

贺凯凯, 陈清敏, 成星, 等. 中国西南及陕西秦巴地区岩溶石漠化研究进展[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 147-162.

DOI: 10.11932/karst20240108

中国西南及陕西秦巴地区岩溶石漠化研究进展

贺凯凯¹, 陈清敏^{1,2,3,4,7}, 成星^{1,6,7}, 杨治国¹, 韩静⁵, 曹江涛⁵, 艾昊^{1,7}, 张文硕¹

(1. 陕西省地质调查院, 陕西省地质调查实验中心, 陕西 西安 710065; 2. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质调查院博士后科研工作站, 陕西 西安 710054; 4. 中国自然资源学会秦巴研究分会, 陕西 西安 710054; 5. 自然资源陕西省卫星应用技术中心, 陕西 西安 7100023;

6. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061;

7. 生态环境损害鉴定评估中心, 陕西 西安 710065)

摘要: 石漠化危害着生态环境健康和社会经济发展, 经过20多年的综合治理, 中国西南地区石漠化面积呈减少的趋势, 国家也将西南八省、区、直辖市设定为石漠化监测区域; 而在陕西秦巴地区岩溶地质遗迹的研究中已发现石漠化发育的迹象, 这对秦巴地区的生态安全造成威胁。文章总结西南地区岩溶石漠化的内涵、现状、危害、成因和治理经验, 为开展非监测区——陕西秦巴地区岩溶石漠化的调查工作提供理论依据。通过遥感解译、无人机遥感调查和碳酸盐岩溶蚀速率分析, 首次查明了陕西秦巴地区石漠化的发育情况, 填补了该区域石漠化研究的空白。

关键词: 岩溶石漠化; 现状; 危害; 成因; 治理经验; 陕西秦巴地区

创新点: 总结了西南地区岩溶石漠化的成果, 并通过多种调查方法和溶蚀速率分析, 首次报道了陕西秦巴地区发育有石漠化

中图分类号: P931.5; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0147-16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶石漠化是指在亚热带脆弱的岩溶背景下, 由于人类不合理的社会经济活动, 导致水土流失、基岩裸露、土地丧失农业利用价值, 地表出现类似荒漠景观的土地退化过程, 是岩溶生态系统退化到极端的表现^[1-3]。石漠化危害十分严重, 是岩溶区生态环境问题之首, 成为灾害之源、贫困之因、落后之根^[4]。2000年开始, 推进西南岩溶地区石漠化综合治理工

作上升到国家高度^[5], 到2016年实现了 128.4×10^4 hm^2 的减少量。期间大量学者针对石漠化概念^[1,6-8]、成因^[9-12]、治理措施^[6,13-14]等方向做出研究, 为治理工作成功开展奠定了学术基础。

2016年岩溶石漠化综合治理一期工程结束后, 西南地区石漠化扩张趋势得到了有效遏制, 发表的研究论文多倾向于石漠化监测地区的现状分析^[15-16]、综合治理^[17-18]或物种适生性^[19-20]等方向。而陕西秦巴地区位于监测区外, 在岩溶地质遗迹的研究过程

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目(202008, 202310); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金课题(SKLLQG2209); 陕西省自然科学基金基础研究计划-青年项目(2023-JC-QN-0298); 陕西省科协青年人才托举计划项目(20230538); 2022年省级生态环保及应急管理专项项目(202312); 陕西省重点研发计划一般项目-社会发展领域(2024SF-YBXM-561)

第一作者简介: 贺凯凯(1995—), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为岩溶石漠化。E-mail: 215311952@qq.com。

通信作者: 陈清敏(1984—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为全球变化和年代学, 岩溶石漠化研究。E-mail: chenqingmin0601@163.com;

成星(1992—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为石笋古气候学、同位素地球化学、岩溶生态学研究。E-mail: xingcheng529@outlook.com。

收稿日期: 2020-09-01

中^[21],已发现石漠化发育的迹象,但针对该区域岩溶石漠化的调查研究仍处于空白阶段。

秦巴地区地处北亚热带和暖温带的过渡地带^[22],是长江和黄河的分水岭、我国南水北调中线工程的重要水源涵养区^[23],是南北动物交会与融合的地带、全国生物多样性最丰富的地区之一,被称为“生态绿肺”“中央水塔”“生物基因库”。但这里也是贫困的高发地带,为确保当地绿色高质量发展和生态文明建设,对岩溶石漠化的调查研究具有重要意义。

目前,有关秦巴山区碳酸盐岩溶蚀速率的研究^[24]已有成果,研究成果主要是溶蚀速率与石漠化强度等级的相关性分析,为了进一步查明该区域的石漠化发育现状,本文在前人调查和研究的成果基础上,系统总结了我国西南岩溶石漠化的发育现状、危害、成因等方面的研究进展,旨在为研究陕西秦巴地区石漠化提供相关经验和科学依据;通过遥感解译、无人机遥感调查及碳酸盐岩溶蚀速率分析等多种技术手段,确定了陕西秦巴地区石漠化的分布范围、发育面积及不同程度石漠化占比,旨在未来为非

监测区岩溶石漠化调查、秦巴地区岩溶石漠化防治及生态文明建设等提供数据支撑。

1 西南岩溶地区石漠化发育现状

1.1 岩溶地区石漠化土地现状

中国发育的岩溶地貌,以西南岩溶区最为典型,岩溶石漠化亦多发于此区域。据统计,截止 2016 年,中国岩溶地区面积约 $4\,516\times 10^4\text{ hm}^2$,其中石漠化土地面积约 $1\,007\times 10^4\text{ hm}^2$,占岩溶面积的 22.3%,占区域国土面积的 9.4%,主要分布在贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川和广东 8 个省(区、直辖市),457 个县 5 909 个乡^[25]。按程度分布状况,轻度、中度、重度、极重度石漠化土地面积分别为 $391.3\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $432.6\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $166.2\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $16.9\times 10^4\text{ hm}^2$,占石漠化土地总面积的分别为 38.9%、43.0%、16.5%、1.7%(表 1)。

截至 2016 年底,岩溶地区潜在石漠化土地总面积为 $1\,466.9\times 10^4\text{ hm}^2$,占岩溶面积的 32.4%,占区域国土面积的 13.6%^[26](表 2)。

表 1 西南岩溶区八省(区、直辖市)岩溶石漠化分布情况统计表

Table 1 Statistics of karst desertification distribution in eight provinces/ regions/municipalities in the karst areas of Southwest China

省(区、直辖市)	合计	极重度石漠化		重度石漠化		中度石漠化		轻度石漠化	
	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/%	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/%	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/%	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/%
云南	235.193 68	5.755 10	2.4	19.072 65	8.1	97.259 07	41.4	113.106 86	48.1
贵州	247.013 21	2.538 07	1.0	25.642 11	10.4	125.411 96	50.8	93.421 07	37.8
广西	153.289 89	4.546 50	3.0	80.365 04	52.4	46.008 36	30.0	22.369 99	14.6
四川	66.992 65	1.115 81	1.7	7.771 64	11.6	28.382 93	42.4	29.722 27	44.4
湖南	125.140 28	1.406 53	1.1	17.327 44	13.8	51.778 81	41.4	54.627 50	43.7
湖北	96.151 01	0.948 51	1.0	7.921 71	8.2	429 994.6	44.7	442 813.3	46.1
重庆	77.286 48	0.545 3 30	0.7	5.756 83	7.4	38.614 66	50.0	32.369 66	41.9
广东	5.944 67	0.073 04	1.2	2.344 84	39.4	2.168 62	36.5	1.358 17	22.8
合计	1 007.011 87	16.928 89	1.7	166.202 26	16.5	432.623 87	43.0	391.256 85	38.9

表 2 西南岩溶区八省(区、直辖市)潜在石漠化分布情况统计表

Table 2 Statistics of distribution of potential rocky desertification in eight provinces/regions/municipalities in the karst areas of Southwest China

省(区、直辖市)	云南	贵州	广西	四川	湖南	湖北	重庆	广东	合计
面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	204.2	363.8	267.0	82.1	163.4	249.2	94.9	42.3	1 466.9
占比/%	13.9	24.8	18.2	5.6	11.1	17.0	6.5	2.9	100

1.2 岩溶地区石漠化土地动态变化情况

岩溶石漠化是动态变化的。截至 2021 年,我国石漠化土地总面积为 $722.32\times 10^4\text{ hm}^2$,与 2016 年相

比,净减少了 $333.08\times 10^4\text{ hm}^2$,增长率约为-33.1%^[27],实现了较 2005 年以来连续三个调查周期持续减少,且降幅呈倍数级增长。而潜在石漠化土地面积,自

2005 年以来持续增加。

对比 2005—2016 年岩溶石漠化与潜在石漠化的变化情况, 总体呈现此消彼长的趋势, 其中 2005—2011 年二者最为接近, 增长量分别为 $-96.0\times 10^4\text{ hm}^2$ 和 $97.8\times 10^4\text{ hm}^2$, 增长率分别为 -7.4% 和 7.9% ; 2011—2016 年岩溶石漠化面积的变化量和变化率均大于潜在石漠化面积(表 3)。说明了岩溶石漠化综合治理一期工程的成效显著, 岩溶石漠化经治理, 向潜在石漠化和无石漠化转变。

