

李芹,王宇,张华,等. 云南高原脆弱生态地质环境类型与特征及生态修复对策[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1261-1274.

DOI: 10.11932/karst20240604

云南高原脆弱生态地质环境类型与特征及生态修复对策

李芹^{1,2,3}, 王宇^{1,2,4}, 张华^{1,2,3}, 柴正交^{1,2,3}, 熊波⁵

(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. 云南省国土资源规划设计研究院, 云南 昆明 650216)

摘要: 云南高原地质背景复杂, 新构造运动强烈, 高原隆升和断块差异升降幅度大, 形成了区间差异显著、多样性突出的现代生态地质环境格局。根据云南高原山地生态地质环境对外界干扰的敏感性和自我恢复能力弱等特征, 本文划分出岩溶石山(主要分布于滇东南一带, 面积约2.1万 km²)、高原湖泊(主要分布于滇中和滇西北, 面积0.1万 km²)、干热河谷(主要分布于滇中、滇西和滇南, 面积1.3万 km²)和高寒山地(主要分布于滇东和滇西北海拔2 500 m以上地区)四类脆弱生态地质环境类型, 因其分布区地质环境稳定性差, 内外动力地质作用强, 自然资源时空分布不均, 生态地质环境对外界干扰敏感、自我恢复能力弱, 自然和人为影响因素复杂多元, 生态损毁严重, 石漠化、水土流失、旱涝灾害、地质灾害易发高发, 生态修复困难。针对高原脆弱生态地质环境类型与特征, 分类进行详细分析论证, 提出高原生态保护和修复应认真调查研究, 遵循自然和经济规律, 统筹规划, 系统修复, 坚持保护优先、自然修复为主的方针, 加强国土空间规划的统筹协调、引领指导等对策。

关键词: 生态脆弱性; 岩溶石山; 高原湖泊; 干热河谷; 高寒山地; 生态修复; 云南高原

创新点: 从云南省国土空间的角度, 首次针对云南省全域系统分析高原生态地质环境的脆弱性特征, 提出岩溶石山、高原湖泊、干热河谷、高寒山地四类典型的脆弱生态地质环境类型。

中图分类号: X171.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1261-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

人类和其他生物与地质环境在特定空间相互关联和影响的部分, 称为生态地质环境。地质环境是生态系统的基础, 发挥着承载功能和深远的影响力, 决定着一个地区自然资源与环境状态的生态格

局^[1-4]。生态地质环境脆弱性是环境系统在特定时空尺度对于外界干扰所具有的敏感反应和自我恢复能力疲弱的特性, 直观地说就是生态系统或生态地质环境中的薄弱环节或漏洞, 这是生态修复最应关注的问题部分^[5-8]。目前云南高原生态地质环境研究成果主要集中在3个方面: 一是维持生态系统正

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, 主要从事水工环地质及国土空间生态保护修复研究。E-mail: 1321137393@qq.com。

通信作者: 王宇(1960—), 男, 博士, 教授级高级工程师(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: 2024-02-10

常运转前提下的自然资源与环境条件的量化评价;二是生态环境恶化的地质原因,其中人类活动被视为强大的外营力;三是整体生态系统或特定物种的保护和生态修复技术及方案^[9-14],但对于云南高原脆弱生态地质环境类型与特征的研究尚无系统、全面的成果报道。云南高原在地质历史演化进程中,地壳运动强烈,深大断裂及褶皱发育,形成了复杂多变的地质背景。在喜马拉雅造山运动的影响下,高原大幅度隆升,新构造运动剧烈,断块差异升降强烈,经内外动力地质作用的长期塑造,最终形成了区间差异显著、多样性突出的现代地貌格局。云南省国土面积中,山地约占 84%,高原、丘陵约占 10%,盆地、河谷约占 6%,在形成雄奇秀美的自然风光、有色金属王国、动物王国、植物王国的同时,也形成了普遍脆弱的生态地质环境,广大山区山高坡陡、河谷深切、土石松散、单点暴雨多发,加之强震频繁和人类活动影响加剧,生态损毁严重,石漠化、水土流失、旱涝灾害、地质灾害易发高发^[15-16]。然而,在国土空间规划、生态修复规划编制中,对自然的认识、对生态问题的识别和双评价仍有不少流于形式或比较敷衍。本文对云南高原生态地质环境脆弱性及类型特征进行系统研究,以期为提高规划编制者对生态地质环境调查、深化生态问题识别和双评价的必要性,以及提高基于自然、因地制宜、系统修复原则重要性的认识水平,加强高原生态地质环境与脆弱性的调查研究提供科学依据。

1 研究区生态地质环境特征

1.1 地质条件复杂,新构造运动强烈

云南高原在距今 30 亿年的中太古界变质岩群之后,各地质时代沉积岩、岩浆岩、变质岩种类齐全,其中沉积岩分布最广,整个滇东、滇东北和滇西的保山—沧源地区,约有 11 万 km²,中生代形成的红色碎屑岩也分布广泛,主要分布在滇中地区及兰坪—普洱一带,约 12 万 km²,岩浆岩和变质岩主要沿深大断裂呈带状分布,如红河断裂、怒江断裂、高黎贡山断裂形成的一系列变质岩系,如苍山群、高黎贡山群、哀牢山群等,以及与这些断裂活动相伴随的岩浆岩。云南新构造运动强烈,表现为深大断裂带地震多发,云南高原跨越扬子准地台、华南褶皱系、松潘—甘孜褶皱系、唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系、冈

底斯—念青唐古拉褶皱系等大地构造单元,金沙江与红河深大断裂带是印度板块与亚欧板块的碰撞带,因此云南高原地质构造非常复杂,山川走向和展布格局基本上是被地质构造以及地层岩性所控制和决定的。经过多期区域构造运动的叠加与改造,形成了云南复杂多样的地质构造类型、特征迥异的地质构造单元。云南省地震活动频繁,水系发育,流水侵蚀作用强烈,物质移动快,坡面稳定性差,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害突发易发。

1.2 地形地貌多样,生境区间变化大

云南省属高原地区,地势呈西北高、东南低,自北向南呈阶梯状逐级下降,为青藏高原向云贵高原过渡区,山字形构造发育、地表起伏大、山高谷深,山地面积约占国土总面积的 94%,海拔最高点为滇藏交界处德钦县境内的怒山山脉梅里雪山主峰卡瓦格博峰,海拔 6740 m,最低点在河口县境内南溪河与红河交汇处,海拔 76.4 m,两地直线距离约 900 km,高差逾 6000 m。云南总体地形地貌以元江和云岭山脉为界,分为东、西两大区域,东部为滇中红层和滇东岩溶高原,是云贵高原的组成部分,平均海拔约 2000 m,表现为起伏和缓的中山、低山及丘陵,滇东岩溶高原地貌形态丰富多彩,岩溶断陷盆地发育,主要山脉有乌蒙山、五莲峰山、梁王山、拱王山、牛首山、六韶山等;西部为横断山脉纵谷区,其北部属青藏高原的南延部分,海拔 3000~4000 m,由高黎贡山、怒山、云岭等巨大的山脉和怒江、澜沧江、金沙江等大江相间排列,形成蔚为壮观的“三江并流”地貌景观,南部为横断山余脉,地势总体向南趋缓,河谷逐渐宽阔,主要山脉有哀牢山、无量山、大雪山、邦马山、槟榔山等,海拔大多不到 300 m;在南部、西南部边境地区,地势低缓,宽谷盆地较多,一般海拔 800~1000 m,个别地段低于 500 m,是云南主要的热带、亚热带地区。云南地貌成因类型、地形纵横起伏变化大,导致生态地质环境复杂多变,普遍脆弱性较高(图 1)。云南高原主要属亚热带高原季风气候,立体气候特点显著,类型众多、年温差小、日温差大、干湿季节分明、气温随地势高低垂直变化异常明显,总体上随气候纬度、海拔高程同步变化,从低纬度到高纬度呈现北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带和高原气候分带(图 2)。因此,云南省的自然环境特征决定了纬度和海拔高度同向叠加,

