

张华, 彭淑惠, 王宇, 等. 云南高原岩溶环境地质问题及修复治理难度分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1235-1247.

DOI: 10.11932/karst20240602

云南高原岩溶环境地质问题及修复治理难度分析

张华^{1,2,3}, 彭淑惠^{1,2,3}, 王宇^{1,2,4}, 王波^{1,2,3}, 高瑜^{1,2,3}, 李芹^{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)

摘要: 云南高原岩溶区海拔高, 地形地貌丰富多样, 气象与水文条件多变, 内外动力地质作用强烈, 加之人类活动强烈, 地质环境受到不合理的开发和改造, 产生了诸多与自然资源及环境密切关联的岩溶环境地质问题。主要有石漠化、内涝及干旱、地下水污染、泉水疏干、湿地生态环境恶化、岩溶地质灾害等。由高原岩溶区地质环境的脆弱性、复杂性所决定, 各类环境地质问题修复治理难度大, 修复治理的成效参差不齐, 主要原因可归纳为岩溶地质环境问题产生的自然与社会因素复杂多变, 自然资源承载力较低, 地质环境容量有限, 生存发展与环境保护协调困难, 岩溶环境地质问题修复治理对经济和技术要求高等。文章针对各种岩溶环境地质问题, 深入分析修复治理的具体难点和原因, 并研究提出了解决问题的对策建议, 从而为生态保护和修复提供了解决问题的方向和科学依据。

关键词: 生态环境; 石漠化; 水污染; 湿地退化; 地质灾害

创新点: 利用多年水文地质及环境地质调查成果, 从数据分析→案例剖析→原因分析→理论总结, 系统研究了产生岩溶环境地质问题的原因、危害及机理, 全面梳理云南岩溶环境地质问题修复治理难度, 并提出建议措施。

中图分类号: P642.25; X14 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1235-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶环境地质问题是指在岩溶脆弱环境条件下, 由自然因素和不合理的人类活动所引起的环境地质问题^[1-4]。在云南岩溶区开展了许多水文地质及环境地质调查项目^[5-7]。1999—2014年开展新一轮国土资源大调查工作以来, 云南岩溶石山地区环境地质与水文地质调查研究工作有序推进, 对岩溶环境地质问题进行了系统的调查研究。开展了“西南岩溶石山地区滇东—攀西片区地下水资源勘查与生态环境地质调查”、“云南岩溶石山地区地下水资源勘查”

项目, 主要针对石漠化、水污染、岩溶干旱、内涝、泉流减小、岩溶塌陷等生态环境地质问题作了调查分析, 尤其是对石漠化现象首次进行了系统的调研。编著了云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策, 通过典型点的剖析, 归纳了问题的特征, 揭示了形成条件、诱发因素。首次对云南开展地下水有机污染调查, 针对各类重大环境地质问题的防治, 提出了综合对策及专项措施建议。除了区域上的调查工作外, 也开展了一些局部的研究工作, 如泉水疏干、湿地生态、水污染等岩溶环境地质问题的专项调查^[8-12]。此外, 全省县(市、区)域地质灾害调查与区划和县(市、

基金项目: 国家重大研发计划项目课题(2016YFC0502502); 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金专项(KDL202101)

第一作者简介: 张华(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质及生态地质研究。E-mail: ynddysghs.zhh@163.com。

通信作者: 王宇(1960—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工环、灾害及生态地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2024-01-01

区)地质灾害详细调查也为此次研究提供了详细的灾害地质资料。环境地质问题修复治理难度是指在不利自然及社会因素制约和影响下,开展环境地质问题修复治理和管理维护的经济技术难易程度。目前针对岩溶环境地质问题及修复治理难度研究现状主要是喀斯特石漠化修复的问题与对策、岩溶地区石漠化防治总体形势与策略分析、石漠化山地退化土壤生态修复^[13-14];内涝主要研究成因分析与防治对策^[15-16];干旱研究岩溶干旱特征及综合治理对策、干旱时空演变及其影响因素^[17-18];水污染研究岩溶地下河区污染场地修复治理、污染修复技术评价方法、矿山地下水污染及修复技术的现状及趋势^[19-20];湿地研究湖泊湿地的生态修复技术、基于 CiteSpace 分析的湿地恢复技术、湿地退化与恢复研究^[21-22];岩溶塌陷研究岩溶地面塌陷进展与展望、基于因子分析的 GA-ELM 模型岩溶地面塌陷预测、动态演化数值模型^[23-24]等等。本文以水文地质学、环境地质学和生态学理论为指导,基于大量翔实的调查资料,系统归纳分析云南高原石漠化、内涝及干旱、地下水污染、泉水疏干、湿地生态环境恶化、岩溶地质灾害等岩溶环境地质问题及修复治理难度,旨在为生态修复治理提供研究方向和科学依据。

1 主要岩溶环境地质问题

1.1 石漠化

据相关石漠化遥感调查数据,2020 年云南省的石漠化总面积为 2.48 万 km²,占岩溶区面积的 26.41%。其中,重度石漠化面积占比 69.46%;中度石漠化面积占比 20.72%;轻度石漠化面积占比 9.82%^[25]。滇东及滇东南岩溶石山区石漠化连片分布面广,西部岩溶区多呈片状和带状分布,高原岩溶中山、高山及峡谷区是重度石漠化较为集中分布的地区。滇东及滇东南岩溶石山区以南洞地下河流域为例,据调查统计数据和遥感解译显示,全流域石漠化面积达到 641.48 km²,占岩溶分布面积 73.69%。从地层岩性来看石漠化发生率,灰岩略高于白云岩,均匀状的纯碳酸盐岩高于夹(互)层型。从地形地貌来看,轻度石漠化主要分布于溶丘、峰丛洼地及岩溶低山槽谷区,重度、中度石漠化主要分布于盆地外围地形起伏度较大的岩溶石山区。滇西石漠化突出的特点是高海拔碳酸盐岩地区的石漠化,由于新构造上升运动强

烈,高于 3 000 m 的高、中山受积雪,融冻风化作用影响强烈,植物不能生长,自然形成石漠化,滇西北地区海拔 3 000 m 以上的地区石漠化面积 3 841.5 km²,占滇西北地区石漠化面积的 68.52%(图 1)。

20 年来,云南高原石漠化的发展趋势经历了从加剧到经治理转减弱的过程,其间,2000—2010 年滇西及滇西北石漠化整体趋势不变,局部地区出现恶化。滇东地区石漠化分布面积广,呈现恶化趋势的区域较多,尤以文山州较为突出,2010—2020 年全省石漠化程度均得到较好改善,滇西呈轻微好转,云南石漠化面积变化情况见表 1^[26-27]。

云南高原石漠化形成的基本条件主要与岩土体特征、地形地貌、水文气候条件及植被群落结构密切相关,其发展变化受人为活动的影响较大。岩溶石山区地形地貌类型复杂多样,地形陡峻,内外营力地质作用强烈,系统内水土资源易流失,降低了生态环境系统的抗干扰能力。岩溶石山区温差变化大,降水量时空分配不均,水热不匹配,不利于植物生长,群落结构简单,植被破坏后难恢复,易产生石漠化。石漠化受人为因素影响较大。一是人口增长,土地过度开发,历史上曾经大量砍伐树林,过度放牧、开垦坡地等,造成土石裸露,是石漠化产生的首要影响因素;二是强烈采矿,大量燃煤,滇东岩溶盆地区、滇东南的蒙自、个旧、开远等地受工业活动影响强烈区恰是石漠化严重的地区,矿区剥采造成基岩裸露,矿产采选冶产生的有毒有害成分造成植被死亡,从而加剧了石漠化。各类工程活动对石漠化的形成发展也有着不可低估的影响力。