表 3 西南岩溶区石漠化及潜在石漠化面积及动态变化统计表

Table 3 Statistics of the areas of rocky desertification and potential rocky desertification, and dynamic changes in karst areas of Southwest China

时间/年	2005		2011		2016		
	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	增长量/ $\times 10^4\text{ hm}^2$ (较2005年)	增长率/% (较2005年)	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	增长量/ $\times 10^4\text{ hm}^2$ (较2011年)	增长率/% (较2011年)
岩溶石漠化	1 296.1	1 200.1	-96.0	-7.4%	1 007.0	-193.1	-16.1%
潜在石漠化	1 234	1 331.8	97.8	7.9%	1 466.9	135.1	10.1%

从岩溶石漠化程度的演变来看, 2005—2016 年, 岩溶石漠化发育程度持续减轻, 石漠化危害不断降低、生态状态稳步好转^[15]。其中, 极重度、重度、中度石漠化占比不断降低, 重度—极重度石漠化的占比从 2005 年的 26.8% 下降到 2016 年的 18.2%; 并且在两个统计周期内, 极重度、重度、中度石漠化的增长率基本保持不变, 轻度石漠化呈先增长后减少的趋势。总体而言, 岩溶区八省岩溶石漠化程度演变呈极重度、重度及中度向轻度转变^[5], 轻度向潜在石漠化或无石漠化转变的趋势(表 4)。根据 2021 年第四次石漠化调查结果, 相对于 2016 年, 极重度、重度、中度、轻度石漠化分别减少了 $10.92\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $54.2\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $149.2\times 10^4\text{ hm}^2$ 、 $118.76\times 10^4\text{ hm}^2$, 石漠化程度依旧保持持续减轻态势。

表 4 西南岩溶区岩溶石漠化程度演变情况统计表

Table 4 Statistics of evolution of karst desertification in karst areas of Southwest China

时间/年	2005		2011				2016			
	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/ %	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/ %	增长量/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	增长率/ %	面积/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	占比/ %	增长量/ $\times 10^4\text{ hm}^2$	增长率/ %
			(较2005年)				(较2011年)			
极重度	54.5	4.2	32.0	2.7	-22.5	-41.3	16.9	1.7	-15.1	-47.2
重度	293.4	22.6	217.7	18.2	-75.7	-25.8	166.2	16.5	-51.6	-23.7
中度	591.9	45.7	518.9	43.1	-73.0	-12.3	432.6	43.0	-86.2	-16.6
轻度	356.3	27.5	431.5	36	75.2	21.1	391.3	38.8	-40.3	9.3

2 石漠化的危害

岩溶石漠化的危害从宏观层面主要表现为生态环境和社会经济两大方面^[28], 且两者互为因果、形成恶性循环^[12]。生态环境方面包括岩溶区干旱、内涝灾害频发; 水土流失加剧, 导致可耕地面积减少, 人地矛盾突出; 生态系统退化、生物多样性逐渐丧失^[13]。社会经济方面体现在制约区域经济发展、阻碍乡村振兴进程^[29]。

2.1 岩溶区干旱、内涝灾害频发

岩溶地区具有双层水文结构、岩溶渗漏^[30]、复杂的岩溶管道系统等特征,^[31-32] 这为岩溶地区旱涝灾害频发提供了自然基础; 石漠化生态系统的承灾阈值弹性小, 具体表现为人类剧烈活动, 导致遇到强降雨, 石漠化地区缺乏森林植被来调节缓冲地表径流, 造成暂时局域性涝灾^[8]。据统计, 历史上西南岩溶区干旱总体上呈现出“每年旱灾, 3~6 年中旱, 7~10 年大旱”的特点, 洪水总体上呈现“2~3 年中洪, 5~8 年大洪”的特点, 岩溶区特有的涝灾则是年年不断, 且

灾情严重,旷日持久^[33]。

2.2 水土流失加剧,进一步导致可耕地面积减少,人地矛盾突出

以广西岩溶地区为例,据 2013 年全国第一次水利普查公报,2011 年广西水土流失面积 $5.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,占土地总面积的 21.3%。2000—2015 年间,新增 4 913.4 km^2 耕地石漠化,新增丧失耕地面积达到 1 859.40 km^2 ,平均每年丧失耕地面积 366.67 km^2 ^[34],造成耕地资源极端匮乏^[35],农民失去赖以生存的基本条件,人地矛盾突出、生存问题更加凸显。

2.3 生态系统退化、生物多样性逐渐丧失

活跃的人类活动导致岩溶区域生态环境恢复困难。石漠化造成生态系统不稳定、植被结构简单化、生物多样性锐减^[13,18,35]。常绿落叶阔叶林是我国西南岩溶生态系统的顶级群落,具备生境复杂、植被茂密、物种繁多等总体特征^[36],石漠化使原有的生态系统失去平衡,大面积森林退化呈灌丛或草丛,生物多样性减少,生境质量下降^[37]。岩溶石漠化不仅破坏了高大的植被,还破坏了植被生长的先驱物种,比如岩石表面的苔藓和藻类^[38]。

随着石漠化治理工程的推进,2001—2015 年岩溶地区植被生物量的增加速度是治理前(1982—2000 年)的 2 倍,治理区域比非治理区域的植被覆盖度高 7%,滇桂黔三省植被固碳量较治理前增加了 9%,相比于与未开展石漠化治理的国家,生态环境改善效果显著^[29,39-40]。

2.4 制约区域经济发展、阻碍乡村振兴进程

岩溶区的石漠化与脱贫攻坚紧密相关。据国家林业和草原局 2018 年统计,石漠化地区经济发展严重滞后,人均 GDP 仅为全国的 71%,贫困人口占全国贫困人口的 1/3,是我国贫困人口集中分布地区^[13]。截至 2017 年,岩溶地区仍有 211 个县没有脱贫,农民对土地依赖性较强,增收途径有限,许多地区陷入“越穷越垦、越垦越穷”的循环内^[29]。新时代乡村振兴战略全面推进,石漠化治理工程兹事体大,不能让岩溶石漠化成为乡村振兴路上的绊脚石。

3 石漠化的成因

岩溶石漠化的成因是石漠化研究的核心问题^[41],它是岩溶石漠化治理^[10,42]及石漠化评价指标体系建

立^[43]的基础。总的来说,石漠化是潜在的自然因素叠加了人类不合理活动的综合结果^[1,29,41,44]。

3.1 自然因素

3.1.1 地质背景

岩溶石漠化发育的物质基础是古环境变迁形成的碳酸盐岩物质^[1],动力潜能是活跃的构造活动^[29],本质原因是土壤侵蚀速率大于成土速率。一般来说,石漠化发生率高、程度重的区域主要有以下特征:

(1)岩溶作用强烈^[41]。碳酸盐岩结构致密、孔隙度小、持水性差、酸不溶物含量低、泥质含量少^[44];

(2)纯石灰岩、连续型纯白云岩大范围出露^[35,45],岩溶石漠化在石灰岩组合上较白云岩组合更常见^[46];

(3)表层土壤相对较薄且土壤缺少分化母质的过渡层(C 层),即母岩与土壤通常存在着明显的软硬界面^[10,47];

(4)区域构造活动强烈,地表切割度和地形坡度大^[1,29,41,43,48-49],地貌多为峰丛洼地和峰林洼地。

3.1.2 气候背景

温暖湿润的季风气候为岩溶石漠化发育提供了必要的侵蚀营力^[29,48]。在众多气候背景要素中,降雨要素与石漠化指数呈普遍显著正相关,降雨量越大,与岩溶石漠化的相关性越强^[50]。早期数据统计,中国西南岩溶区年均降雨变化在 900~1 345 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[51],平均最大年暴雨日数 7~11 次^[52],这无疑为水土流失提供了强大的动能。而在谷风和山风的循环作用下,土壤干裂、松动、迁移,使得土壤表层稀薄,土壤黏性越来越弱^[50],更加速石漠化进程。

3.1.3 植被背景

植被覆盖率及植被类型是识别石漠化的关键指标^[43]。研究发现,石漠化从形成初期到后期,植被类型的演替序列为:次生乔灌木林—灌木林—稀灌草坡—草坡^[53]。植被覆盖率越高,植物群落丰富度越高,生态系统越稳定,石漠化发生率及程度就越低^[54]。

3.2 人为因素

人类活动是导致石漠化形成的最重要因素之一,是岩溶石漠化形成及扩张的驱动力^[1]。其主要表现为:人口增长(靖康事件人口南迁、明清和建国时期两次人口急速增长)和农作物结构变化^[44,55],对土地