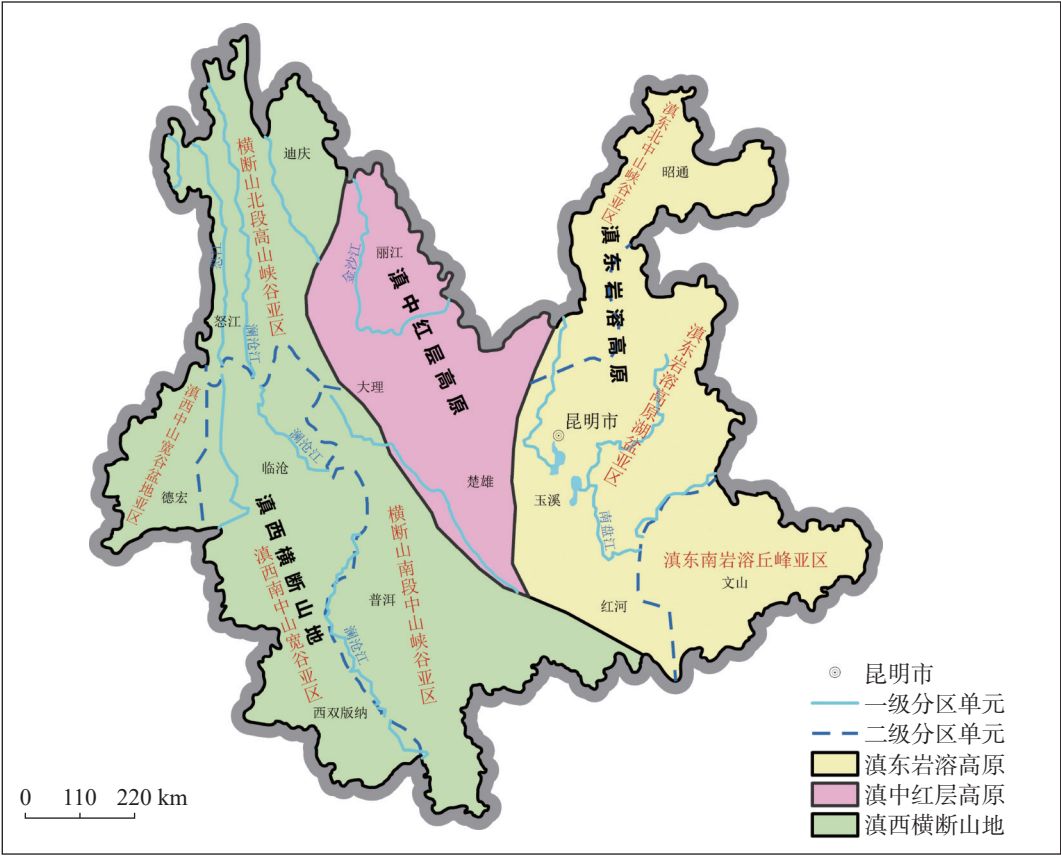


图 1 云南省地貌分区图
Fig. 1 Geomorphologic zoning of Yunnan Province

自然生态环境的垂直变化异常明显,生物种群地理分布狭窄,生态环境容量小,不同的生物种群选择的适生范围有限,自我调节能力弱,易受外界干扰。

1.3 水资源分布不均,旱涝灾害频发

由于受构造控制,云南省河流干、支流主要沿构造线发育,水资源径流集中于高原山间谷底,受西南季风影响,河流以夏汛为主,秋汛次之,冬春为枯水期,径流动态变幅大。滇东岩溶高原和滇中红层高原区径流深值较小,滇西纵谷区和滇南、滇东高原斜坡区径流深值较大(图 3)。由于地形地貌、气象水文、水资源分布、水质水量的变化,水资源在空间上呈现出不配套的现象。水土资源在空间上不配套,表现为水在中、深切河谷底部,连片的土地和人口聚居区在高原面上,因此,云南省投资建设了很多提、引调水工程,如华宁盘溪大龙潭、蒙自西北勒、昆明瀑布公园、丽江九子海黑龙潭调水补水工程、滇中调水等。同时,高原岩溶地区旱涝灾害分布广泛,频繁发生,具有显著的季节性和突发性,交替出现的洪涝灾害使得该地区的生态环境变得异常脆

弱^[17]。2023 年云南省遭遇了 1961 年有气象记录以来最严重的气象干旱,全省年平均降水量为 887 mm,较历年同期偏少 200 mm,曲靖市、楚雄州、昆明市、玉溪市等州(市)平均降雨量 624~674 mm,较历年同期偏少 196~356 mm,2020 年滇中及以西、以南地区降水偏少,滇西北部、东部及滇东南东部等地降水偏多,洪涝灾害造成 50 个县 63.3 万人受灾,多发于昭通、文山、曲靖等地,旱涝并存,旱涝急转现象突出,受灾人口多、受灾面积广、经济损失大,凸显了该地区生态地质环境的脆弱程度大,适应性差。

1.4 地表稳定性差,动力地质作用强

受喜马拉雅造山运动的影响强烈,上新世以来地形切割强烈,岩石破碎,覆土广布,局地暴雨多发,地震频繁,地质灾害易发、频发,土壤侵蚀强烈、水土流失严重。土壤侵蚀强度及分布与地层岩性、地质构造、地形地貌的相关性显著,从 2019 年云南省水土流失动态监测成果来看,云南省水土流失总面积为 102 136 km², 占全省国土面积的 25.92%。按轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀 5 个水土流失强