1.2 内涝及干旱

高原岩溶区旱涝灾害频繁,涉及面广,具有显著的季节性和周期性。交替出现的旱涝灾害使得岩溶区生态环境变得异常脆弱^[28]。高原岩溶区的内涝和干旱分布表现出明显的地方性特征,干旱灾害主要发生在地势较高的山地和丘陵区域,而内涝则更常发生在地势较低的山间河谷、盆地和洼地中。云南高原岩溶区易涝的耕地共计 265.84 万 hm²,占全省当年易涝耕地面积的 60.39%,其中滇东岩溶区易涝耕地总面积达到 227.01 万 hm²。

云南高原岩溶区的灾情主要呈现以下特点:(1)从出现时间上看,内涝多发生在 6—8 月的降雨高峰期,干旱则多出现在冬、春两季。(2)从空间分

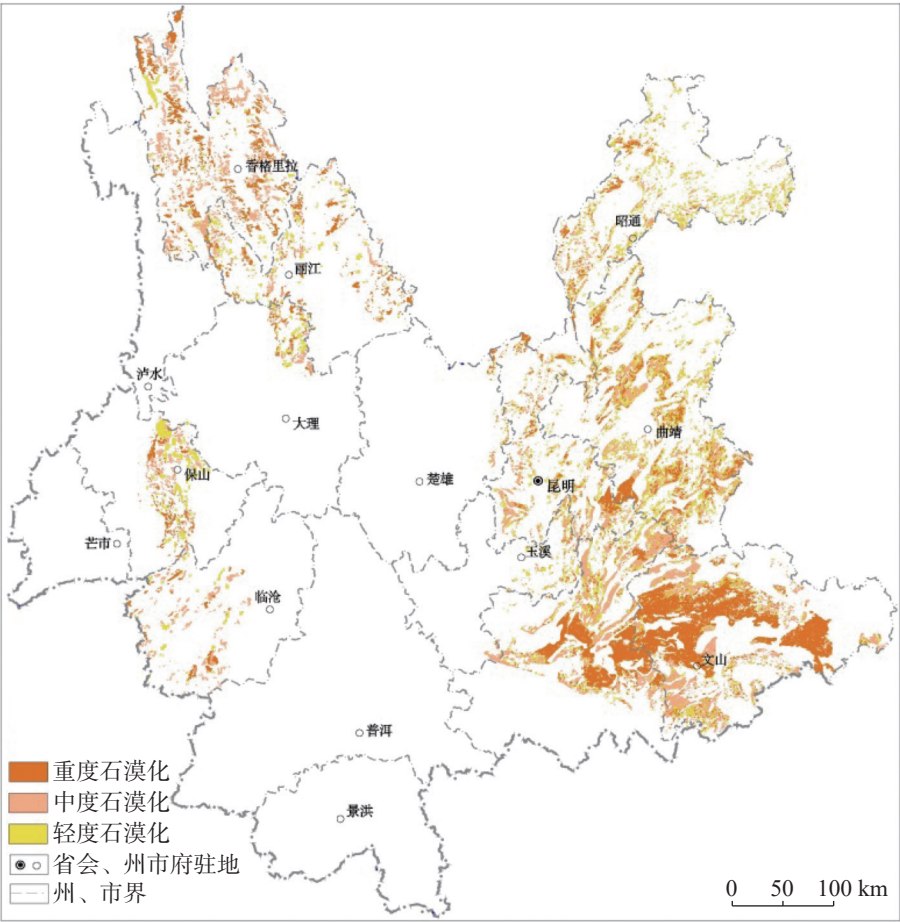


图 1 云南省石漠化分布图
Fig. 1 Distribution of rocky desertification in Yunnan Province

表 1 近 20 年云南石漠化面积变化
Table 1 Changes of rocky desertification area in Yunnan Province in recent 20 years

石漠化等级	石漠化面积/hm ²		
	2000年	2010年	2020年
轻度石漠化	3 849.05	4 402.55	2 438.54
中度石漠化	5 644.20	4 976.98	5 140.92
重度石漠化	27 458.00	24 354.24	17 242.36
合计	36 951.25	33 733.77	24 821.82

布特点上看,旱涝灾情主要集中在滇中、滇东岩溶区,以滇东最为突出。据相关年鉴统计,2018 年全省共发生洪涝灾害 342 县次,其中 5—8 月多次出现大范围强降雨,造成多地出现暴雨洪涝、城市内涝灾害。干旱分布范围广,平均每年都有 50 多个县(市、区)发生程度不同的干旱,滇东岩溶区较多。1950—2010 年的 61 年间,共出现 57 次早年,位于岩溶区的东川、蒙自、陆良、文山、砚山等县(市、区)则年年发生干旱(图 2)。(3)岩溶区的旱涝灾情比非岩溶区

出现频率高。(4)旱涝交替频发,枯水期水资源匮乏,导致独特的岩溶干旱,甚至人蓄饮水困难;雨季持续降雨,落水洞很容易被洪水所携带的泥沙、枯枝落叶等堵塞,酿成岩溶内涝^[29]。

云南高原岩溶地区内涝和干旱灾害的成因复杂且影响因素众多,旱涝灾害发生的主要原因如下:(1)降雨时空分布不均。云南属于低纬热带和副热带的季风区域,由于地形复杂多变,山脉高耸,河谷深切,大气环流和季风影响显著,形成了独特的半年干旱、半年多雨的气候类型^[30]。(2)入渗系数高。在碳酸盐岩裸露区,岩溶发育植被少,降水极易快速下渗,入渗系数较高,在 0.3~0.5 之间,而裸露的峰丛洼地区,入渗系数高达 0.5~0.6,导致地表严重干旱缺水^[31]。(3)岩溶区复杂的水循环系统结构导致水利工程建设困难。岩溶区地表和地下水系统多层结构,岩溶发育的不均匀性和自然环境条件的复杂性,导致水资源在时空分布上极不均匀,水文动态变化剧烈,水利工程建设投资成本较高。(4)土被保水性差。