粗放式、掠夺式经营,生产方式落后^[10],过度放牧^[56],保护资源环境意识差,土地产权错位^[41]等。其中可量化且与岩溶石漠化的发生率呈密切正相关的因素包括人口密度、大于25°的坡耕地比例及垦殖率^[1,57]三项指标。人口密度可间接地反映人口对资源和环境的压力;陡坡耕地率反映了人口对耕地的压力,陡坡耕地率越大,土地石漠化的危险性就越高^[43];垦殖率表示该地区对土地资源开发利用的程度。已有数据表明,石漠化地区三项指标均高于相同生产力水平下的合理数值^[10,29,48]。

4 治理经验

4.1 综合治理

岩溶石漠化治理工程要坚持对山、水、田、林、路的综合治理,治理成效要惠及生态环境和社会民生两大方向,治理主体要包括国家、地方政府和干部群众三个方面^[48],治理工作要由该区域省、区、市、县的农业、林业、水利、国土、科技等部门共同开展^[58],治理方式要结合退耕还林、封山育林、坡改梯、砌墙保土、改良土壤、开发岩溶水、种植适生经济作物等多种手段^[29]。因此,石漠化治理要在政策方针的指导和扶持下,多方面、多部门、多学科、多措施综合治理。

4.2 标本兼治

石漠化治理要以石漠化成因为导向,推本溯源、正本清源,正确认识“水是源头,土是关键,植被(经济作物)是根本,区域生态经济双赢、农民脱贫致富是目标^[59]”的治理思路,切实解决石漠化地区缺水、少土、植被生长困难、贫穷落后的问题。重点应用土地整理、改良技术,水土保持技术,植被恢复与重建技术,区域农业结构调整与生态产业培育技术,洼地内涝防治技术等^[2],打破恶性循环,探索出石漠化治理的破坏方法。

4.3 长短结合

石漠化综合治理一期工程历经6年,取得了阶段性的成果,但岩溶区的生态依然脆弱,为谨防潜在石漠化的发育,石漠化治理将是一场持久战^[60]。因此,应制定石漠化治理长期规划,并做到长、短期目标相结合,确保治理成果。短期目标要以人为本,快

速见效,着重解决缺水固土和生活能源问题,增强农民治理石漠化的积极性,避免退耕又返耕的现象发生;长期目标要实现西南岩溶区的可持续发展,以恢复和重建生态环境与富民增收并重为目的,最终实现绿水青山就是金山银山的美好愿景^[8,58]。

4.4 因地制宜

自20世纪90年代以来,多地实施石漠化综合治理,形成多种可复制、可推广石漠化综合治理模式。广西平果县果化镇发展立体生态农业^[61]、贵州晴隆县建立“陡坡人工种植优质牧草—养殖优质肉羊—发展畜牧业”的人工种草养畜模式^[62]、广西环江毛南族自治县下南乡古周村实施“草—畜”农业生产模式^[63],贞丰县、花江县、毕节市等地均取得一定的治理成效,生态环境得到显著改善,资源利用率和生产效率相继提高,区域经济快速发展。可见,岩溶石漠化治理已有大量成功案例。但忽略地域差异,直接照搬治理措施终归会影响治理效果,国务院2008年批复的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》(2006-2015年)指出:“根据岩溶发育的特征,岩溶区地貌组合类型可分为:中高山岩溶山地、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原、溶丘洼地(槽谷)、以及局部分布的石林等。”由于岩溶生态系统类型的差异,要根据不同区域的概况及制约因素提出治理思路与途径^[64],选择性的模仿治理模式,并时刻遵循产业化和市场导向原则,为乡村振兴再添活力。

5 陕西秦巴地区岩溶石漠化

秦巴地区(陕西片区)西起陕西省与甘肃省交界,南与四川省交界,地理坐标为31°42'30"~34°58'30"N, 105°29'00"~111°01'30"E,东西长400~500 km,南北宽180~380 km,总面积约740×10⁴ hm²,其中岩溶面积共计201.15×10⁴ hm²。主要岩溶发育区的碳酸岩系扬子准地台碳酸岩,且大多数为巨厚质纯的碳酸岩^[65]。陕西秦巴地区地处扬子准地台北缘,亚热带季风气候,四季分明、雨量充沛,为秦巴地区陕西片区石漠化发育提供了自然条件。在对陕西秦巴地区镇巴三元天坑群岩溶地质遗迹的研究中^[21],发现研究区存在石林、石芽等岩溶地貌,经研究,符合石漠化发育的特点,但针对陕西秦巴地区岩溶石漠化的

调查仍处于空白阶段。

综合我国岩溶石漠化发育现状发现,湖北、重庆、四川三省(直辖市)已发生石漠化的区域主要集中在秦巴地区。近年来,秦巴山区河南片区和甘肃片区也发现石漠化现象^[66-68],其中河南省南阳岩溶地区石漠化发育最为严重,2015 年统计结果显示,南阳岩溶石漠化土地总面积为 74 647.7 hm²,占岩溶面积的 27.88%,其中极重度、重度、中度、轻度石漠化面积分别为

5 418.9 hm²、10 991.0 hm²、35 337.0 hm²、22 900.8 hm²;潜在石漠化土地为 93 102.2 hm²,占岩溶面积的 34.77%。2021 年河南省申请纳入岩溶地区第四次石漠化调查范围,于同年 7 月正式启动岩溶石漠化调查。

为了查明陕西秦巴地区石漠化发育及分布的情况,本研究以卫星遥感解译^[69]为主,同时,结合无人

机遥感调查与碳酸盐岩溶蚀速率分析^[70],验证该地区岩溶石漠化发育的事实。

5.1 研究方法

5.1.1 遥感解译

5.1.1.1 工作方法

收集工作区 Landsat 8 OLI 遥感影像,选择 2020 年左右的 Landsat8 OLI 遥感影像 10 景、分辨率 30 m^[71]; DEM 数据 (SRTM1 数据),空间分辨率 30 m×30 m;地质数据借助 ArcGIS 软件平台将 1:50 万陕西省地质图地理信息化;地表覆盖数据取自 GlobeLand30(<http://www.globeland30.org/>),分辨率 30 m;光学影像数据源为 2022 年第一季度的高分一号(GF-1)、高分二号(GF-2)、高分七号(GF-7),分辨率分别为 2 m、0.8 m、0.65 m。本研究共收集遥感影像 165 景原始数据(图 1)。

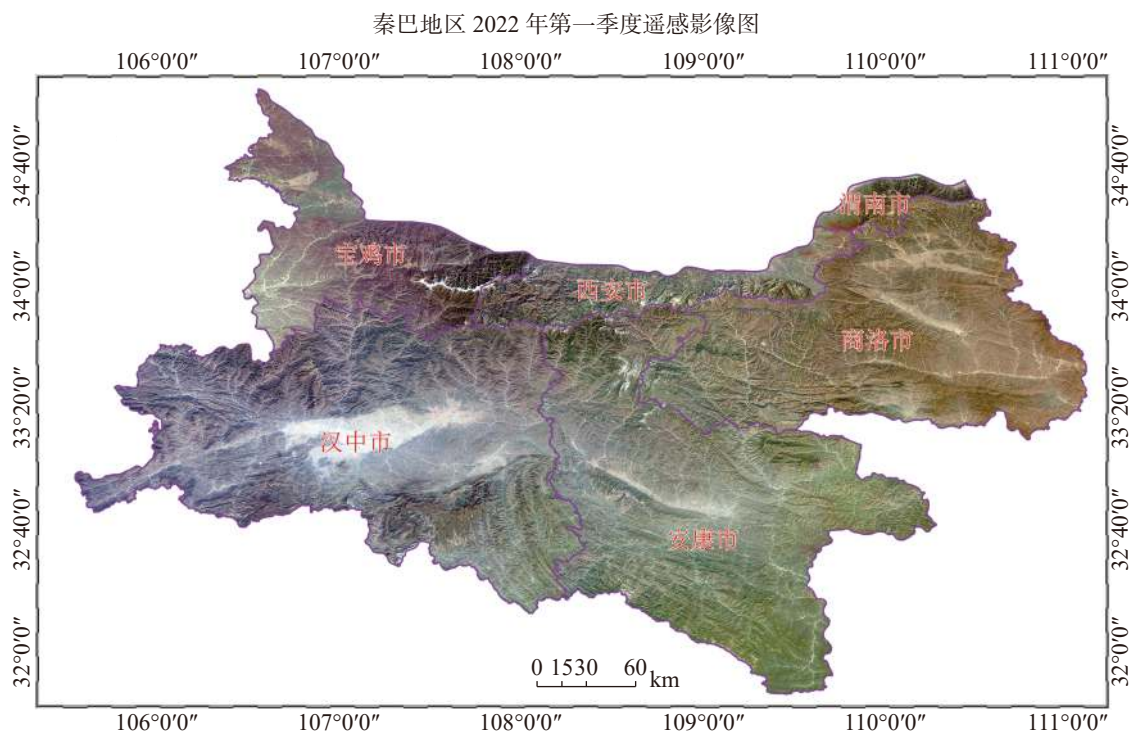


图 1 2022 年第一季度遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing image in the first quarter of 2022