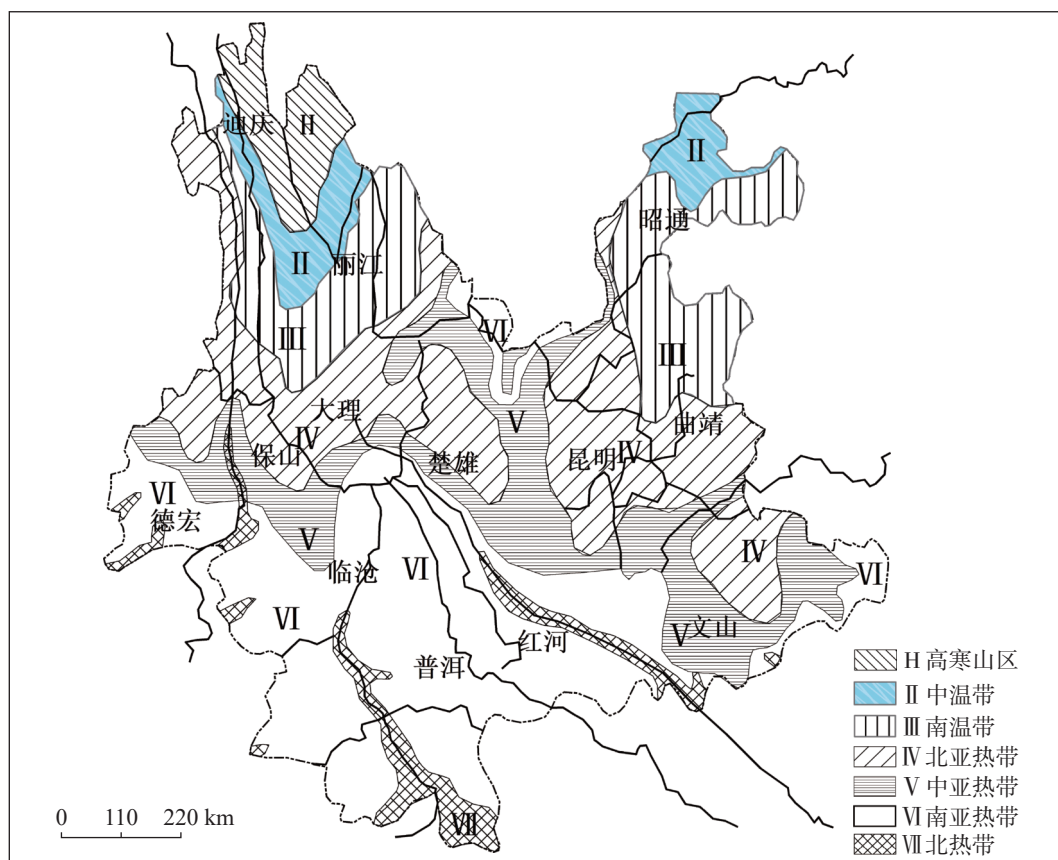


图2 云南省气候类型图

Fig. 2 Climate types of Yunnan Province

度等级划分,全省轻度水土流失面积为 68 797 km²,占水土流失总面积的 67.36%,中度流失面积为 13 608 km²,占水土流失总面积的 13.32%,强烈及以上流失面积为 19 732 km²,占水土流失总面积的 19.32%。水土流失会导致地表植被破坏、加速土地石漠化进程,影响生态环境的稳定性,导致脆弱性加剧。

1.5 生物多样性脆弱、资源承载力低

云南生物多样性既丰富又脆弱,云南省 2/3 以上的生态系统均处在热带和南亚热带区域,在湿热环境下,生态系统的物质循环和能量流动速率快,系统对外部的干扰敏感性强,其稳定性较温带生态系统差。各物种表现出多样丰富的特征,又因其生境条件区间变化大,导致物种存在种群小、数量少的特点,不利于种群的扩散和发展。加之受地形地貌变化大的影响,无论是水平地带还是垂直地带,物种可选择的适生范围有限,容易在进化中形成较强的专一性,也不同程度地导致脆弱性增加,同时生物地理分布的边缘性也决定了其生物类群较之中心区域而言,有明显的脆弱性特征。同时,以山地为主的地貌结

构决定了其对资源环境的本底是高度依赖的,而人口发展、经济增长、污染物排放等承载对象的压力,易触发区域生态系统、地质环境、环境容量等承载体的响应,使之受到水土流失、土地石漠化、滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害的威胁,造成生态环境退化、人地矛盾突出。而生态地质资源承载力提升潜力是有限的,以怒江州为例,属典型的高山峡谷区,既“三江并流”世界自然遗产地的核心区,也是中国泥石流灾害最为严重的地区,长度 8 km 以上的泥石流有 100 余条,泥石流物源区海拔高(2 500~3 500 m)、高差大(可达 3 000 m 以上)、流通区路径长、搬运能力强,近十年平均每年发生 20 余起,地质灾害的高发易发极大降低了区域资源环境承载力提升的可能性,加之城镇化进程中,资源开发利用与环境保护矛盾未得到有效解决,因此高原山区提升资源环境的承载力较困难。

2 脆弱生态地质环境类型

依据云南高原生态地质环境对外界干扰的敏感

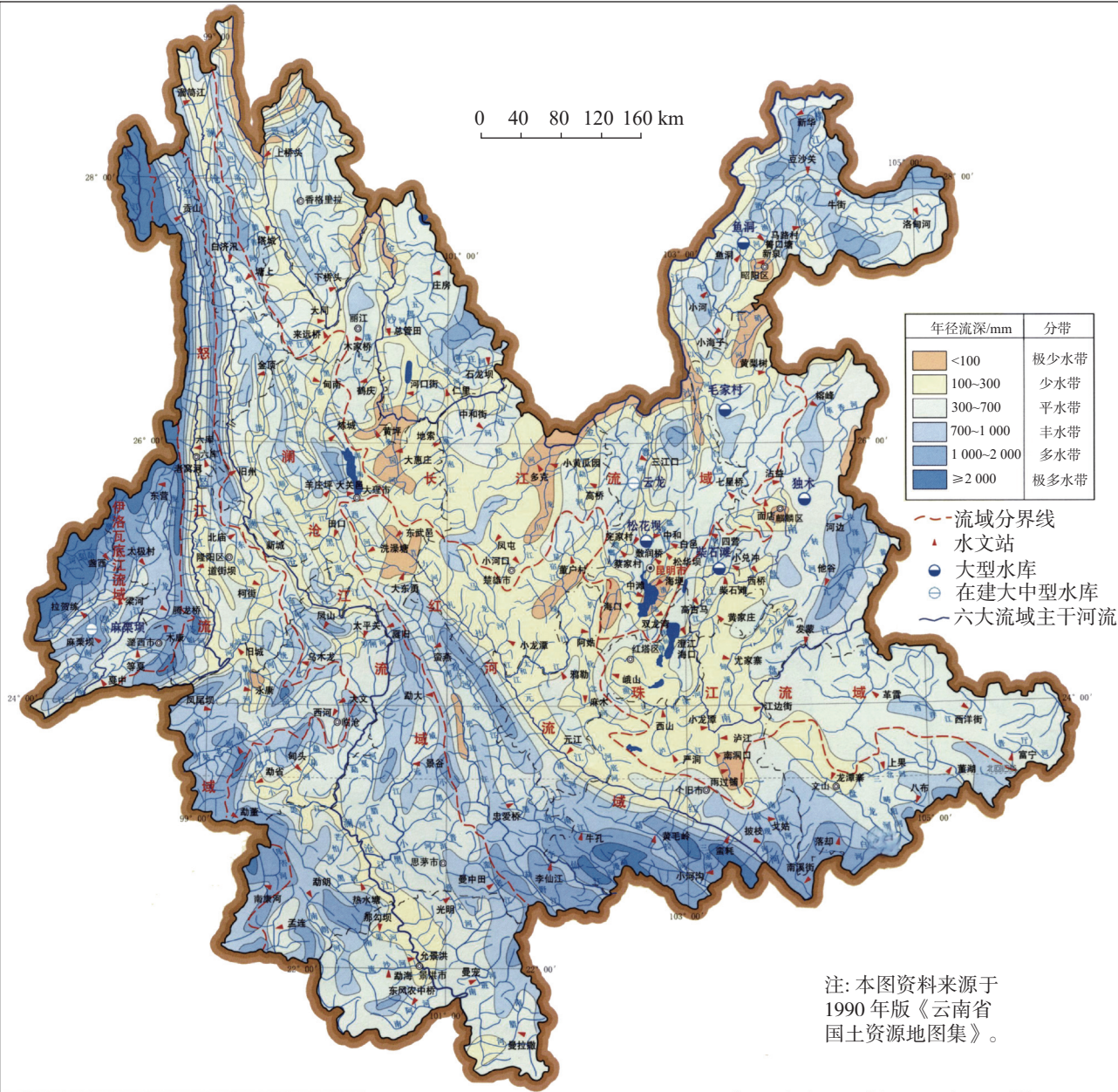


图 3 云南高原径流深等值线图
Fig. 3 Contour map of runoff depth on the Yunnan plateau

性和自我恢复能力弱的特征^[18-19]，划分出岩溶石山、高原湖泊、干热河谷和高寒山地四类脆弱生态地质环境(图 4)，实践证明这些类型分布区生态修复治理较为困难。

2.1 岩溶石山

云南是岩溶大省，根据《云南省(岩溶地区)石漠化状况公报》(2023 年 6 月)显示，云南省调查的 88 个石漠化县中，石漠化土地面积达 212.83 万 hm^2 (其中，轻度石漠化 102.89 万 hm^2 ，中度石漠化 86.32 万 hm^2 ，重度石漠化 17.50 万 hm^2 ，极重度石漠化 6.12