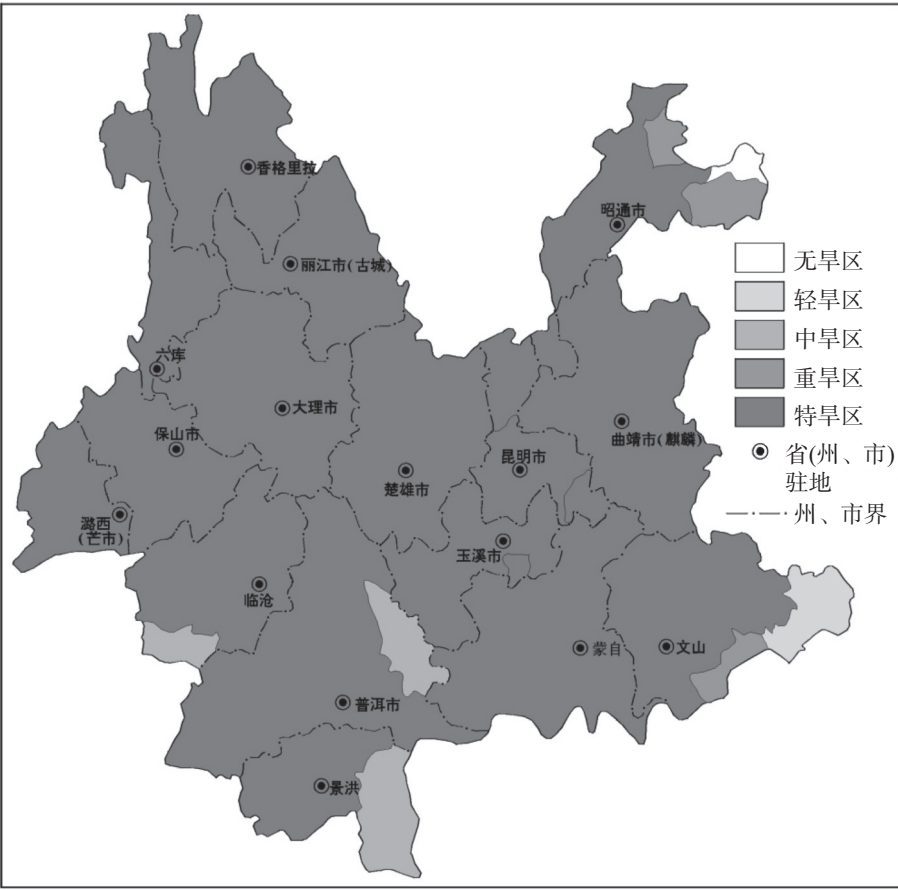


图 2 2010 年 5 月 13 日云南旱情实况图

Fig. 2 Drought situation in Yunnan on May 13, 2010

生态恶化主要是由于森林砍伐和不合理的开垦方式等人类活动导致的,进而加剧地表径流和水土流失,不仅降低了地下水的补给调节能力,还导致泉水流量减少甚至断流,进一步加重干旱缺水。(5)水资源利用率低。云南高原岩溶区水资源时空分布不均,部分地区水资源从总量上讲并不缺,但由于时空分布不均,多数难以利用或利用率低。

1.3 地下水污染

由于地下水类型、污染防治性能及污染源的不同,污染程度存在较大差异。一般情况,孔隙水受污染最重,水质最差,为中等—重污染,主要分布于盆地中部,超标项主要有亚硝酸盐、氨氮、铁、锰等,污染较重区域为昆明、曲靖、开远、蒙自、个旧等地,多为较差—极差级。岩溶泉污染程度较轻,水质以良好和较差为主,多呈点状或岛状分布,超标项主要有氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、氯化物、锰、锌等。不同类型岩溶水受污染程度也不同,地下河最易污染,污染程度最高,泉点次之,富水块段最低。裂隙水大多

分布于山区,整体受污染程度最低,水质最好。云南高原岩溶水、裂隙水水质明显优于孔隙水,枯水期水质普遍优于丰水期,锰、氨氮、硝酸盐、氯化物为引起水质超标的主要因子。随着社会经济的发展及人类活动加剧,地下水污染具有由点向面演化,由局部向区域扩散,由城市向农村蔓延,污染组分数量和类型有所增加,危害程度有所加重的趋势和特征。

造成地下水污染最直接、最主要的因素为污染源和污染方式。污染源包括工业污染源、农业污染源、生活污染源。工业污染源主要为工业“三废”,污染源多以点状、小片状分布,污染物以金属、重金属为主;农业污染源主要为农业活动中施用农药、化肥、牲畜粪便及农副产品加工排污等;生活污染源大都来源于城镇生活污水和垃圾,是最普遍的污染类型。

据污染源、含(隔)水层埋藏分布及导水空间特征,地下水的污染方式归纳为 3 种:渗入污染、灌入污染、越流污染。其中,灌入污染具有通道规模大,流量大、流速快,造成污染程度严重、危害大的特点;其它两种污染模式的污染速度较慢,但一旦受污染,

恢复治理难度较大。

灌入污染: 污染物随大气降水或地表水通过落水洞、漏斗等通道迅速灌入地下河, 造成地下水污染, 这种污染通道规模大, 水流集中、快速, 基本不能起到吸附、过滤及沉淀污染物的作用, 造成的污染速度快, 影响广, 危害大^[32]。如蒙自盆地东缘黑龙潭暗河, 暗河呈 NW-SE 向展布, 地势南东高、北西低, 南东部补给区有一冶炼厂, 主要生产铜、锌等有色金属。冶炼厂矿渣堆场处发育一落水洞, 矿渣淋漓液及冶炼产生的废水等通过落水洞、漏斗等岩溶通道, 直接灌入地下含水层, 造成镉、锌、耗氧量、砷、铅等多种元素超标(图 3), 严重污染地下水。

渗入污染: 主要发生于孔隙和裂隙含水层。污染物随降雨或地表径流等通过孔隙、裂隙渗透进入含水层, 弥散式扩散污染地下水^[33], 污染速度和强度随导水通道的大小、密集程度及距离长短而发生变化。这种污染水流面广且较缓, 含水介质对污染物有一定的吸附、沉淀降解作用, 但减缓污染物扩散、迁移的能力弱, 造成污染速度较慢。

越流污染: 上覆松散孔隙含水层和下伏岩溶含水层构成双层水文地质结构系统, 受污染的上覆孔隙含水层中的地下水通过不同组分和水理性质分层之间的界面, 以越流渗漏的方式进入下伏岩溶含水层中, 从而造成岩溶地下水污染。这种污染方式越流速度缓慢, 呈渐进性发展, 又因覆盖层吸附和降解较强, 污染强度较低、速度较慢。

1.4 泉水疏干

岩溶石山地区泉水疏干多伴随区域地下水位下降而出现, 区域地下水位下降主要发生在地下水开

采量较大的盆地区、矿山开采区及工程隧道开挖周边, 主要由隧道开挖、矿山排水及过量开采地下水等人类工程活动所引起。

高原山区新建铁路、公路、引水隧道较多。开挖隧道对含水层造成破坏, 排水降低了地下水位及排泄基准面, 形成以隧道中轴线为中心向两侧延伸一定范围的水位降落带, 产生线状区域地下水位下降的情况较普遍, 导致地下水排泄区原有的泉水、暗河发生流量减小甚至断流。较典型的有海杞麓湖调蓄水隧道、泛亚铁路(玉溪—蒙自线)通海段隧道(图 4)、个旧—大屯公路隧道、安楚高速公路大红田隧道等。以通海杞麓湖调蓄水隧道为例, 该隧道总长 9.97 km, 排水量 $2.208 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 排泄基准面降低了 25~80 m, 沿线 13 个泉水流量较施工前明显减小。在矿山采掘中, 疏排水常使得影响范围内的地下水位降低, 导致泉水、暗河流量减小甚至断流。易门铜矿矿山开采方式为地下坑采, 矿坑顶、底板和含矿层为昆阳群落雪组(Pt_1l)和绿汁江组(Pt_1z)白云岩、含铜白云岩, 富水性中等—强。矿区历史上有多个岩溶泉, 泉口标高 1800~2100 m, 矿山开采标高 1600~1900 m, 矿区开采破坏含水层, 改变了地下水场, 导致全区 29 个泉水枯竭, 8 个流量明显减小。

造成岩溶石山地区泉水流量减小甚至断流的原因主要是人为因素, 其次是全球气候变暖, 降水减少等因素。一是植被破坏严重, 开发建设和垦殖等人类活动造成植被破坏, 水土流失急剧, 表层带涵养降水能力减弱; 二是人类工程活动影响, 公路、铁路、水利隧道、采矿开凿及地下空间开发等往往涉及施工排水, 从而导致泉水流量骤减甚至断流; 三是过量