通过以上基础数据,运用遥感技术结合地理信息的方法,确定以基岩裸露度、植被覆盖度、地形坡度、碳酸盐岩岩性分布及地表覆盖类型等因素为石漠化的分级标准来构建岩溶石漠化的综合提取模型,初步掌握岩溶石漠化分布靶区。在此基

础上,利用高分辨率正射影像对石漠化分布集中区实施高分辨率影像解译,构建陕西秦巴地区岩溶石漠化分布图。

5.1.1.2 石漠化信息提取方法

(1)为了有效地从影像数据中获取石漠化分布

信息, 结合前人对岩溶石漠化的分级和评价指标体系^[69,72], 选取植被覆盖度、基岩裸露率、地形坡度^[73]、地表覆盖类型四个因素作为提取石漠化信息的主要

因子, 将陕西秦巴地区岩溶石漠化划分为五种类型: 无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化(表 5)。

表 5 陕西秦巴地区石漠化分级标准
Table 5 Grading standards for rocky desertification in the Qinba region, Shaanxi Province

石漠化程度	植被覆盖度/%	基岩裸露率/%	地形坡度/°	植被类型
无石漠化	>70	<30	<15	乔木
潜在石漠化	60~70	30~40	15~18	灌木
轻度石漠化	50~60	40~50	18~22	草丛
中度石漠化	25~50	50~70	22~25	旱地作物型
重度石漠化	<25	>70	>25	无植被型

(2)采用定性和定量结合的综合分析法提取石漠化信息。以石漠化相关分级指标为依据, 对石漠

化的等级赋予不同的值, 通过多次试验(图 2), 确定了各因子的权重^[74], 得出:

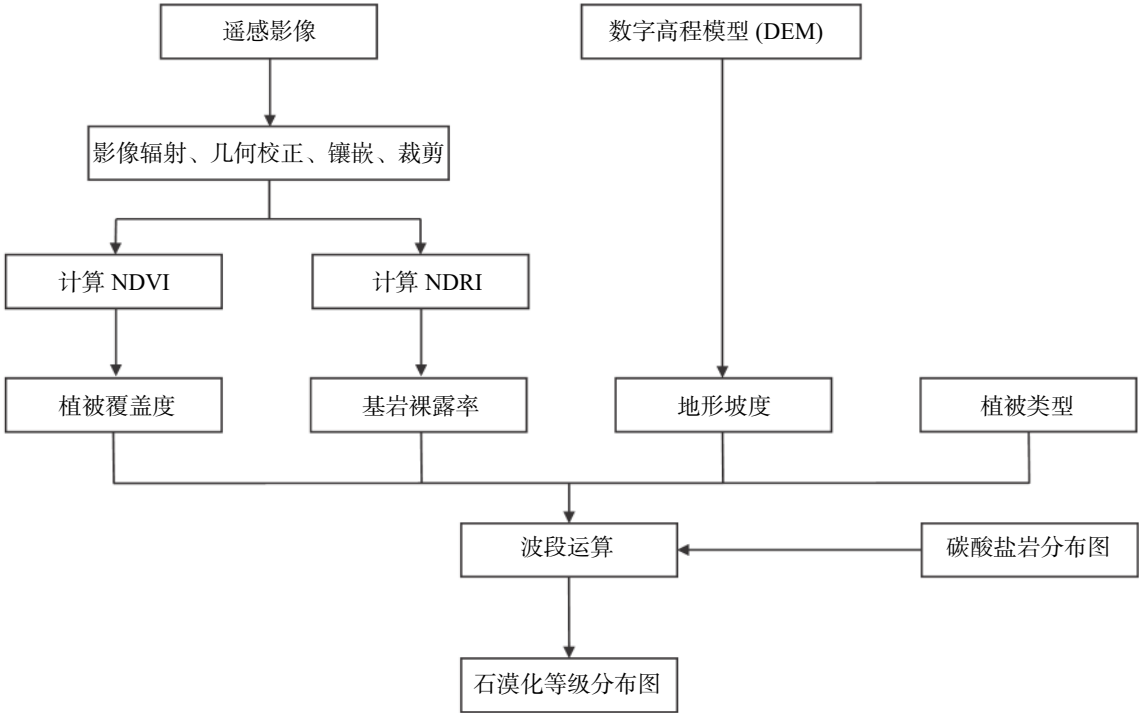


图 2 提取石漠化信息流程图

Fig. 2 Flow chart of extracting information on rocky desertification

综合指标评价=植被覆盖度×0.3+基岩裸露率×0.3+地形坡度×0.2+植被类型×0.2。

将综合指标评价结果在 0~1、1~2、2~4、4~6、6~8 间分别评定为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化。

5.1.1.3 岩溶石漠化遥感解译

以正射纠正后的真彩色遥感影像为基础, 依据石漠化等级划分标准, 完成三种程度石漠化图斑的

勾绘工作, 建立石漠化目视解译标志(表 6)。

根据建立的解译标志, 对提取的石漠化区域采用目视解译为主、人机交互解译为辅的方法^[71], 最终勾绘出 103 个图斑, 其中轻、中、重三种程度石漠化图斑分别为 55 个、28 个和 20 个, 经过拓扑检查、拓扑错误修正后成图, 最终解译结果显示, 陕西秦巴地区岩溶石漠化面积为 63.37 km²。按石漠化程度分布, 重度、中度、轻度石漠化分别为 17.97 km²、21.60 km²、

表 6 石漠化解译标志
Table 6 Signs of interpreting rocky desertification

石漠化程度	遥感影像	无人机影像	影像特征
无石漠化			深绿色; 植被覆盖度高, 基本上为茂密的林地、盆地、农田等地类
轻度石漠化			暗绿色-草绿色; 可见零星裸岩露头, 沟谷地带一般为耕地
中度石漠化			深绿色-灰褐色; 植被覆盖较差, 多为疏林地、疏灌草、半石山等地类, 可见裸岩出露
重度石漠化			浅绿色-黄绿色; 多为林地、灌草等地类, 裸岩成片出露

23.80 km²。其中重度石漠化主要分布在镇安县北阳山、山阳县海螺宫、西乡县大河镇等地, 其余地区主要为中度石漠化和轻度石漠化(图 3)。

5.1.2 无人机遥感调查

由图 3 可知, 研究区内岩溶石漠化呈现小面积、破碎化分布, 卫星遥感解译技术受传感器性能及自

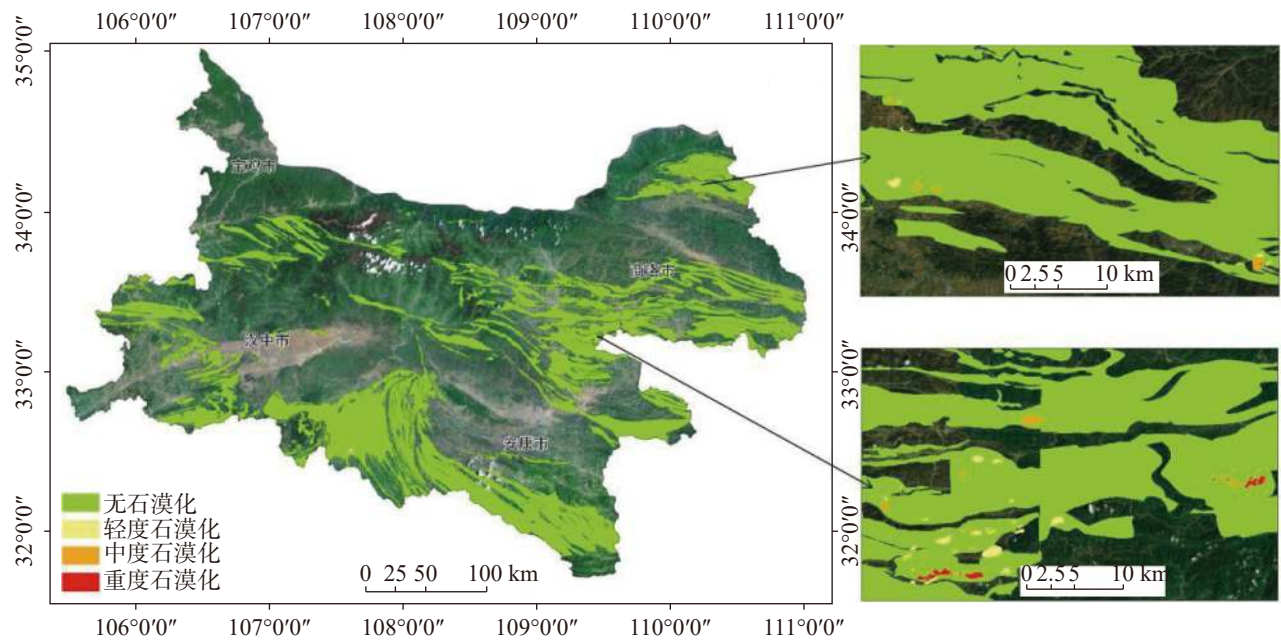


图 3 陕西秦巴地区岩溶石漠化分布图

Fig. 3 Distribution of karst rocky desertification in the Qinba region of Shaanxi Province