万 hm^2)，主要分布在文山、曲靖、昭通、丽江、红河、昆明等地。高原岩溶石山区由于地层沉积旋回、地质构造切割组合、地形地貌起伏变化、新构造运动及溶蚀作用形成了岩溶断陷盆地、峰丛洼地、峰丘槽谷等多种岩溶地貌，地下岩溶裂隙、管道、溶洞、溶厅等空间发育，构成地表、地下生态空间和水文系统双层结构，形成“土在楼上、水在楼下”的水土资源不配套格局，导致岩溶石山区生态地质环境较为脆弱，具体表现在三个方面：一是土壤承载力差，岩溶山区风化残积土小于 0.005 mm 黏粒的含量高达 65%~99%，质地黏重，土表易形成悬移质，峰丛坡度

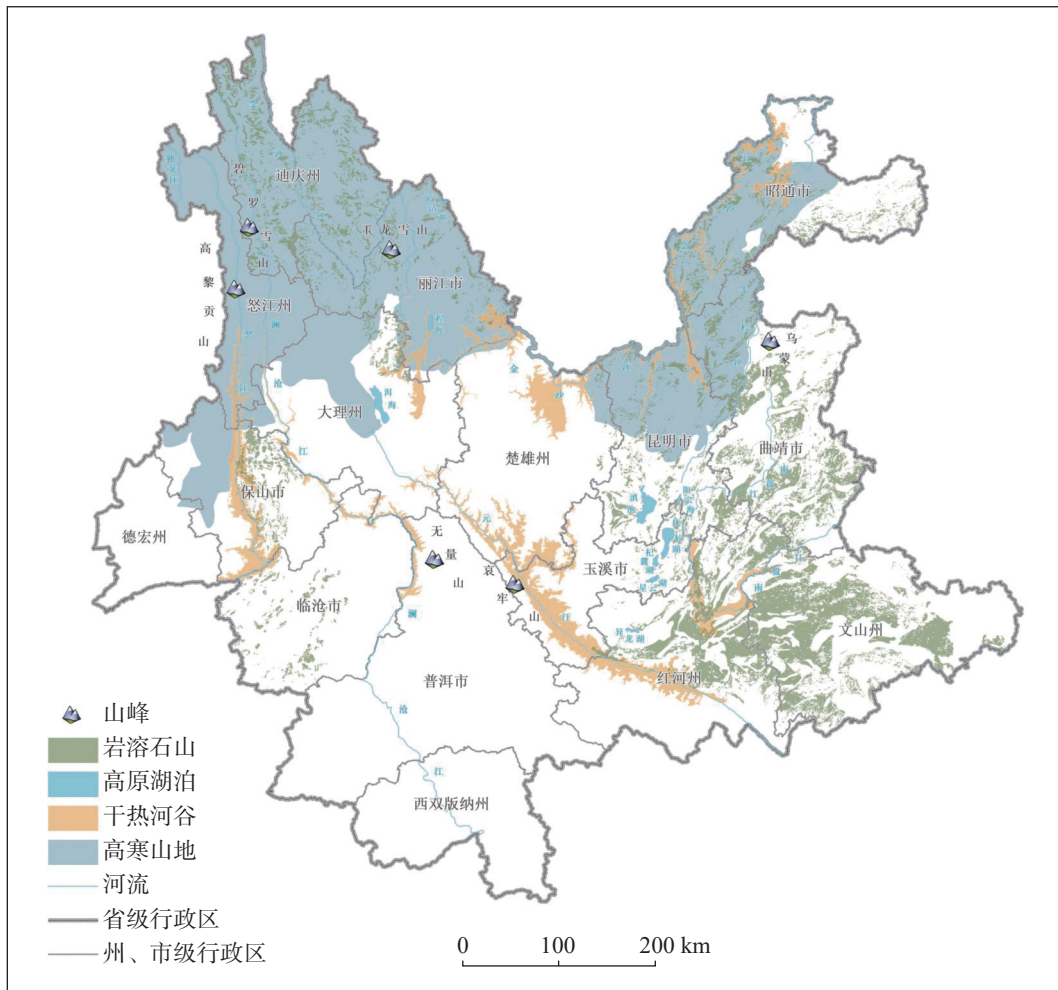


图 4 云南省主要脆弱生态地质环境类型及分布图

Fig. 4 Types and distributions of main fragile eco-geological environments in Yunnan Province

为 30° 的裸土坡面, 土层含水量达 25.3% 时, 起始侵蚀降雨量仅为 $5 \text{ mm} \cdot 30 \text{ min}^{-1}$, 水土流失和漏失严重^[20-23]; 石漠化主要发育区为碳酸盐岩, 其地层坚硬、持水性低、孔隙度小(一般不到 4%), 碳酸盐岩风化成土缓慢, 土层薄而分散, 据研究, 形成 1 m 厚的残积土, 需溶蚀 2~5 m 碳酸盐岩, 所需时间为 28~84 ka, 但云南省的岩溶速度为 $0.0317 \sim 0.515 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[24-25], 其成土的速度远低于岩溶的形成, 加之石山区岩土之间粘着力差, 红黏土具弱膨胀性, 干湿变化即开裂崩解, 土壤易冲刷流失, 沉积于洼地、漏斗、溶沟中的土层, 在人类扰动和暴雨下渗潜蚀作用下, 易通过落水洞、溶隙漏失进入地下河而流失和淤积于其中, 故岩溶石山区土层总体处于负增长状态。二是生态系统自我调控和恢复功能弱, 岩溶石山植被具有喜钙、旱生、石生性特点, 生长缓慢, 以马尾松为例, 其胸径年均增长量为 0.2~0.3 cm, 最快 0.52 cm, 最慢 0.08 cm, 且绝对生长量低, 适生树种少, 生物量少, 主要为一

些草本、灌草群落, 结构简单, 群落的自我调控和恢复能力弱, 当岩溶森林被破坏后, 自然演替经历草灌丛—藤灌丛—灌丛—疏林—森林的过程至少需要 30~45 a, 由此推断石漠化地区发展成乔木林地至少需要 60 a。当受到外界因素尤其是人为活动干扰破坏时, 自然和人工修复都极为困难, 岩溶石山区稀疏的藤灌丛经严格保护保育后 5~15 a 才可恢复至藤灌丛, 再经 15~25 a 后才可能恢复成乔木林, 但严重的石山地区经相当长的时间自然恢复仍为稀草、石漠状态^[26]。三是水文过程特殊复杂, 岩溶石山区由于河谷深切, 地形起伏大, 地下岩溶空间发育, 降雨入渗率达到 95% 以上, 降水多快速径流, 汇集于深切河谷中或渗入(灌入)地下河中, 造成广大石山、岩溶高原面(台)地区地表广泛干旱缺水(表 1)。

2.2 高原湖泊

云南高原湖泊主要发育在断陷盆地中, 湖泊流

域就是一个完整的盆地单元,这是最突出的地质环境特征,云南有大小盆地(俗称坝子)1445个,均分布在高原面及其边缘,以不到全省6%的国土面积承载了80%的国内生产总值(GDP)。九大高原湖泊(滇池、阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖、洱海、程海、泸沽湖)均属断陷构造湖泊,形成于云贵高原抬升过程。九大高原湖泊总面积1007 km²,占云南全省国土面积的0.26%,流域面积8110 km²,占全省国土面积的2.05%,地形由西北向东南倾斜,海拔处于1414~2690 m之间,高程跨度大,地质环境复杂。九大高原湖泊流域内人口超过700万人,占全省人口总数的1/7以上,GDP占全省1/4以上,汇集了全省70%以上的大中型企业,云南的经济中心、重要城市也大多位于流域内,是全省人口最密集、人为活动最频繁、经济最发达的地区,也是云南省的粮食主产区,城市化、工业化聚集区(表2)。同时,作为天然湖泊,它们在调蓄洪水、保障供水、调节气候、维护环境等方面发挥重要作用。全新世以来,高原隆升趋于稳定,高原湖泊进入了退化阶段,老年期湖泊居多,生态自然退化进程明显,资源与环境承载力随之降低,脆弱性增大,内涝与干旱缺水并重。高原湖泊流域地貌形态呈环带分布状,由外到内可分为:高中山区、丘陵区、平坝区、湖泊四个区带,山地、丘陵区降水形成的地表、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可由径流直接传递到高原湖泊,产生聚集效应。高原湖盆流域空间局限,但人口、经济负荷巨大,远超自身资源与环境承载力,生态破坏严重,生态修复的空间和资源不足,高原湖泊生态破坏效应,经地表河、地下河直接传递和影响下游长江、珠江等大江大河