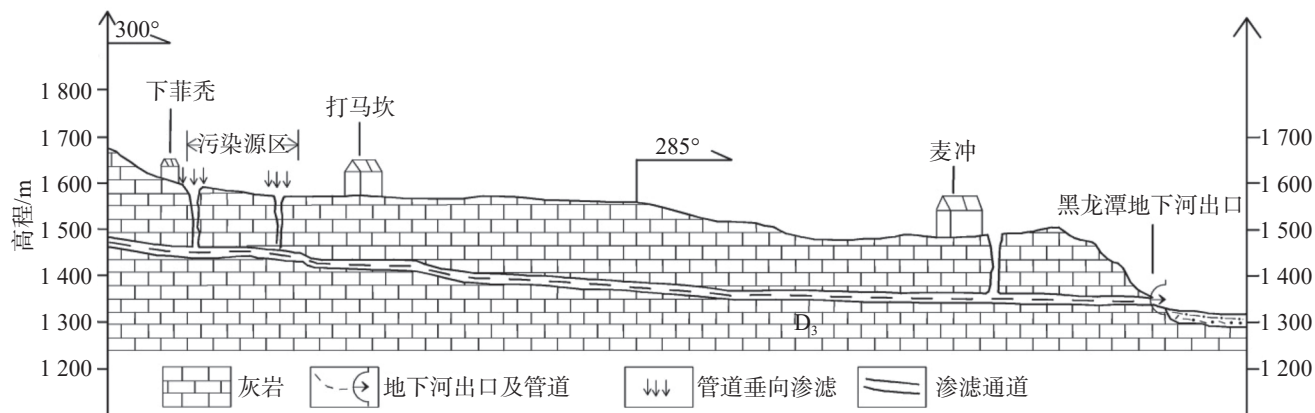


图 3 蒙自黑龙潭暗河环境水文地质图

Fig. 3 Environmental hydrogeological map of Heilongtan underground river, Mengzi

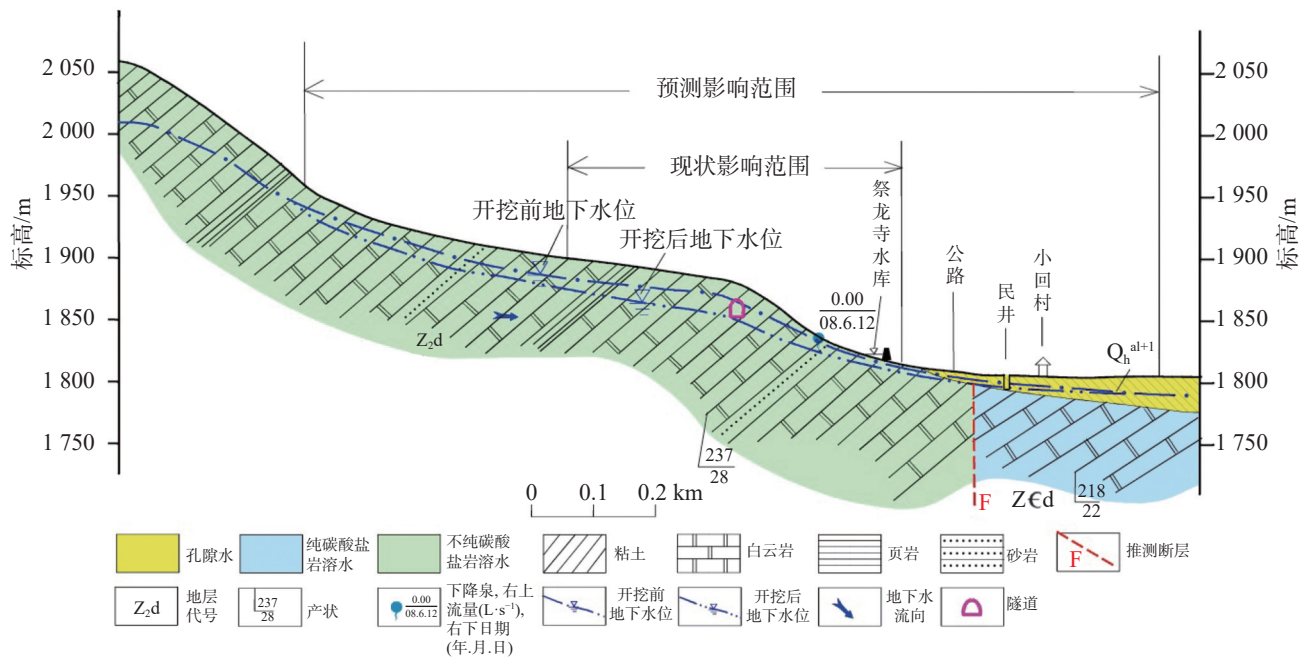


图4 泛亚铁路玉溪—蒙自线通海段隧道开挖疏干小回村泉水水文地质剖面图

Fig. 4 Hydrogeological profile of Xiaohuicun spring during tunnel excavation of Tonghai section of Yuxi-Mengzi line of Trans-Asian Railway

开采地下水,在盆地区一般用水量较大,过量长期抽取地下水,极易形成降落漏斗,直接导致区域地下水位下降,由于岩溶区含水层连通性较好,极易发生并采袭夺泉水的情况,使泉水断流或减小。四是全球气候变暖已经影响到原有降雨模式,降水动态、形式变化及局地减少使得整个径流动态变幅加大,使地下水有效补给减少,地下水位下降,泉流量衰减。

1.5 湿地生态环境恶化

云南高原湿地主要分布于湖盆区湖滨地带,由于生态环境变化及人类活动双重影响,水源时空分布及水循环过程均有所变化,湿地面积正不断萎缩,生态服务功能日愈退化甚至丧失,由此产生了一系列生态环境问题。生态环境因素包括地貌改变、气候变化和水文的波动等。人为影响包括对湿地过度围垦、旅游业的发展、超标污染物的排放、土地开发对水土资源的占用等。人类活动现已超越自然因素,成为影响湿地生态环境的主导力量。湿地生态系统退化主要表现为:湿地淤积,湿地面积萎缩,湿地抗干扰能力减弱、水污染、水源被调用导致生态用水不足、生物多样性减少,濒危物种增多等^[34]。以滇池流域为例,现今水域面积只是古滇池的24%,已处于老年期,自20世纪40年代以来,滇池水位不断下降,水域面积不断缩小,蓄水量也不断减少(图5)。滇池

退化的原因自然因素和人为因素兼而有之,主要是地壳差异抬升,沉积物和冲积物不断淤填湖床、淤堆湖岸,滇池出口被侵蚀和开凿降低。人们多年来不断疏浚海口河,快速加剧了滇池水域面积的缩小,使盆地内水陆格局发生巨大的改变,加速了盆地湿地系统环境脆弱性。水污染问题是破坏滇池流域湿地生态环境进而影响滇池水质的主要原因。随着城市扩张,生产生活排污、经济作物种植产生了大量的点、面源污染,对湖滨带湿生态危害严重,加剧了滇池水质恶化。历史上滇池水源被调用导致生态用水不足,在2007年以前滇池承担着昆明城市生产生活供水任务,滇池环湖工业提水量为1.10亿 m^3 ,滇池流域湿地与地表、地下水联系密切,历史上由于超采地下水,昆明地区地下水位大幅下降,最大降幅曾达到20 m。近几年的调水补水改变了这一状况,使其影响正在缓解和消退。由于滇池湖滨带湿地生态系统退化,使生物多样性减少,一些土著生物,如海菜花、滇池金线鱼、背角无齿蚌等成为濒危物种。

1.6 岩溶地质灾害

高原岩溶地质灾害主要为岩溶塌陷,主要分布在岩溶断陷盆地、槽谷、台地区。自然因素形成的塌陷主要由降雨、地震等外力作用引发,其规模小至中等,个别大型,呈面状、线状分布,密度大^[35]。如

