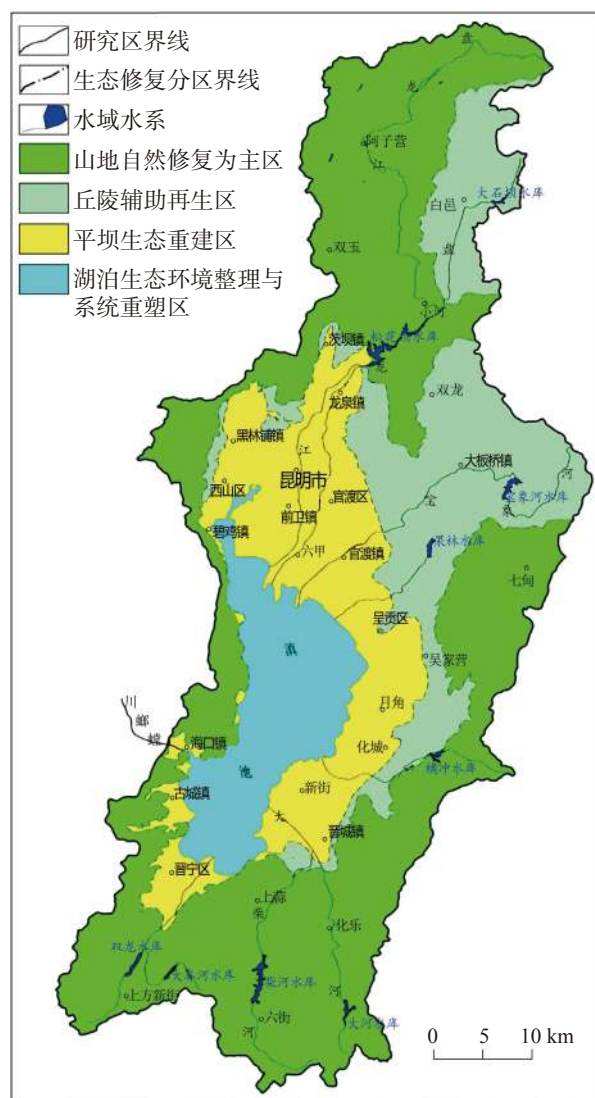


图3 滇池流域生态修复分区略图

Fig. 3 Sketch map of the zoning of ecological restoration in Dianchi lake basin

服务功能衰减;国土空间承载量过大严重制约生态保护和修复;

(3)高原湖泊流域生态修复应施行基于自然的解决方案,根据流域生态地质环境分异特征、水循环及物质传输规律、资源与环境条件,经科学调查、系统分析、统筹规划,制订和实施综合修复方案,开展系统修复;

(4)修复方案构建应尊重和顺应自然,山区以保护保育提升生态功能为主,丘陵区以人工辅助再生、生态重建提升生态与经济功能为主,平坝区以生态重建和转型利用以消除生态环境隐患、修复生态和恢复土地功能为主,湖泊主要开展水质修复和生态重建等;

(5)在基于自然解决方案的同时,滇池、洱海、抚仙湖流域周边人口集聚且第三产业发展迅速,应结合优化产业布局来实施;泸沽湖流域地处乡村地区,人口密度较低且以旅游业为主,自然修复方案应结合生态环境、旅游开发与民族文化保护间的平衡来实施;程海、阳宗海面临着水资源严重短缺的现状,自然修复的方案应结合湖泊下游灌溉高效节水技术实施;杞麓湖、异龙湖、星云湖流域农业面源污染严重,自然修复的方案应结合调整产业结构来实施,以提升高原湖泊水生态环境质量。