的水环境。

例如,滇池流域面积2920 km²,总人口为545.4万人,GDP5180.7亿元,以占云南省0.75%的国土面积承载了全省约23%的GDP和8%的人口,生态环境容量小,土地承载能力低;滇池流域自产水量5.4×10⁸ m³,跨流域调引水量达8.89×10⁸ m³,人均水资源量393 m³,仅为全国的19%,严重缺水,任何污染物排放入湖都会导致湖泊生态位补偿效应减弱、生态系统结构和服务功能稳定性降低。洱海流域面积2565 km²,2020年流域常住人口为96.3万人,旅游业增加值占大理本地GDP20%以上,环湖村落人口密集,以大丽路以东生态保护缓冲区为例,共分布152个自然村,人口多达13.6万,生态环境压力巨大。洱海流域生态保护缓冲区内承担了大理市永农任务的26.89%,以洱海Ⅱ类水质为目标来计算,洱海化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)水环境容量分别为7106 t·a⁻¹、1100 t·a⁻¹、95 t·a⁻¹,但正常水文年条件下,2018年洱海入湖污染负荷TN为1598 t·a⁻¹、TP为125 t·a⁻¹,2020年洱海入湖污染负荷TN为1382 t·a⁻¹、TP为105 t·a⁻¹,2021年COD为12780 t·a⁻¹、TN为1150 t·a⁻¹、TP为72 t·a⁻¹,仍然超过洱海水环境容量,因此,采矿、地下工程疏排水导致地下水位下降,含水泉疏干,农业面源污染、土壤或堆存污染物可通过地表水、地下水淋滤、径流迁移至湖泊^[27]。

泸沽湖流域面积248 km²,水面面积57.7 km²,其中云南部分所属流域面积107 km²,湖泊水面面积30.3 km²,因其深藏横断山脉腹地,交通不便,人口密度相对其他湖泊较小,与外界的物质、文化信息交流程度低,所以其生态系统保存相对完好,生态平衡相对稳定,是云南九大高原湖泊中水质最好的湖泊,当

表 1 典型岩溶石山气象水文特征指标统计表

Table 1 Statistics of meteorological and hydrological characteristics of typical karst rock mountains

典型地区	地貌类型	海拔/m	多年均降雨量/mm	多年平均年蒸发量/mm	年均日照时数/h	多年平均风速/m·s ⁻¹	年径流深/mm	地下水径流模数/10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹ ·km ⁻²	降水入渗系数
大理	滇中红层高原	730~4295	718	1142	2254	10.80	100~300 (少水带)	10~30	0.14
香格里拉	滇西横断山脉	1503~5545	1575	1137	2186	2.10	300~700 (平水带)	10~20	0.10
昆明	滇东岩溶高原	746~4247	1450	1856	2200	40.00	100~300 (少水带)	15~30	0.50
蒙自	滇东岩溶高原	146~2567	816	2380	2234	2.70	100~300 (少水带)	20~30	0.50
广南	滇东岩溶高原	420~2035	1042	213	1651	1.25	300~700 (平水带)	25~30	0.50

表 2 云南九大高原湖泊概况统计表
Table 2 Statistics of nine plateau lakes in Yunnan Province

隶属 水系	湖泊 名称	流域面积/ km ²	湖泊面积/ km ²	流域人口密 度/人·km ⁻²	海拔/ m	主导 功能	流域产 业特征	水质保 护目标	区位
长江水系	滇池	2 920	309.0	1 418	1 886	饮用水后备水源、维护生物多样性、调蓄水资源、旅游观光、调节气候、防洪减灾	云南省社会、经济、文化中心，第二、三产业相对发达	草海Ⅳ类及以上；外海Ⅳ类	滇中
澜沧江水系	洱海	2 565	215.3	385	1 974	生活饮用水、旅游观光、维护生物多样性、调蓄水资源、调节气候、防洪减灾	旅游业、种植业、养殖业	Ⅱ类	滇西
珠江水系	抚仙湖	675	216.6	246	1 721	生活饮用水、旅游观光、维护生物多样性、调蓄水资源、调节气候、防洪减灾	种植业、工业、旅游	Ⅰ类	滇中
长江水系	程海	318	74.6	116	1 501	维护生物多样性、调节气候、调蓄水资源、调节水陆系统、防洪减灾	种植业、养殖业	Ⅳ类(氟化物除外)	滇西北
	泸沽湖	248	57.7	65	2 690	生活饮用水、旅游观光、维护生物多样性、调蓄水资源、调节气候	旅游业、种植业	Ⅰ类	滇西北
	杞麓湖	354	37.3	678	1 798	维护生物多样性、调蓄水资源、调节水陆系统、旅游观光、调节气候、防洪减灾	种植业、乡镇企业、养殖业	Ⅴ类	滇中
珠江水系	星云湖	378	34.3	966	1 722	维护生物多样性、调蓄水资源、调节水陆系统、旅游观光、调节气候、防洪减灾	种植业、乡镇企业、养殖业	Ⅴ类	滇中
	阳宗湖	292	31.3	181	1 770	维护生物多样性、调蓄水资源、旅游观光、休闲度假、调节气候、防洪减灾	种植业、工业	达到Ⅲ类，力争Ⅱ类	滇中
	异龙湖	360	31.0	508	1 414	维护生物多样性、调蓄水资源、调节水陆系统、旅游观光、调节气候、防洪减灾	豆制品加工业、种植业、养殖业	Ⅳ类	滇南

数据来源:《云南省典型湖泊流域山水林田湖草生态修复模式研究(2022年)》。
Data Source: Study on ecological restoration model of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasslands in typical lake basins in Yunnan Province (2022).

地经济发展已由种植业向旅游服务业转变,变化较为明显和突出的是宁蒗县永宁乡落水村委会,湖泊主要污染因子为 TN 和 TP,因目前做了较好的国土空间规划来进行开发管控,其脆弱性相对其他湖泊而言较好。但因高原湖泊本身存在的较高脆弱性,汇水面积小,补水方式单一且补给量少,半封闭的生态环境,加之入湖河道短,水体承载能力十分有限。因此,湖泊流域是一个复杂的动态和开放系统,其脆弱性与湖泊本身所处的地形地貌构造有关,与流域

自身的经济社会发展有关,与有效的规划管控有关,这种脆弱性是社会系统内部自然经济社会要素之间的复杂联动,是内外部不同物质汇集叠加后的一种综合效应。

2.3 干热河谷

干热河谷是分布在云南高原亚热带湿润与半湿润区的高热多光照干旱河谷区,其河谷分布是不连续的,金沙江、元江、怒江、南盘江、澜沧江等都是深邃的河谷地区,其河谷总面积约 1.3 万 km²(表 3),是

表 3 典型干热河谷气象水文特征指标统计表
Table 3 Statistics of meteorological and hydrological characteristics of typical dry-hot valleys