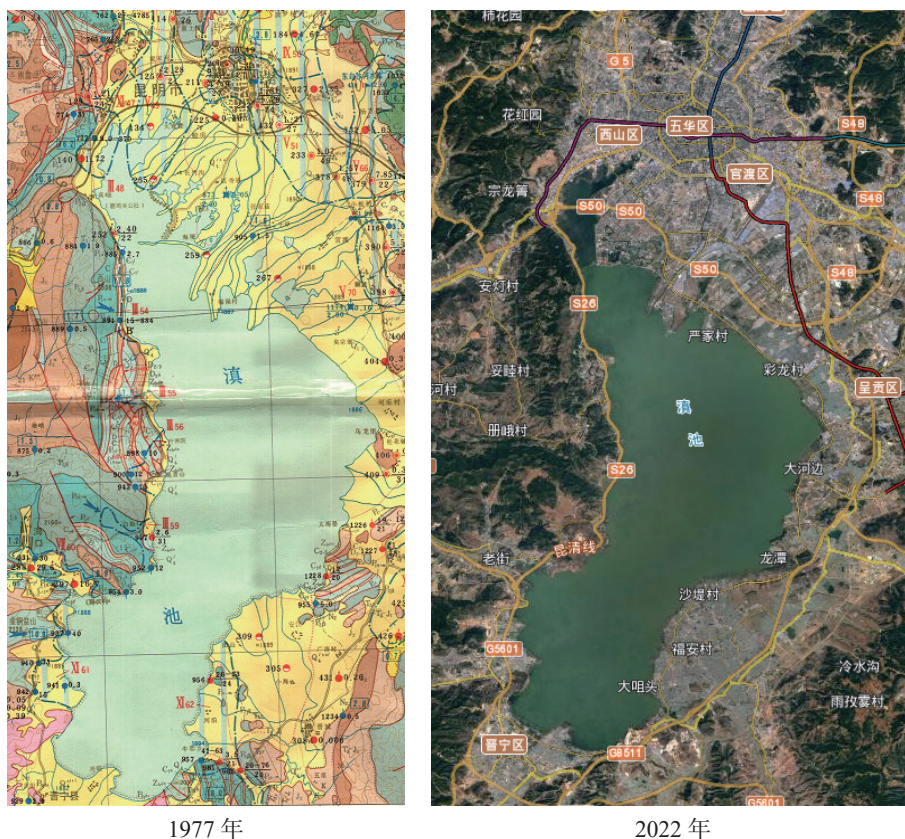


图 5 滇池 45 年水域变化图

Fig. 5 Variation of the water area of Dianchi lake in the past 45 years

2004 年 8 月 10 日,昭通市鲁甸县桃源乡发生 5.6 级地震,导致花鹿坪村四社塌陷。人为因素造成的塌陷主要是由于人类的工程建设活动,使岩溶洞穴及其上覆盖层的相对稳定状态发生改变,从而引起塌陷,规模小至中型,一般影响范围较广,连续片状发育,密度大,按其诱发因素分为地下工程诱发的塌陷、地下水超采诱发的塌陷、修建水库诱发的塌陷和矿山采空区塌陷四类。地下工程诱发的塌陷如翠湖、圆通山、连云宾馆一线,该区 1963 年修建人防工程以后,在 3.01 km^2 范围内形成了 116 个塌陷坑,至 80 年代末,地下水位降低 14 m 以上,形成降落漏斗^[36-37];地下水超采诱发的塌陷如螳螂川下石江地段,该水源地位于 1990 年 5 月 11 日做抽水试验,最大采水量是 $14271 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,最大降深 3.49 m,5 月 13 日晚抽水孔出浑水,在距抽水孔北东 $15^\circ 27.7 \text{ m}$ 处产生塌陷,其规模为直径 5.1 m 圆锥状,由于陷坑被泥水淹没(水位埋深 0.27 m),因此无法知道塌陷有多深。修建水库诱发的塌陷如鲁甸县砚池山小(一)型水库,水库建成后由于蓄水加载,库坝址段盖层整体下降,坝体沉陷,形成塌陷;矿山采空区塌陷是矿山常见的

环境地质问题,昭通盆地底部平坝区 1950—1979 年间因村民乱采乱挖褐煤形成陶瓷厂、望城坡、凤凰村等地段的采空区塌陷。

2 修复治理难度分析

2.1 石漠化综合治理

随着高程及地貌等国土空间格局的变化,石漠化的修复治理难度也存在差异。根据不同岩溶地貌类型,选取丽江、昆明、罗平、丘北 4 个县(市)分别代表岩溶中山高山、岩溶断陷盆地、岩溶丘峰槽谷、岩溶峰洼谷地 4 种典型岩溶地貌类型,预测分析石漠化治理效果。针对水土资源条件、外动力地质作用强度、水土流失的易发性、降雨和蒸发、水源漏失等气象和水文要素的变化对石漠化修复治理的影响,选择高程、降雨量、蒸发量、日照时数、径流深、入渗系数、地下水径流模数 7 项指标进行综合分析评价,典型岩溶区气象水文特征见表 2。

各评价指标采用极差变换法对原始数据进行规范化处理,并采用熵值法计算各项指标权重,加权综

表 2 云南高原典型岩溶区气象水文特征

Table 2 Meteorological and hydrological characteristics of typical karst regions in the Yunnan plateau

地貌类型	代表县 (市)	高程 /m	降雨量 /mm	蒸发量 /mm	日照时数 /h	径流深 /mm	入渗 系数	地下水径流模数 /L·s ⁻¹ ·km ⁻²
岩溶中山高山	丽江市	2360	970.7	1 799.3	2405.3	200	0.42	13.44
岩溶断陷盆地	昆明市	1886	1 011	1 867.7	2 197	150	0.37	13.18
岩溶丘峰槽谷	罗平县	1450	1 743.9	1 020.6	1 685.8	100	0.42	10.97
岩溶峰洼谷地	丘北县	1 500	1 162	1 298.9	1 898.3	80	0.20	11.64

表 3 云南高原典型岩溶区石漠化治理预期效果综合评价结果

Table 3 Comprehensive evaluation results of expected effects of rocky desertification control
in typical karst regions of the Yunnan plateau

代表县(市)	高程/m	降雨量/mm	蒸发量/mm	日照时数/h	径流深/mm	入渗系数	地下水径流模数/L·s ⁻¹ ·km ⁻²	综合评分
丽江市	0	0	0.08	0	0	0	1	0.145
昆明市	0.52	0.05	0	0.29	0.74	0.23	0.89	0.390
罗平县	1	1	1	1	0.52	0	0	0.671
丘北县	0.95	0.25	0.67	0.7	0.22	1	0.27	0.590
各指标权重	0.163	0.129	0.149	0.154	0.144	0.127	0.133	—

合评分越高,预期治理效果越好^[38]。评价结果见表 3。

从评价结果来看,石漠化治理预期效果岩溶丘峰槽谷最好,其次为岩溶峰洼谷地、岩溶断陷盆地,岩溶中山高山预期治理效果最差。据此分析,制约石漠化治理的自然因素,影响最大的是高程,其次为日照时数、蒸发量,入渗系数影响较小。治理难度则在于:高原岩溶中山、高山及峡谷区,尤其是干热河谷区自然资活动密切相关。从时间维度并结合土地利用变化情况来看,2010—2020 年石漠化治理效果明显,但是资源禀赋差,生态环境脆弱,经济发展滞后地区,石漠化仍有不断恶化趋势。从土地利用类型来看,人类活动密集区石漠化治理效果受干扰较大,生态修复或保护措施有力的区域治理效果明显,反之效果不佳或有恶化。故而,人类活动的复杂性也是石漠化治理的难点所在。