然环境的限制,可能无法准确判断阴影部分的地物覆盖类型^[75]。因此,结合无人机遥感调查十分必要,可进一步提高研究区岩溶石漠化调查的完整度和精度。

本次无人机影像获取使用的平台为 DJI-M300RTK, 荷载相机为禅思 P1。在拍摄作业中,根据制图比例尺需求设定飞行高度,飞行航高为 1 500 m; 正射影像及倾斜摄影的平均 GSD 为 ≤ 0.5 m; 航向重叠率均

为 80%; 旁向重叠率为 70%; 航线弯曲度 1%; 行高差 < 5 m、倾斜角 $< 3^\circ$; 旋偏角 $< 10^\circ$ 。获取数据后,通过大疆制图软件进行数据处理,该软件将空三解算、区域网平差与正射校正、影像镶嵌等算法封装,提供一体化数据输入,运算结果及数据处理经后台自动计算后输出结果,得到正射影像和三维模型数字成果(图 4)。

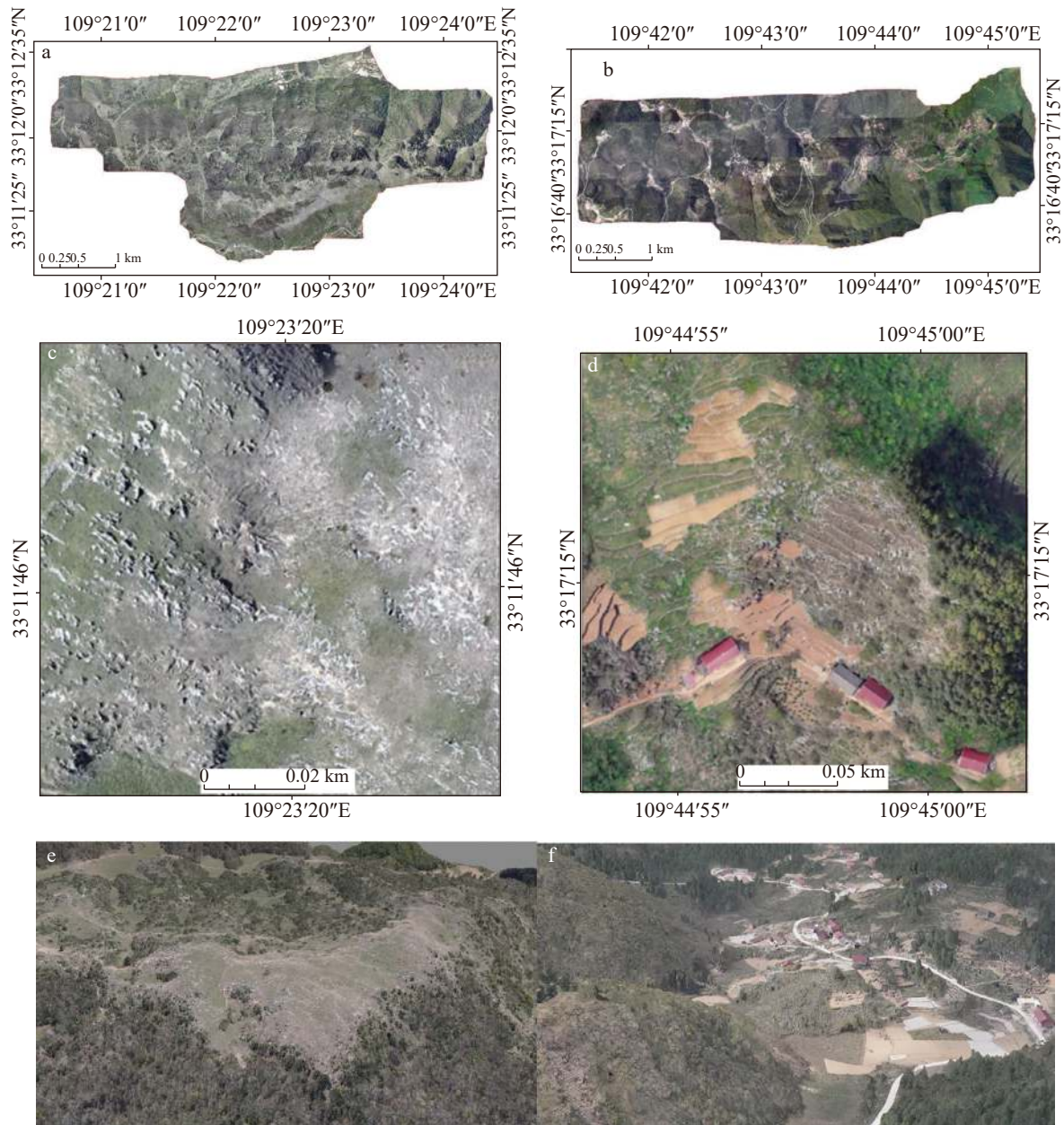


图 4 研究区内部分地区正射影像和三维倾斜示意图

a. 北阳山无人机正射影像图 b. 海螺宫无人机正射影像图 c. 北阳山局部无人机正射影像图 d. 海螺宫局部无人机正射影像图
e. 北阳山无人机三维倾斜示意图 f. 海螺宫无人机三维倾斜示意图

Fig. 4 Orthophotos and 3D oblique schematics of parts of the study area

a. UAV orthophoto map of Beiyang mountain b. UAV orthophoto map of Hailuogong c. local UAV orthophoto map for Beiyang mountain d. local UAV orthophoto map of Hailuogong e. schematic diagram of UAV three-dimensional tilt for Beiyang mountain
f. schematic diagram of UAV three-dimensional tilt for Hailuogong

5.2 碳酸盐岩溶蚀速率分析

岩溶作用是石漠化的成因之一^[41],岩溶作用往往通过溶蚀速率来定量表示^[76]。早在 1984 年,前人就在桂林等地开展了碳酸盐岩溶蚀速率的试验工作。此后,随着环境保护与生态系统修复、石漠化的治理等工作的开展,不少学者从不同的研究方向开展了大量的溶蚀速率试验,获取了丰硕的研究成果^[77]。陕西秦巴地区作为岩溶石漠化非监测区,对其溶蚀速率的研究有助于分析该地区的石漠化成因以及发展趋势,对石漠化治理等工作有重要的指导意义。

本研究在 2021 年 3 月—2022 年 10 月期间,针对不同植被类型开展了溶蚀速率试验研究。在陕西秦巴岩溶区共埋设 945 件标准溶蚀试片样,最终获取 806 个溶蚀速率数据。通过数据综合分析、溶蚀速率影响因素、石漠化程度与人类活动的对比研究等,取得了初步的研究成果。其中气候因素中,降雨量与溶蚀速率呈显著的正相关性,是影响岩溶作用重要的因素之一,同时也是造成南北方岩溶差异的重要原因之一。其次是人类活动越强烈,石漠化越发育^[24]。同时结合卫星遥感解译和无人机遥感调查结果发现,溶蚀速率的大小与岩溶石漠化的发育呈正相关^[78],人类活动加剧了石漠化的发育。

5.3 研究区岩溶石漠化发育现状

通过遥感解译、无人机遥感调查及碳酸盐岩溶蚀速率分析,已初步确定了陕西秦巴地区岩溶石漠化面积为 63.37 km²,按石漠化程度划分,重度、中度、

轻度石漠化面积分别为 17.97 km²、21.60 km²、23.80 km²。总结调查结果,研究区内石漠化发育地区除存在地域差异性外,还存在一些相似的分布规律,具体表现为:从石漠化发育程度来看,灰岩区域较白云岩区域更严重、水系发达区域较缺水干旱区域更严重、新构造越活跃地区石漠化发育越严重。相对于西南地区,陕西秦巴地区岩溶石漠化发育程度较轻,分布面积较小,主要原因为研究区内降雨量较少。镇安县北阳山为岩溶石漠化最严重的地区,石漠化发育面积为 7.28 km²,调查得知,当地曾在 20 世纪 60 年代有过大规模的散养牲畜,严重破坏了植被,而人为肆意砍伐林木更是加剧了石漠化的进程,如今,该地区居民生产方式落后,经济水平较低,饮水问题尤为突出。石漠化同样严峻的还有山阳县海螺宫村,石漠化发育面积为 5.83 km²,此地区地貌为典型的峰丛洼地,极易发育石漠化,人地矛盾亟待解决(图 5)。

6 结论与建议

岩溶石漠化问题无论在过去、现在、未来都是涉及民生和生态两大领域的重要问题,石漠化治理工作任重道远。

(1)本研究分析了 2005 年至 2021 年西南岩溶地区石漠化的发育现状^[27],系统总结了我国西南岩溶地区 4 条石漠化治理经验,分别是综合治理、标本兼治、长短结合、因地制宜。