典型地区	江河名称	海拔/ m	年降雨量/ mm	年蒸发量/ mm	日照/ h	年径流 深/mm	入渗系数	地下水径流模数/ 10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹ ·km ⁻²
泸水县	怒江	500	748	大于1 500	2 025	100~300 (少水带)	0.05~0.26	24.06
云县漫湾	澜沧江	748	1 367	大于2 000	2 552	100~300 (少水带)	0.07~0.20	21.85
丽江大具	金沙江	1 670	900	大于2 000	2 600	100~300 (少水带)	0.06~0.25	15.77
昭通巧家	金沙江	900	726	大于2 200	2 100	100~300 (少水带)	0.26~0.30	23.94
开远小龙潭	南盘江	1 180	840	大于1 466	2 200	100~300 (少水带)	0.13~0.21	14.70
元阳南沙	红河	230	863	大于2 000	1 856	100~300 (少水带)	0.07~0.18	14.29

中国特殊的“干热河谷”生态环境类型区。其土壤特征以燥红土为主,土质黏重、土壤瘠薄;植被以旱生和热带植被、稀树灌草丛为主,无明显乔木层;地质活动断裂发育,物理风化及外动力地质作用强烈。干热河谷脆弱性表现在四个方面:一是干旱缺水、水热矛盾突出。以云南境内天文可照时数 4420 h 计,干热河谷日照率大多超过 50%,从热量来看,干热河谷地区的年平均温度在 20~24 ℃,而云南省全省年平均气温最高出现在元江干热河谷(23.8 ℃),甚至高于西双版纳景洪市的 21.9 ℃,充足的热量为各种农作物的生长提供了条件,但水分条件又以干热河谷最差,宾川和元谋的降水量处于云南省倒数第一和第二位,降水量少而蒸发量大,元谋的蒸发量是降水量的 6.1 倍,年相对湿度全省最低,仅为 53%,水热矛盾十分突出^[28]。二是生态地质环境脆弱、自然灾害频发。干热河谷地处高山峡谷区,地势高,坡度陡,地质结构松散,海拔高差达 3 500 m 以上,山坡易遭坡坏、侵蚀,以金沙江干热河谷为例,是典型的地质环境脆弱带,河床下切侵蚀和沟谷溯源侵蚀作用十分强烈,元谋地层上发育的冲沟,溯源侵蚀速度为 50 cm·a⁻¹,最大达 200 cm·a⁻¹,沟谷密度 3~5 km·hm⁻²;植被以“稀树灌木草丛”为主,在群落结构上分乔、灌、草 3 层,盖度依次为 5%~20%、5%~20%、50%~90%^[29],以草本层为优势群落,在这种地质环境条件下形成的生态环境,对外界的干扰敏感性高,自我调节、自我恢复能力差,抗灾能力弱,旱洪灾害频繁。三是水土流失强烈、土壤退化严重、土壤生产力低。云南干热河谷区多处于地形明显过度转折的地带,如河床与河岸的过渡带、阶地之间的过渡带、沟谷

后缘与平台的过渡带,对水动力作用响应敏感,极易发生侵蚀、崩塌或滑坡。燥红土储水能力弱,加之植被稀少,使土壤荒漠化现象及水土流失强烈,有研究表明土壤侵蚀使土壤中 N、P、K 等养份流失,有机质含量减少,过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶等活性降低,土壤肥力退化,土地生产力下降。四是经济相对比较落后、农牧业及矿业活动强烈、环境扰动过大。干热河谷区大多地处偏远,地势崎岖,基础设施相对薄弱,少数民族众多,以金沙江干热河谷为例,区内分布着彝族、傈僳族、回族、布依族、苗族等,人口密度分布不平衡,密度最小的华坪县为 65.1 人·km⁻²,密度最大的东川区为 171.5 人·km⁻²,人多地少,从事农、林、牧、渔劳动力占农村劳力总数的 86.9%,人均耕地不到 0.067 hm²,资源短缺,过度放牧导致植被破坏、生活能源缺乏。

2.4 高寒山地

云南省高寒山地是指 2 500 m 以上的山区,其气温低、霜期长,常见高寒荒漠和冰川,主要分布寒温带森林植被、高山和亚高山草甸,人口稀少,林业和牧业占比大,农作物以耐寒的品种为主。因地壳差异升降幅度大,区域地块和山体稳定性差,内外动力地质作用都比较强烈,它的脆弱性表现在两个方面:一是山高坡陡,以物理风化为主,侵蚀剥蚀作用强烈,土壤层薄且分散,生物立地条件差,气候恶劣,自然进程中的荒漠化趋势强劲。以云南省迪庆州为例,2 500 m 以上高山土壤以红壤、棕壤、高山草甸土为主,土壤发育历史短,成土母质以冰碛物、残积—坡残积物为主,普遍具有粗骨性强、抗蚀能力弱的特

点;植被以高寒草甸、草原为主,结构单一,加之山区温度的差异随着海拔变化明显,海拔每升高 100 m,气温要下降 0.5~1 ℃,低温缺水导致草地生产力低,更新缓慢,且强烈的紫外线影响了植物的蒸腾作用,使营养不能及时得到供应,这些因素都决定了高寒山区生态系统的本底质量差,在自然进程中易出现荒漠化进程。二是生态地质环境脆弱、地质灾害高易发,生态破坏的自我修复能力弱,人工修复难度大、可持续性差。地形、气候、植被、人类干扰都是高寒山区的生态环境脆弱性因子,人类活动扰动也极大改变了生态系统的稳定状态,如矿产资源的开采、旅游资源的开发、超载过牧等会给当地脆弱的生态系统带来严重的破坏,使局部地区出现草地退化、湿地消失、土地沙化等现象。以高山草地植物为例,受人类活动的影响,草甸的原生植被一旦死亡,要等其自然恢复,至少需 12 a,且还不能达到原来的植被密度,只能恢复 10%~67%,恢复后的草原、草甸上植物物种只有原来的 10%~35%^[30],多为独行菜、委陵菜、茵陈蒿等强势杂草,故易造成物种单一和退化。高寒草地生态系统的功能兼顾着气候调节、养分循环与贮存、固碳释氧、水源涵养、土壤形成、侵蚀控制、废物处理、沙尘滞留和生物多样性维持等方面,既有生产功能,又有生态功能,一旦受损或发生不可逆转的现象,将加剧地质环境的脆弱性,使植被群落结构失调、功能减弱、土壤理化性质恶化,地质灾害易发。

3 生态保护及修复对策

通过分析了解复杂的地质背景、强烈的新构造运动及其所形成的生态地质环境脆弱性特征,针对生态修复实践中常见问题和不足,对高原保护及生态修复提出如下建议。

3.1 认识自然、遵循规律

应从生态地质环境的多样性出发,通过全面、科学的调查研究,查明生态地质环境与资源条件,揭示生态系统内在联系和演替规律,准确识别生态问题,提高生态修复的针对性和有效性。深入研究生态演变规律和驱动机制,研究气候变化对高原山地生态系统的影响规律和机理,进而探究山区生态系统对人类活动和气候变化的适应技术和调控机制。以石

漠化地区为例,应针对石漠化发育程度,研究流域尺度石漠化演变机理及驱动机制,研发水土资源高效利用和优化调控、水土流失阻控、退化植被群落生态修复与优化配置等技术,构建促进生态系统健康与优化的技术体系,形成生态治理与生态产业协同发展的解决方案。

3.2 统筹规划、系统修复

针对云南高原生态问题的复杂性,充分考虑生态地质环境分异特征,以流域为单元,立足修复区的资源与环境和经济社会条件,依据各生态要素的内在联系与物质和能量转换规律,统筹规划,实行整体保护、综合治理、系统修复。以高原湖泊为例,应研发流域生态系统评价与监管技术,定期开展生态健康诊断、安全评估与生态风险预测预警技术,研究受损生态空间的保护保育和服务功能提升技术,关键生物栖息地的生态重建技术,建立资源承载力的可持续维持机制和利用方向。同时,还应关注湖泊流域对城市发展的生态支撑作用,建立城镇与生态的耦合机制与一体化管理对策,满足城镇发展与生态保护的需求^[31]。