2.2 内涝及干旱防治

内涝治理难度大主要原因:一是气象水文因素,由于云南高原雨季集中,暴雨频发,易产生洪流,而岩溶盆、洼、谷地泄流出口有限,排水不畅,易形成内涝。2022 年泸西县全域出现强降水天气,9 月 15 日 20 时至 16 日 8 时,全县 25 个自动气象站累计降水量超过 100 mm 的有 5 个,泸西国家基本气象观测站降水量达 183.9 mm,单点降雨量最大的县城站点达 187.2 mm,是 1958 年有气象记录以来单日降雨量

最大值,造成中枢镇、午街铺镇等 7 个乡镇发生洪涝灾害,农作物、房屋、基础设施等不同程度受损。二是水文地质因素,岩溶盆、洼、谷地由其成因机制所决定,形成过程中同步发育的落水洞和溶裂,是天然的主泄流出口,其中落水洞和溶裂规模发育较小或后期堵塞的,自然修复难以见效,需作工程疏通或重建人工泄流通道。三是生态因素,生态系统及其服务功能的破坏和退化,降低了表层岩、土、生物层带的滞缓、调节地表径流的功能,而生态系统的修复或重建需较长的时间。四是岩溶区“三水”转化频繁,水循环过程受地质构造、岩溶发育、岩性分布等复杂性因素影响,形成了岩溶高原与斜坡区特殊的地貌特征,在空间上岩溶发育规模、强度等的差异性决定水循环过程的复杂性。五是人为因素,岩溶盆、洼、谷地人口负荷大,建筑占地面广,工程活动强烈,湿地回填和挤占河道普遍。废弃物和水土流失堵塞岩溶泄流通道严重,而排水基础工程设施落后,使得内涝治理困难重重。

干旱治理难度大的原因,首先是由自然条件决定,云南地处低纬高原,降雨量总体较大,但地形地貌复杂,降水时空分布不均,每年 11 月至次年 4 月为干季,降水稀少;岩溶区渗漏严重,大气降水和地表水容易通过溶隙、落水洞等渗入地下,因此容易造成“地表滴水贵如油,地下河水白白流,一场暴雨十日涝,十日不雨禾焦头”的岩溶型旱涝现象;岩溶区

森林植被破坏和退化严重,造成岩溶区石漠化严重,水土流失加剧,森林涵养水分能力较弱,更加重了区域干旱;受地形的控制,年降雨量的分布也表现为从东南西三面向中部北部递减特点。其次是人为因素的影响,人口急剧增长、土地过度垦殖,导致森林植被破坏,森林覆盖率降低,含水层的补给条件变差,地下水动态变幅加大,泉水流量衰减、断流现象普遍,原有水源不能满足不断增长的人畜饮水要求,加剧了当地人畜饮水困难。

2.3 地下水污染防治

地下水污染源点多面广,污染防治难度大。近年来,随着云南省城镇化水平显著提高,城镇生活污水、垃圾排放量大幅增加,由于缺乏有效管理和处置措施不足,部分生活污水、垃圾填埋场渗滤液进入地下水体,造成地下水污染,岩溶区尤为突出。以有色金属采选冶炼为主的历史遗留涉重金属固体废物点多量大面广,尚未得到全面整治;农业种植施用的大量化肥和农药通过土壤渗透等方式污染地下水,在农业生产区地下水中氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮超标和有机污染日益严重。由于地下水水文地质条件复杂,治理和修复难度大、成本高、周期长,地下水一旦污染,所造成的环境与生态破坏往往难以逆转。

地下水污染防治基础薄弱,防治能力亟待加强。云南在重点区域开展了地下水动态监测、资源量评估等工作,虽获得了大量的监测数据,但未全面覆盖,难以完整描述地下水环境质量及污染状况。地下水环境保护资金投入力度不够,难以满足地下水污染防治工作的需求,地下水环境管理体制和运行机制不顺,缺乏统一协调高效的地下水污染防治对策措施,地下水环境监测体系和预警应急体系不健全,地下水污染健康风险评估等技术体系不完善,难以形成地下水污染防治合力。

对地下水污染防治的认识有待提高。当前,地方各级人民政府和相关部门对地下水污染长期性、复杂性、隐蔽性和难恢复性的认识仍不到位。一方面,在矿产、地下水等资源开发过程中,“重开发、轻管理”现象还普遍存在,环境保护措施不完善,造成了含水层污染。另一方面,长期以来水环境保护的重点是地表水,地下水污染防治工作近年来才纳入议事日程,监管体系建设、法规标准制定及科研技术

开发等相关工作较为滞后。

2.4 其他问题的修复治理

有关泉水疏干修复问题存在几种可能,有的是在区域地下水位下降过程中含水层未受到破坏,在水位逐步恢复后的一定时间内能够恢复出水;而有的是出口下伏隔水底板和含水层遭到了破坏,加之岩溶裂隙和管道发育,地下水径流场发生改变,这样的泉水难于在短期内恢复,甚至不可能修复。生态环境破坏后修复困难,导致区域地下水环境发生变化,短期难以消除工程影响,难以恢复地下水流场。如地下工程隧道开挖引起的泉水断流,牛栏江引水工程,泛亚铁路(通海段隧道)等。

湿地生态环境恶化、退化严重制约地下水环境质量,其主要受到自然因素和人为因素及二者共同作用的影响。自然因素受气象、地质结构等因素控制,是湿地形成的内因。人为因素主要是建设及工农业生产占用湿地、人为破坏和改造的湿地;而受国土空间局限、水资源供给不足、经济发展滞后等因素影响,严重限制了湿地修复规划实施。如云南九大高原湖泊,面积大,成因复杂,治理难度大、成本高。

在岩溶地质灾害方面,云南高原的岩溶塌陷零星分散,具点状分布特点,总体上没有成区、成带的趋势。自然因素受松散土覆盖层厚度、浅层岩溶洞管发育情况和水文地质条件控制,人为因素是指人类工程活动和地下水开采强度等因素。修复难点主要是岩溶塌陷隐蔽性强,调查、勘察、预测等技术难度大;岩溶塌陷场地截排水、地基处理难度大,治理工程投入高,维护难度大。如岩溶山区塌陷、城市局部塌陷等。

3 结 论

(1)云南高原岩溶环境地质问题主要有石漠化、内涝及干旱、地下水污染、泉水疏干、湿地生态环境恶化、岩溶地质灾害,皆为在高原脆弱生态地质环境条件下,由不合理的人类活动所诱发或造成。

(2)岩溶地表、地下多层空间发育,地表和地下水土流(漏)失严重,防污性能差;碳酸盐岩成土缓慢,土层薄而分散,海拔高、日照强、蒸发量大,水土不配套,立地条件差;植被群落结构简单,生长缓慢,自然修复能力弱;动力地质作用强烈,地质灾害易发等

是岩溶环境地质问题修复治理困难的自然原因。

(3)盆(谷)地平坝区人口密集,资源环境负荷过重,生态修复的国土空间和资源不足。丘陵山区种植养殖、矿产能源开发等活动强烈,生态环境破坏严重。污染源点多面广,污染形式复杂隐蔽等是岩溶环境地质问题修复治理困难的人为制约因素。

(4)加强自然资源与环境调查研究,准确评价资源环境承载力、国土空间开发适宜性和识别,研发先进适用的修复治理模式,科学编制国土空间规划,进行统筹协调、引领指导,实施综合治理,系统修复。