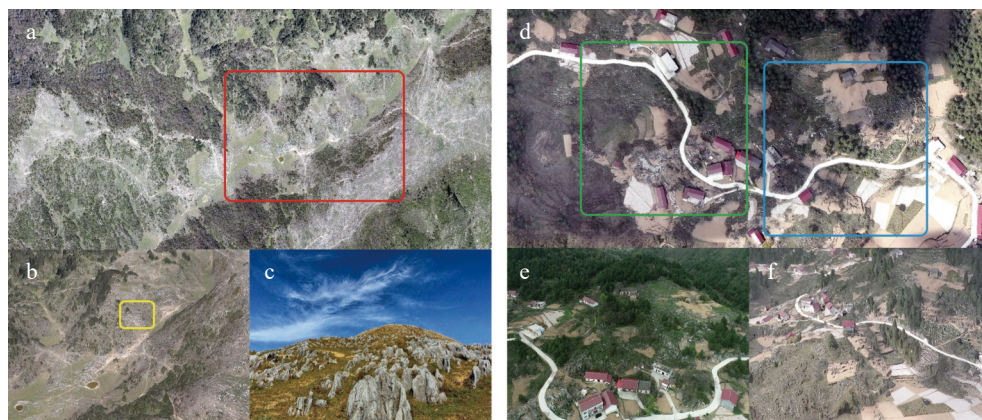


图 5 北阳山(左)和海螺宫(右)岩溶石漠化发育现状图

a. 北阳山航拍图 b. a 中红色框的放大图 c. b 中黄色框实拍图 d. 海螺宫航拍图 e. d 中绿色框的局部放大图 f. d 中蓝色框的局部放大图

Fig. 5 Development of karst rocky desertification in Beiyang mountain (left) and Hailuogong (right)

a. aerial image of Beiyang mountain b. enlarged view of the red frame in a c. picture of the real object of yellow frame in b d. aerial image of Hailuogong e. enlarged view of the green frame in d f. enlarged view of the blue frame in d

(2)总结了秦巴地区陕西片区具备岩溶石漠化发育条件,通过遥感解译、无人机遥感调查、碳酸盐岩溶蚀速率分析三种技术手段,查明了陕西秦巴地区岩溶石漠化发育总面积为 63.37 km²。按石漠化程度划分,为重度、中度、轻度石漠化,分别占 17.97 km²、21.60 km²、23.80 km²。其中重度石漠化区主要分布在镇安县北阳山和山阳县海螺宫。

(3)报道了陕西秦巴地区的岩溶石漠化现状,总结了其分布规律和岩溶溶蚀速率的特点,整体未造成较大的生态威胁,但在石漠化发育严重的北阳山和海螺宫地区,应加大监测和研究力度。

(4)建议:①厘清秦巴地区石漠化的发育成因,与西南岩溶区进行对比,确定该区岩溶石漠化主导因素是自然因素还是人为因素;②通过野外核查、遥感解译、气候变化分析等方法,动态监测石漠化变化,利用地理探测器模型对各影响因素进行贡献率计算;③进一步开展岩溶溶蚀速率影响因素的研究。开展中度-重度石漠化区域的土壤理化性质(土壤水分、二氧化碳浓度、pH、有机质含量、孔隙度)监测工作,并深入分析石漠化地区溶蚀速率和土壤理化性质的关系;④开展陕西秦巴地区石漠化区域的碳汇分析,为陕西地区碳中和研究提供基础资料。

参考文献

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 31-35.
WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 31-35.
- [2] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5798-5808.
DU Wenpeng, YAN Huimin, ZHEN Lin, HU Yunfeng. The experience and practice of desertification control in karst region of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [3] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 冉晨, 陈欢, 习慧鹏, 陈飞, 操玥, 吴路华, 李汇文, 钟昕. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
LUO Xuling, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, TAN Qiu, RAN Chen, CHEN Huan, XI Huipeng, CHEN Fei, CAO Yue, WU Luhua, LI Huiwen, ZHONG Xin. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in southwest karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 680-693.
- [4] 吴协保. 继续推进岩溶地区石漠化综合治理二期工程的现实意义[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 469-475.
WU Xiebao. Realistic significance of carrying forward the project phase II for comprehensive treatment of rocky desertification in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 469-475.
- [5] 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.
- [6] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
WANG Shijie, LI Yangbing, LI Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657-666.
- [7] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 石漠化的概念及其内涵[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(6): 87-90.
WANG Delu, ZHU Shouqian, HUANG Baolong. Discussion on the conception and connotation of rocky desertification[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(6): 87-90.
- [8] 苏维词, 朱文孝, 熊康宁. 贵州喀斯特山区的石漠化及其生态经济治理模式[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(1): 21-26.
SU Weici, ZHU Wenxiao, XIONG Kangning. Stone desertification and eco-economics improving model in Guizhou karst mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(1): 21-26.
- [9] 王瑞江, 姚长宏, 蒋忠诚, 裴建国. 贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(3): 45-50.
WANG Ruijiang, YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, PEI Jianguo. Characteristics, formation, and control of rocky desertification in Liupanshui City, Guizhou province[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(3): 45-50.
- [10] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 29-32, 79.
SU Weici. Controlling model for rocky desertification of karst mountainous region and its preventing strategy in southwest, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- [11] 苏维词, 杨华, 李晴, 郭跃, 陈祖权. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 447-451.
SU Weici, YANG Hua, LI Qing, GUO Yue, CHEN Zuquan. Rocky land desertification and its controlling measurements in the karst mountainous region, southwest of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 447-451.
- [12] 李阳兵. 中国西南岩溶山地石漠化转型演变解析[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 698-706.
LI Yangbing. Analysis on transformation and evolution of rocky desertification in karst mountainous areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 698-706.
- [13] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.
YUAN Daoxian. Global view on karst rock desertification and

- integrating control measures and experiences of China[J]. *Prata-cultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [14] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. *生态经济*, 2015, 31(1): 23-30.
- XIONG Kangning, CHI Yongkuan. The problems in Southern China karst ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(1): 23-30.
- [15] 许尔琪. 基于CiteSpace的喀斯特石漠化国际研究进展[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 728-738.
- XU Erqi. Progress of international research of karst rocky desertification based on CiteSpace[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 728-738.
- [16] 余梦, 李阳兵, 罗光杰. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4267-4283.
- YU Meng, LI Yangbing, LUO Guangjie. Evolution trend of rocky desertification in karst mountainous areas of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4267-4283.
- [17] 熊康宁, 朱大运, 彭韬, 喻理飞, 薛建辉, 李坡. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7109-7113.
- XIONG Kangning, ZHU Dayun, PENG Tao, YU Lifei, XUE Jianhui, LI Po. Study on ecological industry technology and demonstration for karst rocky desertification control of the karst plateau-gorge[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7109-7113.
- [18] 袁成军, 熊康宁, 容丽, 翁应芳. 喀斯特石漠化生态恢复中的生物多样性研究进展[J]. *地球与环境*, 2021, 3(3): 336-345.
- YUAN Chengjun, XIONG Kangning, RONG Li, WENG Yingfang. Research progress on the biodiversity during the ecological restoration of karst rocky desertification[J]. *Earth and Environment*, 2021, 3(3): 336-345.
- [19] 倪隆康, 顾大彤, 何文, 黄玉清, 陈中义. 岩溶区植物生态适应性研究进展[J]. *生态学杂志*, 2019, 8(7): 2210-2217.
- NI Longkang, GU Daxing, HE Wen, HUANG Yuqing, CHEN Zhongyi. Research advances in plant ecological adaptability in karst area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 8(7): 2210-2217.
- [20] 周晓果, 温远光, 王磊, 孙冬婧, 明安刚, 贾宏炎, 朱宏光, 赵岩岩, 李锦良, 黄勇杰, 梁佳. 岩溶石漠化不同修复林分林下植被和植物多样性的变化[J]. *广西科学*, 2022, 29(1): 71-87.
- ZHOU Xiaoguo, WEN Yuanguang, WANG Lei, SUN Dongjing, MING Angang, JIA Hongyan, ZHU Hongguang, ZHAO Yanyan, LI Jinliang, HUANG Yongjie, LIANG Jia. Changes in understory vegetation and plant diversity of different restoration stands in karst rocky desertification[J]. *Guangxi Sciences*, 2022, 29(1): 71-87.
- [21] 任娟刚, 洪增林, 唐力, 王鹏, 王研, 张静, 崔娜. 陕西镇巴三元天坑群岩溶地质遗迹特征及成因[J]. *四川地质学报*, 2021, 41(3): 523-528.
- REN Juangang, HONG Zenglin, TANG Li, WANG Peng, WANG Yan, ZHANG Jing, CUI Na. Characteristics and genesis of karst geological relics of Zhenba Sanyuan sinkhole group in Shaanxi[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(3): 523-528.
- [22] 窦文俊, 李姝, 彭雪嫣, 亓宝, 王琦. 陕南秦巴山区黏菌的物种组成和分布格局[J]. *菌物学报*, 2023, 42(1): 196-216.
- DOU Wenjun, LI Shu, PENG Xueyan, QI Bao, WANG Qi. Species composition and distribution pattern of slime molds in the Qinba mountains of southern Shaanxi[J]. *Journal of Fungal Research*, 2023, 42(1): 196-216.
- [23] 蔺龙健, 张亚峰, 王颖维, 钱信禹. 南水北调中线工程丹江源地区土壤养分状况分析评价[J]. *陕西地质*, 2022, 40(2): 75-81.
- LIN Longjian, ZHANG Yafeng, WANG Yingwei, QIAN Xinyu. Analysis and evaluation of soil nutrient status in Danjiangyuan area of the middle route of the South-to-North water diversion project[J]. *Geology of Shaanxi*, 2022, 40(2): 75-81.
- [24] 杨治国, 陈清敏, 成星, 贺凯凯, 张瑜, 唐力, 艾昊, 张文硕. 南北地理分界线——秦巴山区碳酸盐岩溶蚀速率研究[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(4): 819-833.
- YANG Zhiguo, CHEN Qingmin, CHENG Xing, HE Kaikai, ZHANG Yu, TANG Li, AI Hao, ZHANG Wenshuo. Karst dissolution rates of carbonate rocks in north-south geographical boundary of China—the Qinba mountain area[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(4): 819-833.
- [25] 但新球, 李梦先, 吴协保, 吴照柏, 彭长清, 贺东北, 屠志方. 中国岩溶地区石漠化现状[J]. *中南林业调查规划*, 2019, 38(1): 1-6, 34.
- DAN Xinqiu, LI Mengxian, WU Xiebao, WU Zhaobai, PENG Changqing, HE Dongbei, TU Zhifang. The present situation of rocky desertification in karst areas of China[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2019, 38(1): 1-6, 34.
- [26] 国家林业和草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[N]. *中国绿色时报*, 2018.
- [27] 国家林业和草原局. 岩溶地区第四次石漠化调查结果[N]. 国家林业和草原局政府网, 2023.
- [28] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 李思楠, 苗培培. 滇东南喀斯特区域石漠化时空格局演变研究: 以广南县为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 707-717.
- WANG Qian, ZHAO Xiaoping, PU Junwei, LI Sinan, MIAO Peipei. Study on temporal and spatial pattern evolution of karst rocky desertification region of southeast Yunnan: A Case Study of Guangnan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 707-717.
- [29] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.
- WANG Shijie. The most serious eco-geologically environmental problem in Southwestern China—karst rocky desertification[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 120-126.
- [30] 唐建生, 夏日元, 徐远光, 关碧珠, 陈宏峰. 广西中部岩溶区农业干旱成因与治旱对策[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 301-307.
- TANG Jiansheng, XIA Riyuan, XU Yuanguang, GUAN Bizhu, CHEN Hongfeng. Causes and countermeasures to drought in karst agricultural area in central Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(4): 301-307.