3.3 坚持保护优先、自然修复为主的方针

鉴于生态地质环境的脆弱性,首先应做好生态保护,尽量避免对脆弱生态系统的干扰和破坏,以免带来难以修复的困难局面。以高寒山区为例,应平衡“保护”与“发展”的关系,针对已经退化的生态系统研究专项的恢复技术,消除胁迫因子,按照“尊重自然、顺应自然”的理念,以近自然的方式逐步恢复生态系统,避免过度人工干预;研究生态衍生产业链,开发相关生态产品,实现经济社会生态共赢。同时,要构建普适性生态系统生产和生态功能提升的综合管理模式并持续进行跟踪监测评价,提出相关的解决方案,确保生态系统的服务功能不下降。

3.4 加强国土空间规划的统筹协调、引领指导

根据地球系统科学、可持续发展理论、基于自然的解决方案和有关应用科学的原理和方法,在国土空间规划中加强资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价,充分识别生态脆弱国土空间的分布范围、程度,综合考虑降水分布、植被覆盖度、人工干扰度、生物多样性维护功能重要性、水土保持功能重要性、水源涵养等因素,开展恢复力评价。干热河

谷区,应重点研究植被恢复与稳定技术、土壤改良技术、水土资源综合利用技术、生物资源开发和特色生态产业技术;高山峡谷区应围绕生物多样性格局形成和维持机理,研发生物多样性综合保育与恢复等技术体系、退化栖息地重建技术,构建生态承载力、生态预警模型、制订地质环境安全评估体系,充分发挥其生态屏障的作用。

4 结论与展望

(1)云南高原地质背景复杂,喜马拉雅造山运动致使高原大幅度隆升,新构造运动剧烈,断块差异升降强烈。经内外动力地质作用的长期塑造,形成了区间差异显著、多样性和脆弱性突出的现代生态地质环境格局。

(2)云南高原可划分出岩溶石山、高原湖泊、干热河谷和高寒山地四类脆弱生态地质环境类型,各类型分布区地质环境稳定性差,内外动力地质作用强,自然资源时空分布不均,生态地质环境对外界干扰敏感、自我恢复能力弱,自然和人为影响因素复杂多元,生态损毁严重,石漠化、水土流失、旱涝灾害、地质灾害易发高发。

(3)高原生态保护和修复应认真调查研究和遵循自然和经济规律,统筹规划、系统修复,坚持保护优先、自然修复为主的方针,加强国土空间规划的统筹协调、引领指导。

(4)文中生态地质环境脆弱性分析主要考虑地质因素,但其脆弱性与人类活动如土地开发利用、气候变化、环境污染等密切相关,脆弱性的研究需跨学科合作,以不断提高研究的系统性和综合性,未来工作可将生态学、地理学、地质学进行融合,进一步拓宽研究的内容指标。

参考文献

- [1] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.
YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 98-100.
- [2] 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 877-893.
PENG Jianbing, LAN Hengxing. Ecological geology and eco-geological environment system[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 877-893.
- [3] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支撑[J]. 中国地质, 2001, 28(11): 20-24.
HUANG Runqiu. Basic characteristics and technical support of eco-environmental geology[J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(11): 20-24.
- [4] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.
YANG Mingde. On the fragility of karst environment[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1990, 2(1): 21-29.
- [5] 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.
- [6] 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, China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(3): 134-139.
- [7] 吕文凯, 周金星, 万龙, 关颖慧, 刘玉国, 肖桂英, 丁玉雄, 刘发万. 滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 341-351.
LYU Wenkai, ZHOU Jinxing, WAN Long, GUAN Yinghui, LIU Yuguo, XIAO Guiying, DING Yuxiong, LIU Fawan. Evaluation of water resources vulnerability in karst faulted basin of eastern Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 341-351.
- [8] 王宇, 康晓波, 柴金龙. 云南高原地质灾害发育规律及防治技术序列研究报告[R]. 昆明: 云南省地质调查局, 2022.
- [9] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 933-938.
WANG Yu, ZHANG Gui. On the desertification and genesis of karst stone mountain area in east Yunnan[J]. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(6): 933-938.
- [10] 韦复才, 周游游. 西南岩溶区生态地质环境特点及其重建策略[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 282-287.
WEI Fucai, ZHOU Youyou. Geologic environmental features and ecologic rehabilitation in Southwest China karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(4): 282-287.
- [11] 刘春, 吕殿青, 陈洪松, 聂云鹏. 中国西南岩溶地区生态环境脆弱性及成因分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(2): 49-53.
LIU Chun, LYU Dianqing, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng. Causes for the eco-environmental vulnerability of the karst areas in Southwest China[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2014, 25(2): 49-53.
- [12] 李玉辉, 冯正清, 俞筱押, 马遵平. 云南石林公园植被重大变化与意义[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 212-219.
LI Yuhui, FENG Zhengqing, YU Xiaoya, MA Zunping. Eventful changes of the vegetation in Shilin national park and its sig-

- nificance[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 212-219.
- [13] 蒋忠诚, 夏日元, 时坚, 裴建国, 何师意, 梁彬. 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 495-502.
- JIANG Zhongcheng, XIA Riyuan, SHI Jian, PEI Jianguo, HE Shiyi, LIANG Bin. The application effects and exploitation capacity of karst underground water resources in Southwest China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 495-502.
- [14] 孙家聪. 云南省主要构造体系的初步划分及其特征[J]. *昆明工学院学报*, 1988, 13(3): 64-78.
- SUN Jiacong. Primary division and feature of major structural systems in Yunnan[J]. *Journal of Kunming University of Technology*, 1988, 13(3): 64-78.
- [15] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 114-119.
- WANG Yu. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 114-119.
- [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 zonation of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.
- [17] 张程鹏. 基于 SWAT 模型的西南岩溶区旱涝特征分析[D]. 北京: 中国地质科学院, 2021.
- ZHANG Chengpeng. Analysis the characteristics of drought and flood in karst area of Southwest China based on SWAT model[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2021.
- [18] 胡兆鑫, 罗为群, 蒋忠诚, 吴泽燕, 汤庆佳. 基于生态系统脆弱性评价的典型岩溶区生态治理分区[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(3): 661-671, 703.
- HU Zhaoxin, LUO Weiqun, JIANG Zhongcheng, WU Zeyan, TANG Qingjia. Zoning of ecological treatment in typical karst areas based on ecosystem vulnerability assessment[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(3): 661-671, 703.
- [19] 卢泓杏, 赵宇鸾. 基于生态安全格局的岩溶山地国土空间生态修复关键区识别: 以贵州省关岭县为例[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 349-363.
- LU Hongxing, ZHAO Yuluan. Identification of key areas for the ecological restoration of karst mountainous territorial space based on the construction of ecological security pattern: A case study of Guanling, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 349-363.
- [20] 宁静, 杨磊, 曹建华, 李亮. 基于文献计量分析的岩溶区植被恢复研究现状与热点[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 321-336.
- NING Jing, YANG Lei, CAO Jianhua, LI Liang. Bibliometric analysis of the current research focus on vegetation restoration in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 321-336.
- [21] 丁剑宏, 陈奇伯, 陶余铨, 黎建强. 云南省土壤侵蚀分布特征及动态变化[J]. *西部林业科学*, 2018, 47(6): 15-21.
- DING Jianhong, CHEN Qibo, TAO Yuquan, LI Jianqiang. Dynamic change and spatial characteristics of soil erosion in Yunnan Province[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2018, 47(6): 15-21.
- [22] 王宇, 张贵, 柴金龙. 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.
- WANG Yu, ZHANG Gui, CHAI Jinlong. The serious environmental geological problems and countermeasures in karst area of Yunnan province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013.
- [23] 赵珂, 饶懿, 王丽丽, 刘玉. 西南地区生态脆弱性评价研究: 以云南、贵州为例[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 38-42.
- ZHAO Ke, RAO Yi, WANG Lili, LIU Yu. Evaluation of Ecological Fragility in Southwest of China [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(2): 38-42.
- [24] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. *地理科学*, 2002, 22(3): 365-370.
- LI Yangbing, HOU Jianyun, XIE Deti. The recent development of research on karst ecology in Southwest China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 365-370.
- [25] 种国双, 海月, 郑华, 徐卫华, 欧阳志云. 中国西南喀斯特石漠化治理现状及对策[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(11): 38-43.
- CHONG Guoshuang, HAI Yue, ZHENG Hua, XU Weihua, OUYANG Zhiyun. Current situation and measures of karst rocky desertification control in Southwest China[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(11): 38-43.
- [26] 卢涛, 张军, 胡文项. 滇东喀斯特地区石漠化时空演化特征及驱动机制研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(4): 418-427.
- LU Tao, ZHANG Jun, HU Wenxiang. Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of rocky desertification in karst area of eastern Yunnan[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4): 418-427.
- [27] 李芹, 王宇, 李笠, 张华, 王波. 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.
- LI Qin, WANG Yu, LI Li, ZHANG Hua, WANG Bo. Ecological restoration scheme of lake basins on the karst plateau based on natural solution: Take nine lakes on the Yunnan Plateau as example[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 391-401.
- [28] 沙毓沧, 纪中华, 李建增, 方海东, 杨艳鲜, 廖承飞, 黄兴奇. 西南地区干热河谷生态环境问题[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(Suppl.1): 312-318.
- SHA Yucang, JI Zhonghua, LI Jianzeng, FANG Haidong, YANG Yanxian, LIAO Chengfei, HUANG Xingqi. Ecological problems of dry hot valley in China Southwest[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(Suppl.1): 312-318.
- [29] 赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊. 云南干热河谷生态环境特性研究[J]. *林业调查规划*, 2006, 31(3): 114-117.