(5)以石漠化、旱涝灾害、地下水污染等岩溶环境地质问题为目标导向,明确需要解决的重大技术难题和重点任务,结合地域特点,坚持系统观念,统筹山水林田湖草各要素,遵循整体保护、系统修复、综合治理,因地制宜提出适宜的生态修复途径和措施。

(6)岩溶环境地质问题需要加强科技支撑,以调查监测和统筹规划为引领,保证修复治理成效,实现正向演替和可持续发展。

参考文献

- [1] 中国水文地质工程地质勘察院. 环境地质研究[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
China Exploration Institute of Hydrogeology & Engineering Geology. Research on environmental geology[M]. Beijing: Seismological Press, 1991.
- [2] 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.
- [3] 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研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2010.
- [4] 王宇. 云南省岩溶水开发利用条件分析评价[J]. 水利学报, 2001(1): 49-52.
WANG Yu. Study on exploitation and utilization condition of karst groundwater in Yunnan Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(1): 49-52.
- [5] 张华, 王宇, 张贵. 云南重点岩溶流域水文地质及环境地质调查成果评析[J]. 云南地质, 2014, 33(2): 259-263.
ZHANG Hua, WANG Yu, ZHANG Gui. An analysis and assessment of hydrogeological and environment geological survey in key karst drainage area in Yunnan[J]. Yunnan geology, 2014, 33(2): 259-263.
- [6] 夏日元, 蒋忠诚, 邹胜章, 曹建华, 覃小群, 苏春田, 罗为群, 周立新. 岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展[J]. 中国地质调查, 2017, 4(1): 1-10.
XIA Riyuan, JIANG Zhongcheng, ZOU Shengzhang, CAO Jianhua, QIN Xiaoqun, SU Chuntian, LUO Weiqun, ZHOU Lixin. Progress of hydrogeology and environmental geology comprehensive survey in karst area[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(1): 1-10.
- [7] 夏日元, 邹胜章, 唐建生, 梁彬, 曹建文, 卢海平. 南方岩溶地区 1:5 万水文地质环境地质调查技术要点分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 599-608.
XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, TANG Jiansheng, LIANG Bin, CAO Jianwen, LU Haiping. Technical key points of 1:50,000 hydrogeological and environmental geology surveys in karst areas of South China[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 599-608.
- [8] 王宇, 张华, 张贵, 彭淑惠, 杨文礼, 蔡保新, 冯敏, 王梓激. 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.
- [9] 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 function in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 283-295.
- [10] 田昆, 陆梅, 常凤来, 莫剑锋, 黎良才, 杨永兴. 云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 35-42.
TIAN Kun, LU Mei, CHANG Fenglai, MO Jianfeng, LI Liangcai, YANG Yongxing. The ecological environment degradation and degradation mechanism of Napahai karst wetland in southwestern Yunnan plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(1): 35-42.
- [11] 王宇, 何绕生, 刘海峰, 王梓激, 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.
- [12] 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.
- [13] 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 吴路华, 杜朝超, 代磊, 杨兴艺, 李姿霖, 薛盈盈, 龙明康, 李明会, 杨姝, 罗青, 张小芸, 沈晓倩, 陈飞, 李琴, 邓元红, 胡泽银, 李朝君. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1903-1914.

- BAI Xiaoyong, ZHANG Sirui, RAN Chen, WU Luhua, DU Chaochao, DAI Lei, YANG Xingyi, LI Zilin, XUE Yingying, LONG Mingkang, LI Minghui, YANG Shu, LUO Qing, ZHANG Xiaoyun, SHEN Xiaoqian, CHEN Fei, LI Qin, DENG Yuanhong, HU Zeyin, LI Chaojun. Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [14] 薛建辉, 周之栋, 吴永波. 喀斯特石漠化山地退化土壤生态修复研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 135-145.
- XUE Jianhui, ZHOU Zhidong, WU Yongbo. Research progresses on ecological remediation of the degraded soil in karst rocky desertification mountainous areas[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(6): 135-145.
- [15] 朱劼, 田敏敏, 胡德, 陆希刚, 章永鹏, 陈睿. 我国中部地区城市历史水系结构性修复与内涝治理研究: 以河南省典型城市为例[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 798-810.
- ZHU Qing, TIAN Minmin, HU De, LU Xigang, ZHANG Yongpeng, CHEN Rui. Structural restoration of historic water systems and the prevention and mitigation of urban waterlogging for China's central region cities: A study using archetypical cities in Henan province as examples[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 798-810.
- [16] 黄秀凤. 坡心地下河流域岩溶内涝成因分析与防治对策[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(6): 42-46, 91.
- HUANG Xiufeng. Causes of and countermeasures for karst waterlogging in Poxin underground river basin[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(6): 42-46, 91.
- [17] 覃小群. 桂中岩溶干旱特征及综合治理对策[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(3): 278-283.
- QIN Xiaoqun. Characteristics and comprehensive treatment strategy of karst drought in central Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2005, 25(3): 278-283.
- [18] 易世友, 焦恒, 周长松, 高峰, 陈涛. 基于“三源模式”的岩溶地下河区污染场地修复治理: 以遵义坪桥地下河系统为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 648-661.
- YI Shiyou, JIAO Heng, ZHOU Changsong, GAO Feng, CHEN Tao. Remediation of polluted sites in the typical area of karst underground river based on "Three-Source Model": A case study in the Pingqiao underground river system, Zunyi, China[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(4): 648-661.
- [19] 杜新月, 张晓然, 张玉玲, 张紫阳, 李海燕. 地下水污染修复技术评价方法研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 26-40.
- DU Xinyue, ZHANG Xiaoran, ZHANG Yuling, ZHANG Ziyang, LI Haiyan. Research progress in evaluation methods of groundwater remediation technologies[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(11): 26-40.
- [20] 张伟, 王保占. 矿山地下水污染及修复技术的研究浅析[J]. 世界有色金属, 2023(6): 106-108.
- ZHANG Wei, WANG Baozhan. Research on groundwater pollution and remediation technology in mines[J]. World Nonferrous Metals, 2023(6): 106-108.
- [21] 何燕敏, 蔡小虎, 郑欢, 聂士瑞, 杜忠. 基于 CiteSpace 分析的湿地恢复技术研究热点与前沿[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(1): 186-196.
- HE Yanmin, CAI Xiaohu, ZHENG Huan, NIE Shirui, DU Zhong. Research hotspots and trends in wetland restoration technology based on CiteSpace software[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(1): 186-196.
- [22] 李珂, 杨永兴, 杨杨, 韩大勇, 杨宇明, 田昆, 张昌兵. 中国高原湿地退化与恢复研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6714-6716, 6719.
- LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, HAN Dayong, YANG Yuming, TIAN Kun, ZHANG Changbing. Research progress of the degradation and restoration of the plateau wetlands in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(11): 6714-6716, 6719.
- [23] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 雷明堂, 张伟, 马骁, 伊小娟. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.
- JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517-527.
- [24] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 7(1): 101-111.
- LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 7(1): 101-111.
- [25] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.
- JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of Southwest China in the 21st century[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 461-468.
- [26] 艾文竹, 陈棋, 田湘云, 史小蓉, 张超, 王妍. 近 20 年间云南省石漠化演变过程及特征分析[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 40-47.
- AI Wenzhu, CHEN Qi, TIAN Xiangyun, SHI Xiaorong, ZHANG Chao, WANG Yan. Analysis on the evolution process and characteristics of rocky desertification in Yunnan Province in the past 20 years[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023, 52(2): 40-47.
- [27] 陈棋, 张超, 田湘云, 史小蓉, 张玉薇, 王妍. 云南省 2000—2020 年石漠化时空演变分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 417-426.
- CHEN Qi, ZHANG Chao, TIAN Xiangyun, SHI Xiaorong, ZHANG Yuwei, WANG Yan. Spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Yunnan Province from 2000 to 2020[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(2): 417-426.