参考文献

- [1] 郑丙辉, 彭嘉玉, 胡小贞, 储昭升, 庞燕, 王丽婧, 徐晓梅, 何佳. 2017年滇池外海水质异常下降原因及对策[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(5): 465-472.
ZHENG Binghui, PENG Jiayu, HU Xiaozhen, CHU Zhaosheng, PANG Yan, WANG Lijing, XU Xiaomei, HE Jia. Causes and countermeasures of abnormal decline in water quality off Dianchi Lake in 2017[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(5): 465-472.
- [2] 陈柯豪, 杜红梅, 刘春江. 云南喀斯特断陷盆地典型群落植物生态化学计量学特征[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 883-893.
CHEN Kehao, DU Hongmei, LIU Chunjiang. Characteristics of leaf ecological stoichiometry in typical plant communities in karst fault-depression basins of Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 883-893.
- [3] 朱泓, 王金亮, 程峰, 邓欢, 张恩伟, 李应鑫. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1289-1297.
ZHU Hong, WANG Jinliang, CHENG Feng, DENG Huan, ZHANG Enwei, LI Yingxin. Monitoring and evaluation of ecological environment quality in central Yunnan lake basin[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1289-1297.
- [4] 曾锐, 张陶, 蒲俊兵, 李建鸿, 王赛男. 典型岩溶断陷盆地农作物生态需水研究: 以蒙自地区为例[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 873-882.
ZENG Rui, ZHANG Tao, PU Junbing, LI Jianhong, WANG Sainan. Ecological water requirements of crops in typical karst fault-depression basins: A case study of the Mengzi area, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 873-882.
- [5] 梁锦桃, 邓艳, 曹建华, 靳振江, 李旭尧. 典型断陷盆地流域生态系统服务价值时空差异研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 476-486.
LIANG Jintao, DENG Yan, CAO Jianhua, JIN Zhenjiang, LI Xuyao. Temporal and spatial differentiation of the ecosystem service value in typical fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 476-486.

- [6] 杨超, 张艳齐. 滇池流域湿地地质环境安全探究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(8): 136-137.
YANG Chao, ZHANG Yanqi. Analysis on the safety of the wetland in Dianchi lake[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(8): 136-137.
- [7] 王宇, 张华, 张贵, 蓝芙宁, 王秀艳, 万龙, 刘宏. 喀斯特断陷盆地水资源高效开发利用模式构建[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 644-653.
WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, LAN Funing, WANG Xiuyan, WAN Long, LIU Hong. Construction of high-efficiency exploitation and utilization model of water resources in karst faulted basin[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 644-653.
- [8] 王波, 王宇, 张贵, 张华, 代旭升, 康晓波. 滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 352-362.
WANG Bo, WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Hua, DAI Xusheng, KANG Xiaobo. A study of quality and pollution factors of karst groundwater in Lujiang river basin in southeast Yunnan[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 352-362.
- [9] 程汉亭, 刘国道, 董荣书, 王晓敏, 李勤奋, 周小慧, 张显波. 基于果园牧草间作的石漠化综合治理效益评价: 以贵州省兴义市为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 210-219.
CHENG Hanting, LIU Guodao, DONG Rongshu, WANG Xiaomin, LI Qinfen, ZHOU Xiaohui, ZHANG Xianbo. Evaluation of rocky desertification comprehensive control based on orchard intercropped by herbage: A case study of the Xingyi City, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(2): 210-219.
- [10] 梁锦桃, 邓艳, 李旭尧, 徐烨, 曹建华. 岩溶断陷盆地不同海拔植物水分利用效率分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2): 180-188.
LIANG Jintao, DENG Yan, LI Xuyao, XU Ye, CAO Jianhua. Analysis on water use efficiency of plants at different altitudes in karst graben basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 180-188.
- [11] 王宇, 张华, 张贵, 彭淑惠, 杨文礼, 蔡保新, 冯敏, 王梓澈. 云南省石漠化调查及治理综述[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 486-496.
WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, PENG Shuhui, YANG Wenli, CAI Baoxin, FENG Min, WANG Ziwei. Review of the investigation and integrated renovation on rocky desertification in Yunnan Province, China[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 486-496.
- [12] 张华, 王宇, 柴金龙. 滇池流域石漠化特征分析[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 181-186.
ZHANG Hua, WANG Yu, CHAI Jinlong. Analysis on the desert's characteristics in Dianchi watershed[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(2): 181-186.
- [13] 刘长礼, 王秀艳, 吕敦玉, 赵悦文. 中国南方岩溶地下水污染源风险评价及防控对策[J]. 地球学报, 2017, 38(6): 910-918.
LIU Changli, WANG Xiuyan, LYU Dunyu, ZHAO Yuewen. Risk assessment and control countermeasures of Southern China's karst groundwater areal source pollution[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(6): 910-918.
- [14] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134-139.
WANG Yu. Historical review of geological disaster prevention and research in Yunnan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 134-139.
- [15] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 283-295.
- [16] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 1-8.
- [17] 李笠, 艾东, 张晓章. 云南省资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价报告[R]. 中国农业大学, 2021.
LI Li, Ai Dong, ZHANG Xiaozhang. Evaluation report on resource and environment carrying capacity and territorial space development suitability of Yunnan Province[R]. China Agricultural University, 2021.
- [18] 王宇, 何绕生, 刘海峰, 王梓澈, 晏祥省, 双灵, 彭淑惠. 昆明翠湖九龙池泉群断流原因及恢复措施[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 263-271.
WANG Yu, HE Raosheng, LIU Haifeng, WANG Ziwei, YAN Xiangsheng, SHUANG Ling, PENG Shuhui. Drought causes and restoration measures for Jiulongchi spring group within Cuihu lake, Kunming[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 263-271.
- [19] 王宇, 张贵, 柴金龙, 王波, 何绕生, 彭淑惠, 康晓波, 周翠琼. 云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013: 17-27.
WANG Yu, ZHANG Gui, CHAI Jinlong, WANG Bo, HE Raosheng, PENG Shuhui, KANG Xiaobo, ZHOU Cuiqiong. The serious environmental geological problems and countermeasures in karst area of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013: 17-27.
- [20] 王宇, 张贵, 张华. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
WANG Yu, ZHANG GUI, ZHANG Hua. Investigation and study of karst hydrogeology and environmental geology in Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [21] 叶邦兴, 唐海明, 汤小明, 徐一兰. 中国农田污染的现状及防治对策初探[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 295-298.
YE Bangxing, TANG Haiming, TANG Xiaoming, XU Yilan. Status and prevention measurements of farmland pollution in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(7): 295-298.
- [22] 刘宇庆, 杨剑婷, 杨晓东, 陈明波, 陈静. 我国耕地土壤污染现