- ZHAO Lin, LANG Nanjun, ZHENG Ke, PENG Mingjun. A study on eco-environmental characteristics of dry and hot valley of Yunnan Province[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(3): 114-117.
- [30] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- YU Bohua, LYU Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [31] 韩融. “流域治理—固碳增汇”耦合协同的实践形态与优化策略: 基于云南省抚仙湖流域治理的案例研究[J]. *云南行政学院学报*, 2023, 25(5): 117-127.

Types and characteristics of vulnerable eco-geological environments on the Yunnan plateau and countermeasures for ecological restoration

LI Qin^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,4}, ZHANG Hua^{1,2,3}, CHAI Zhengjiao^{1,2,3}, XIONG Bo⁵

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

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological 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. Yunnan Institute of Land and Resources Planning and Design, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract The geological background of the Yunnan plateau in the study area is complex, with significant uplift caused by the Himalayan orogeny, intense neotectonic movements, and pronounced variations in fault block elevation. The long-term shaping of internal and external dynamic geological processes has formed a modern ecological geological environment pattern with significant regional differences, diversity, and vulnerability. Therefore, the study of ecological vulnerability in high-altitude mountainous areas has always been an important issue facing the construction of ecological civilization in Yunnan Province. Currently, there are limited achievements in vulnerability research for specific regions within the province, and there is a lack of regional, comprehensive, and systematic research and analysis throughout the province. In order to improve the scientific compilation of national spatial planning and ecological restoration planning, as well as the feasibility and effectiveness of various restoration and governance projects, it is necessary to strengthen the investigation of ecological geological environment. Additionally, it is essential to enhance the identification and diagnosis of ecological problems, highlighting the importance of understanding these problems through the lens of nature principles, local conditions, and systematic restoration efforts.

This article aims to systematically analyze the vulnerability characteristics of the ecological geological environment on the Yunnan plateau from the perspective of land and space protection and restoration in Yunnan Province. The manifestations of vulnerability are thoroughly analyzed, including geology, geomorphology, surface material composition, meteorological and hydrological characteristics, ecological patterns, etc. Based on the sensitivity of the ecological geological environment to external interference and limited self-recovery ability, four typical types of vulnerable ecological environments are identified: karst rocky mountains, plateau lakes, dry-hot valleys, and high-altitude mountainous areas. The karst rocky mountains experience severe soil erosion and water leakage, characterized by slow soil formation, limited growth, a scarcity of suitable tree species, simplistic communities, and a widespread shortage of surface water. The selection of ecological restoration models should be based on in-depth investigation and evaluation, as well as tailored plans. The plateau lakes exemplify a basin economy characterized by low carrying capacity for both resources and environment, and by both waterlogging and drought. Any adverse environmental effects resulted from ecological damage and pollution in the surrounding areas can be directly transmitted to plateau lakes through runoff, resulting in a focusing effect. The dry-hot valleys experience drought and water scarcity, with prominent water-heat contradictions. The ecological geological environment is vulnerable, and natural disasters occur frequently. There are intense soil erosion, soil degradation, and low productivity, leading to economic backwardness. Besides, agricultural, animal husbandry, and mining activities are extensive. In the high-altitude mountainous areas, the mountains are steep with intense erosion and denudation, resulting in thin and scattered soil layers. The biological

conditions for plant growth are poor, and there is a strong trend towards desertification in the natural process. The ecological geological environment is vulnerable, with a high incidence of geological disasters. Human restoration is difficult and lacks sustainability.

By analyzing and understanding the complex geological background, intense neotectonic movements, and the resulting vulnerability characteristics of the ecological geological environment, as well as addressing common problems and deficiencies in ecological restoration practices, we have proposed the following steps for the protection and restoration of plateau ecosystems. Firstly, we should conduct thorough research and investigation, adhering to natural and economic laws. We should carry out comprehensive and scientific research to identify the ecological geological environment and resource conditions, starting from the diversity of the ecological geological environment. We should also reveal the inherent connections and succession patterns of the ecosystem, accurately identify ecological problems, and enhance the specificity and effectiveness of ecological restoration. Secondly, we should plan the restoration in an integrated and coordinated manner and carry out the planning systematic, fully considering the differentiation of ecological geological environment. Taking the watersheds as units and considering the resources, environmental factors, and economic and social conditions of the restoration areas, we should implement comprehensive planning. This planning must align with the inherent connections among ecological elements and the principles governing material and energy transformation. Our goal is to ensure overall protection, integrated management, and systematic restoration. Thirdly, we must adhere to the principle of prioritizing protection while focusing on natural restoration. Given the vulnerability of the ecological geological environment, we should prioritize effective ecological protection by minimizing interference and destruction to vulnerable ecosystems, thereby avoiding situations that are difficult to remediate. Fourthly, we should enhance the overall coordination and guidance of national land space planning. Grounded in the principles and methods of earth system science, sustainable development theories, nature-based solutions, and relevant applied sciences, we must improve the evaluation of resources and environmental carrying capacity, as well as the suitability of national land space development within national spatial planning. This process involves thoroughly identifying the distribution and extent of ecologically vulnerable national land space, with the comprehensive consideration of factors such as precipitation distribution, vegetation cover, human interference, the significance of biodiversity conservation, and soil and water conservation to conduct resilience evaluation.

Furthermore, this article proposes that while the analysis of ecological geological environment vulnerability primarily focuses on geological factors, vulnerability is closely related to human activities such as land development and utilization, climate change, and environmental pollution. Research on vulnerability should be an interdisciplinary collaboration to enhance its systematic nature and comprehensiveness. In future endeavors, the integration of ecology, geography, and geology can further broaden the content and indicators of research, thereby providing a scientific foundation for formulating more targeted policies.

Key words ecological vulnerability, karst rocky mountain, plateau lakes, dry-hot valley, alpine area, ecological restoration, the Yunnan plateau

(编辑 黄晨晖)