- [28] 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.
- [29] 吴国君, 孙治仁. 我国亚热带岩溶山区生态环境特征及生态恢复对策: 以珠江上游南盘江和北盘江岩溶地区为例[J]. *广东水利水电*, 2006(4): 9-13.
WU Guojun, SUN Zhiren. Eco-environmental characteristics and ecological restoration strategies of subtropical karst mountainous areas in China: A case study of Nanpanjiang and Beipanjiang karst areas in the upper reaches of the Pearl River[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2006(4): 9-13.
- [30] 罗丽艳, 李芸, 马平森, 钟诚. 云南省干旱及演变趋势分析[J]. *人民珠江*, 2011, 32(2): 13-15, 46.
LUO Liyan, LI Yun, MA Pingsen, ZHONG Cheng. Analysis of drought situation and evolution trend in Yunnan[J]. *Pearl River*, 2011, 32(2): 13-15, 46.
- [31] 唐健生, 夏日元. 南方岩溶石山区资源环境特征与生态环境治理对策探讨[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(2): 140-143, 148.
TANG Jiansheng, XIA Riyuan. Characteristics of water and land resources and remedy measures of ecological environment in karst mountain areas of South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(2): 140-143, 148.
- [32] 莫美仙, 王宇, 李峰. 滇东断陷盆地地下水污染的水文地质模式[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 88-95.
MO Meixian, WANG Yu, LI Feng. Hydrogeological model of groundwater pollution in eastern Yunnan plateau downfaulted basin[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 39(5): 88-95.
- [33] 张新钰, 辛宝东, 王晓红, 郭高轩, 陆海燕, 纪铁群, 沈媛媛. 我国地下水污染研究进展[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 415-422.
ZHANG Xinyu, XIN Baodong, WANG Xiaohong, GUO Gaoxuan, LU Haiyan, JI Yiqun, SHEN Yuanyuan. Progress in research on groundwater pollution in our country[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 415-422.
- [34] 张华, 康晓莉, 彭淑惠, 黄钊, 高瑜, 黄琴辉, 刘绍华, 刘天伦. 云贵高原典型串珠状岩溶湿地水文地质演化研究[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(4): 532-541.
ZHANG Hua, KANG Xiaoli, PENG Shuhui, HUANG Zhao, GAO Yu, HUANG Qinhui, LIU Shaohua, LIU Tianlun. Hydrogeological evolution of typical moniliform karst wetland in the Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 532-541.
- [35] 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.
- [36] 康晓波, 王宇, 张华, 代旭升, 朱广毅. 云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(5): 50-58.
KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, DAI Xusheng, ZHU Guangyi. Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan plateau[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(5): 50-58.
- [37] 邓启江, 李星宇, 吕琼, 李坚峰. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(1): 23-29.
DENG Qijiang, LI Xingyu, LYU Qiong, LI Jianfeng. Development characters and prevention measures of the karst collapse in Kunming[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(1): 23-29.
- [38] 刘玮君. 贵阳市南明区石漠化敏感性评价及动态分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
LIU Weijun. The evaluation and dynamic analysis of rock desertification sensitivity in Nanming district, Guiyang City[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.

Analysis of geological problems and difficulties in restoration and treatment of karst environment on the Yunnan plateau

ZHANG Hua^{1,2,3}, PENG Shuhui^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,4}, WANG Bo^{1,2,3}, GAO Yu^{1,2,3}, LI Qin^{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)

Abstract The karst region of the Yunnan plateau is characterized by high altitudes, diverse landforms, variable meteorological and hydrological conditions, and strong internal and external dynamic geological processes. Additionally, the rapid increase in human activities and the detrimental effects of unsustainable development have resulted in many issues on karst environmental geology closely related to natural resources and the environment. The main issues are rocky desertification, waterlogging and drought, groundwater pollution, spring drainage, deterioration

of wetland ecological environment, and karst geological disasters.

According to the data on relevant remote sensing surveys, the total area of rocky desertification in Yunnan Province in 2020 reached 24,800 km², accounting for 26.41% of the karst area. Among them, the area of severe rocky desertification accounted for 69.46%, 20.72% for moderate rocky desertification, and 9.82% for mild rocky desertification. Rocky desertification is contiguously distributed in the karst mountainous areas of eastern and southeastern Yunnan, and in karst regions of western Yunnan, it is mostly distributed in sheets and bands. The severe rocky desertification area is mainly concentrated in the middle-height mountains, high-height mountains and valleys of the plateau karst. The distribution of waterlogging and drought in the karst region of the plateau shows obvious local characteristics. Drought disasters mainly occur in the mountainous and hilly areas with higher terrain, while waterlogging occurs more often in the valleys, basins and depressions among the mountains with lower terrain. There are 2,658,400 acres of arable land susceptible to waterlogging in karst regions of the Yunnan plateau. The degree of groundwater pollution varies greatly due to different types of groundwater, pollution protection properties and pollution sources. Generally, pore water is the most polluted with the lowest water quality. Medium to heavy pollution is mainly distributed in the middle of the basin, and the elements exceeding the permitted level mainly include nitrite, ammonia nitrogen, iron, manganese, etc. The heavily polluted areas include Kunming, Qujing, Kaiyuan, Mengzi, Gejiu and other places, mostly rated as serious or most serious pollution areas. The drainage of spring water in karst stone mountains typically results in a decline of regional groundwater levels. This decrease mainly occurs in basin areas, mining areas and the vicinity of engineering tunnel excavation, which is mainly caused by human engineering activities such as tunnel excavation, mine drainage and over-exploitation of groundwater. The wetland of the Yunnan plateau is mainly distributed in the lakeside. Due to the combined effects of ecological changes and human activities, the temporal and spatial distribution of water sources and the water cycle processes have been altered. The wetland area is shrinking, and its ecological service functions are increasingly degraded or even lost, resulting in a series of ecological and environmental geological problems. Karst geological disasters on the plateau primarily consist of karst collapses, which are mainly found in karst fault basins, trough valleys and platform areas. These collapses are mainly the result of external forces such as rainfall and earthquakes.

Due to the fragility and complexity of the geological environment in karst regions of the plateau, addressing and managing various environmental geological issues is challenging, and the outcomes of restoration and control efforts are inconsistent. The main reasons can be summarized as the complex and changeable natural and social factors, resulting from issues related to the karst geological environment, the low carrying capacity of natural resources, the limited capacity of the geological environment, and the challenges in balancing survival, development and environmental protection. The economic and technical requirements for the restoration and treatment of karst environmental geological issues are increasingly demanding. Guided by the theories of hydrogeology, environmental geology and ecology, and based on a large number of detailed investigation data, this study systematically summarizes and analyzes the issues on karst environmental geology such as rocky desertification, waterlogging and drought, groundwater pollution, spring water drainage, deterioration of the wetland ecological environment, and karst geological disasters on the Yunnan plateau as well as the difficulties and causes of restoration and control of these disasters. The countermeasures and suggestions to address these issues have been put forward, which can provide the orientation and scientific basis for ecological protection and restoration.

Key words ecological environment, rocky desertification, water pollution, wetland degradation, geological disaster

(编辑 张玲)