- [31] 光耀华. 岩溶浸没内涝灾害研究[J]. *工程地质学报*, 2003, 11(2): 223-224.
GUANG Yaohua. Study on inundation hazard in karst area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(2): 223-224.
- [32] 潘林艳, 张文婷, 郭纯青. 中国西南岩溶地下河系统旱涝致灾因素模拟分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(4): 693-699.
PAN Linyan, ZHANG Wenting, GUO Chunqing. Simulation analysis of drought-flood disaster factors for karst underground river system, Southwest China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(4): 693-699.
- [33] 郭纯青, 周蕊, 潘林艳. 中国西南岩溶区1900—2012年旱涝灾害分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(2): 12-15.
GUO Chunqing, ZHOU Rui, PAN Linyan. Analysis of drought and flood disasters in karst area of Southwest China from 1900 to 2012[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(2): 12-15.
- [34] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 杨奇勇, 覃星铭, 喻琦雯. 广西岩溶区的水土流失特点及其防治[J]. *广西科学*, 2018, 25(5): 449-455.
JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, DENG Yan, YANG Qiyong, QIN Xingming, YU Qiwen. Feature and treatment of soil erosion in karst areas of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 449-455.
- [35] WANG Shijie, LIU Xiuming, ZHANG Dianfa. Karst rocky desertification in Southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation and Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [36] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
PENG Wanxia, WANG Kelin, SONG Tongqing, ZENG Fuping, WANG Jiurong. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [37] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 曹洪麟, 李先琨, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林群落的组成与生物多样性特征[J]. *生物多样性*, 2010, 18(4): 355-364.
SONG Tongqing, PENG Wanxia, ZENG Fuping, WANG Kelin, CAO Honglin, LI Xiankun, QIN Wengeng, TAN Weining, LIU Lu. Community composition and biodiversity characteristics of forests in karst cluster-peak-depression region[J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(4): 355-364.
- [38] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [39] Tong Xiaowei, Brandt M, Yue Yuemin. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [40] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
HE Xiaojia, WANG Lei, KE Bing, YUE Yuemin, WANG Kelin, CAO Jianhua, XIONG Kangning. Progress on ecological conservation and restoration for China karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [41] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于中国西南石漠化的若干问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 593-598.
LI Yangbing, WANG Shijie, RONG Li. Problems of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(6): 593-598.
- [42] 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.
- [43] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 李凤全. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨: 以贵州省为例[J]. *热带地理*, 2004, 24(2): 145-149.
LI Ruiling, WANG Shijie, XIONG Kangning, LI Fengquan. A study on rocky desertification evaluation index system: A case study of Guizhou Province[J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(2): 145-149.
- [44] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 1-10.
DAI Quanhong, YAN Youjin. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in Southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 1-10.
- [45] 郑翀. 贵州省大方地区石漠化现状及成因分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
ZHENG Chong. Current situation and the causes analysis of rocky desertification in Dafang area, Guizhou Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [46] Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N, Zhou Z F. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst desertified land in Guizhou Province, PR China: Phenomena and mechanisms[J]. *Land Degradation and Development*, 2004, 15(2): 123-131.
- [47] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 刘方. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 419-427.
LONG Jian, JIANG Xinrong, DENG Qiqiong, LIU Fang. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 419-427.
- [48] 袁春, 周常萍, 童立强, 潘小菲. 贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策[J]. *现代地质*, 2003, 17(2): 181-185.
YUAN Chun, ZHOU Changping, TONG Liqiang, PAN Xiaofei. The causes and countermeasures of land rocky-desertification in Guizhou Province[J]. *Geoscience*, 2003, 17(2): 181-185.
- [49] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(6): 573-582.
WANG Shijie, LI Yangbing. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 573-582.

- [50] 谷晓平, 于飞, 刘云慧, 罗宇翔. 降雨因子对喀斯特石漠化发生发展的影响研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 66-70.
GU Xiaoping, YU Fei, LIU Yunhui, LUO Yuxiang. Impact of precipitation factor on rocky desertification in karst areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 66-70.
- [51] 曾思博. 西南地区近40年气候变化及其对岩溶作用碳汇的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
ZENG Sibao. Climate change characteristics of karst area in SW China and its impacts on karst-related carbon sink during recent 40 years[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [52] 黄嘉丽, 秦年秀. 近50年来我国西南地区暴雨变化特征分析[J]. *低碳世界*, 2020, 10(12): 229-230.
- [53] 王德炉. 喀斯特石漠化的形成过程及防治研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
WANG Delu. Study on karst rocky desertification forming process and its control technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003.
- [54] 张荣才, 刘葵. 弥勒市石漠化治理现状与对策分析[J]. *林业建设*, 2014, 2(2): 60-63.
ZHANG Rongcai, LIU Kui. Present situation and countermeasure about rocky desertification in Mile City[J]. *Forestry Construction*, 2014, 2(2): 60-63.
- [55] 陈朝军, 袁道先, 程海, Tsai Luen Yu, Chuan Chou Shen, R Lawrence Edwards, 吴尧, 肖思雅, 张键, 王涛, 黄冉, 刘子琦, 李廷勇, 李俊云. 人类活动和气候变化触发了中国西南石漠化的扩张[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1950-1963.
- [56] Yan Xiang, Cai Yunlong. Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(2): 193-200.
- [57] 李瑞玲, 王世杰, 张殿发. 贵州喀斯特地区生态环境恶化的人为因素分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2002, 21(1): 43-47.
LI Ruiling, WANG Shijie, ZHANG Dianfa. The role of man-made factors in eco-environmental deterioration in Guizhou karst areas[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2002, 21(1): 43-47.
- [58] 中国科学院. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议[J]. *中国科学院院刊*, 2003(3): 169.
- [59] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 40-50.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 40-50.
- [60] 吴协保, 屠志方, 李梦先, 但新球, 吴照柏. 岩溶地区石漠化防治制约因素与对策研究[J]. *中南林业调查规划*, 2013, 32(4): 68-72.
WU Xiebao, TU Zhifang, LI Mengxian, DAN Xinqiu, WU Zhaobai. Study on prevention and cure countermeasures of rocky desertification in karst areas[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2013, 32(4): 68-72.
- [61] 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 吕仕洪, 罗为群, 蓝芙宁, 曹建华. 论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术: 以广西平果果化示范区为例[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(1): 50-55.
JIANG Zhongcheng, LI Xiankun, QIN Xiaoqun, LYU Shihong, LUO Weiqun, LAN Funing, CAO Jianhua. Comprehensive improving technique to rocky desertification in karst peak-cluster depression: A case study at Guohua ecological experimental area, Pingguo, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(1): 50-55.
- [62] 罗征宇, 舒正强. 对中国南方喀斯特岩溶山区草地畜牧业发展模式: “晴隆模式”的探讨[J]. *中国牛业科学*, 2014, 40(3): 80-82.
LUO Zhengyu, SHU Zhengqiang. Explore the "Qinglong Mode" the South China karst mountain grassland animal husbandry development model[J]. *China Cattle Science*, 2014, 40(3): 80-82.
- [63] 宋希娟, 刘淑娟, 寻瑞, 王克林. 喀斯特岩溶地区“草—畜”农业生产模式初探: 以古周村为例[J]. *湖南农业科学*, 2017(6): 66-99.
SONG Xijuan, LIU Shujuan, XUN Rui, WANG Kelin. Primary research "forage grasses—livestock" ecological product mode, the karst region of Zhougu village in northwest Guangxi[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(6): 66-99.
- [64] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 吴照柏. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 391-396.
WU Xiebao, SUN Jilin, LIN Qiong, WU Zhaobai. Research on division treatment to eco-construction of karst rock deserted land in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 391-396.
- [65] 严宁珍. 新构造运动对西南地区石漠化形成的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 35(3): 114-118.
YAN Ningzhen. Effect of neotectonics on formation and evolution of rock desertification in southwest, China[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 35(3): 114-118.
- [66] 江帆, 张锋, 乔峰山, 韩磊, 邢艳海, 杨振明. 河南省岩溶地区石漠化监测现状分析[J]. *河南林业科技*, 2016, 36(2): 30-32, 39.
JIANG Fan, ZHANG Feng, QIAO Fengshan, HAN Lei, XING Yanhai, YANG Zhenming. Analysis of monitoring status of rocky desertification in karst areas of Henan Province[J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2016, 36(2): 30-32, 39.
- [67] 党国锋, 纪树志. 基于GIS的秦巴山区土地生态敏感性评价: 陕南山区为例[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(7): 118-127.
DANG Guofeng, JI Shuzhi. Ecological sensitivity evaluation based on GIS in Qinba mountainous area: A case study of Longnan mountainous area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(7): 118-127.
- [68] 杨妍妨, 程洋, 王永. 丹江口库区石漠化特征及成因分析[J]. *人民长江*, 2022, 53(5): 101-105, 117.
YANG Yanfang, CHEN Yang, WANG Yong. Rocky desertification characteristics in Danjiangkou reservoir area and cause analysis[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(5): 101-105, 117.
- [69] 周忠发. 遥感和GIS技术在贵州喀斯特地区土地石漠化研究中