- 状研究进展[J]. 农业开发与装备, 2020(1): 74-75.
- [23] 刘会玉, 王充, 林振山, 杨浩. 基于RS和GIS的滇池流域水土流失动态监测[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2012, 35(2): 120-124.
- LIU Huiyu, WANG Chong, LIN Zhenshan, YANG Hao. Dynamic monitoring of water loss and soil erosion in Dianchi basin based on RS and GIS[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2012, 35(2): 120-124.
- [24] 王清利, 徐伟凝, 田松敏. 云南省典型湖泊流域山水林田湖草生态修复模式研究[R]. 浙江大学城乡规划设计研究院, 2021.
- [25] 中国地质工程集团公司. 云南省洱海流域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程实施方案[R]. 2021.
- [26] 中国环境科学研究院. 滇池流域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程实施方案[R]. 2021.
- [27] 罗明, 翟紫含, 陈妍. 生态文化的回归: 我国生态文明建设中NbS理念的应用[J]. 中国土地, 2021(6): 9-12.
- [28] 邹长新, 王燕, 王文林, 徐德林, 林乃峰, 李文静. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 961-967.
- ZOU Changxin, WANG Yan, WANG Wenlin, XU Delin, LIN Naifeng, LI Wenjing. Theory of mountain-river-forest-farmland-lake-grass system and ecological protection and restoration research[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(11): 961-967.
- [29] 罗明, 曹越, 杨锐. 荒野保护与再野化: 现状和启示[J]. 中国土地, 2019(8): 4-8.

Ecological restoration scheme of lake basins on the karst plateau based on natural solution: Take nine lakes on the Yunnan Plateau as example

LI Qin^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,4}, LI Li⁵, ZHANG Hua^{1,2,3}, WANG Bo^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China;

3. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Yunnan Geological Survey, Kunming,

Yunnan 650051, China; 5. Beijing Zhicheng Intelligent Land Planning and Design Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract There are 30 lakes with a perennial surface area of more than 1 km² on the Yunnan Plateau, including the famous "Nine Major Plateau Lakes" such as Dianchi lake, Fuxian lake, Erhai lake and Lugu lake. Since the Holocene, the plateau uplift has gradually stabilized, and plateau lakes generally entered the stage of degradation. Consequently, resources and environmental enduring capacity have decreased, and ecological vulnerability, in turn, has increased. The severe ecological damage of basins and degradation of lake ecology caused by a heavy load of population and economy in lake basins on the plateau have led to the water quality deterioration due to the shortage of water resources and the severe pollution, the decline of ecological services caused by the ecosystem destruction, and the severe restriction of the implementation and sustainability of ecological protection and restoration due to the overload of territorial space. The lakes are all distributed on the plateau and along its edge, therefore, their ecological damage effect is directly transmitted to and affects the water environment of the Yangtze River, the Pearl River and other big rivers through the surface and underground rivers. Therefore, the ecological restoration of the plateau lake basins is of great significance to the regional water environmental and ecological security. Through the systematic investigation and research, we find that mainly developing in karst faulted basins with a complete geomorphic unit for each lake basin is the most important environmental feature of plateau lakes. The karst faulted basin can be divided into four geological zones in terms of ecological environment, mountain area, hilly area, flat land area, and lake area. The ecological and economic functions of the zones are shown as follows, mountain areas are mainly used for the ecological functions such as soil and water conservation, biodiversity protection, etc., and the development of mineral resources and energy; hilly areas are used for ecological barrier establishment, water and soil conservation, water resource regulation and storage, industrial development and leisure tourism; flat land areas are used for urban construction, economic and social development, and the ecological functions such as wetland restoration, wetland reconstruction, and mitigation of man-made and natural hazards. The lake areas have functions of buffer and isolation, biodiversity and habitat protection, water resources regulation and storage, water quality purification, as well as the economic value of aquatic product and tourism. The surface water and groundwater runoffs merge into lakes from high

to low. All the adverse environmental effects caused by the ecological damage in the peripheral area are directly transferred to lakes by these runoffs as carriers. Therefore, ecological restoration should be carried out systematically in the basins. The ecological restoration scheme of plateau lakes should adhere to the principle of respecting and adapting to nature.

According to the differential characteristics of ecological and geological environments of the plateau lake basins, the rule of water cycle and mass transport, as well as the conditions of resources and environment, we should conduct the zoning evaluation of ecological function and suitability in drainage basins, reveal the main ecological problems, and summarize experience, based on the succession law and the internal mechanism of nature. Finally, after determining ideas and principles based on natural solutions, we can work out ecological restoration schemes that are adapted to the conditions of resources and environment, and social realities of the plateau lake basins. In general, ecological restoration schemes should be deployed in a coordinated manner throughout the entire basin, targeting at the problems in different areas. The main ecological problems in mountain areas are vegetation degradation, biodiversity damage, soil erosion, rocky desertification and geological disasters. For these issues, ecological restoration should focus on the restoration of natural resources and the enhancement of ecological functions. The main ecological problems in hilly areas are vegetation destruction, excessive mountain reclamation, excessive mining of building materials, destruction of landform and landscape, pollution with multiple sources, and many other types of environmental and geological problems. For these issues, artificially assisted regeneration and ecological reconstruction should be adopted as the main ecological restoration methods. At the same time, ecological and economic functions should be improved. The main ecological problems in flat land areas are the overload of land space, the shortage of water resources, the heavy pollution issue, the serious destruction of the ecosystem, wetland loss due to excessive construction, destruction of vegetation, the intense transformation of natural flow fields, the poor quality of water environment, etc. For these issues, in order to effectively improve the economic and ecological functions of territorial space, ecological restoration should be focused on ecological reconstruction, comprehensive governance, transformation and utilization of land space, as well as pollution control. The main ecological problems in lake areas are as follows, intensive human activities, serious encroachment on the ecological land by the farmland and villages in the lakeside buffer zone, habitat damage, biodiversity reduction, attenuation or loss of the ecological barrier area around the lake, and serious water pollution. For these issues, ecological restoration should be focused on pollution interception and treatment, water quality restoration, and ecological reconstruction. Specifically, we should construct ecological banks and corridors, eliminate the stress factors of habitat fragmentation, improve and repair the water environment, and rebuild a sound ecosystem. In the past decade, a total area of 593 hm² has been restored in the plateau lakes. The ecological restoration practice of the "Nine Major Plateau Lakes" proves that the ecological restoration scheme of lake basins on the karst plateau based on natural solutions is effective, and the ecological restoration of major plateau lakes has achieved significant results.

Key words ecosystem, the lake on karst plateau, topographic feature, environmental problems, ecological restoration, Yunnan

(编辑 黄晨晖)