- 的应用[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(3): 52-54, 66.
- ZHOU Zhongfa. Application of remote sensing and GIS technology for land desertification in Guizhou karst region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3): 52-54, 66.
- [70] 章程, 谢运球, 吕勇, 蒋勇军, 曹建华, 姜光辉, 杨平恒, 王冬银. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响: 以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1181-1188.
- ZHANG CHENG, XIE Yunqiu, LYU Yong, JIANG Yongjun, CAO Jianhua, JIANG Guanghui, YANG Pingheng, WANG Dongyin. Impact of land-use patterns upon karst processes: Taking Nongla Fengcong depression area in Guangxi as an example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [71] 秦张丹, 周丽芸. 基于遥感技术的石漠化调查研究[J]. *国土资源导刊*, 2021, 18(3): 42-46.
- QIN Zhangdan, ZHOU Liyun. Investigation and research on rocky desertification based on remote sensing technology[J]. *Land & Resources Herald*, 2021, 18(3): 42-46.
- [72] 刘思晨, 黄羲增, 马瑞, 孙斌, 姬翠翠. 基于高分六号遥感数据的区域石漠化监测应用[J]. *卫星应用*, 2022(11): 44-50.
- [73] 党宇宁, 南亲江, 吴虹. 坡度因子对喀斯特石漠化的影响[J]. *地质学刊*, 2016, 40(4): 674-677.
- DANG Yuning, NAN Qinjiang, WU Hong. Influence of slope factor on karst desertification[J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(4): 674-677.
- [74] 王跃跃. 基于多源数据的石漠化信息提取及地质驱动因素研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- WANG Yueyue. Research on rocky desertification information extraction and geological driving factors based on multi-source data[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [75] 林家元, 程亚男. 基于无人机遥感影像的裸岩识别及早期石漠化评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 125-135.
- LIN Jiayuan, CHEN Ya'nan. Identification of bare rock and evaluation of early rocky desertification using UAV remote sensing image[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(12): 125-135.
- [76] 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 亚高山不同植被类型区的雨季岩溶溶蚀速率研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(5): 488-495.
- WANG Dongyin, ZHANG Cheng, XIE Shiyu, YANG Pingheng, ZHANG Wenhui. Karst dissolution rates of areas with different vegetation types in the sub-mountain regions[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(5): 488-495.
- [77] 梁永平, 王维泰, 段光武. 鄂尔多斯盆地周边地区野外溶蚀试验结果讨论[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(4): 315-320.
- LIANG Yongping, WANG Weitai, DUAN Guangwu. Discussion on the results of field corrosion test around Ordos Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 315-320.
- [78] 郭红艳. 石漠化对土壤碳库和碳排放的影响研究: 以贵州省关岭县为例[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- GUO Hongyan. Study on the influence of the rocky desertification on soil carbon pool and soil carbon emissions: A case in Guanling county of Guizhou Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.

Research progress on karst rocky desertification in Southwest China and the Qinba region of Shaanxi Province

HE Kaikai¹, CHEN Qingmin^{1,2,3,4,7}, CHENG Xing^{1,6,7}, YANG Zhiguo¹,
HAN Jing⁵, CAO Jiangtao⁵, AI Hao^{1,7}, ZHANG Wenshuo¹

(1. Shaanxi Experimental Center of Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Postdoctoral Research Station of Shaanxi Geological Survey Institute, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. Qinba Research Branch of China Society of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 5. Natural Resources Shaanxi Satellite Application Technology Center, Xi'an, Shaanxi 710002, China; 6. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an, Shaanxi 710061, China; 7. Ecological Environmental Damage Identification and Assessment Center, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract Southwest China is one of the three largest continuous karst clusters in the world; therefore, studies on karst rocky desertification in this area are very important. For more than 20 years' control, the decreasing area and risk of karst rocky desertification has contributed to the continuous ecological improvement. Nowadays, studies on rocky desertification mainly focus on the eight provinces in Southwest China, which have been designated as rocky desertification monitoring areas by the Chinese government. After the first phase of the comprehensive control project for karst rocky desertification in 2016, the expansion trend of rocky desertification in the southwest region was effectively curbed. Subsequent articles published tend to focus on analyzing the current situation, comprehensive management, or species adaptability of rocky desertification monitoring areas. However, the Qinba region in Shaanxi Province is located outside the monitoring area. In the process of studying the karst geological relics of the Zhenba

Sanyuan Tiankeng Group, signs of rocky desertification have been found, but there still exists a research gap in the investigation and research on karst rocky desertification in this area which is one of the areas with the richest biodiversity in China, known as "ecological lung", "central water tower" and "biological gene bank". Unfortunately, this area is burdened with poverty, so the investigation and study of karst rocky desertification in the Qinba region of Shaanxi Province is of great significance to ensure green and high-quality development and ecological civilization construction.

In this paper, by analyzing the current situation of karst rocky desertification in Southwest China, we summarized its harm to the ecological environment and social economy, clarify natural and human factors resulting in rocky desertification, and integrate the typical treatment experience in Southwest China. We also introduce three technical methods, including remote sensing interpretation, UAV remote sensing survey and analysis of carbonate dissolution rate, to provide a scientific basis for studies on karst rocky desertification in the Qinba region of Shaanxi Province.

Study results show that the area of karst rocky desertification in the Qinba region covers 63.37 km², and the areas of severe, moderate and mild rocky desertification cover 17.97 km², 21.60 km² and 23.80 km², respectively. Based on the survey results, there are both regional differences and some similarities in distribution patterns in the areas of rocky desertification development. Specifically, the degree of rocky desertification in the limestone area is more severe than that in the dolomite area. It is also more severe in the area with developed water system than that in the arid and semi-arid area, and the more active the new structure is, the more severe the rocky desertification is. Compared to the Southwest China, the degree of karst rocky desertification in the Qinba region of Shaanxi Province is relatively light, with a smaller distribution area, mainly due to the less rainfall in the study area. The karst rocky desertification in Beiyang mountain of Zhen'an county is the most severe, with an area of 7.28 km². In the 1960s, a large-scale free-range of livestock severely damaged vegetation. The indiscriminate deforestation by humans further exacerbated the process of rocky desertification. The rocky desertification in Hailuogong village of Shanyang county is also severe, covering an area of 5.83 km², because the landform in this area is a typical peak-cluster depression, which is likely developed into rocky desertification. The contradiction between people and land needs to be solved urgently.

In conclusion, more monitoring and research efforts are needed in Beiyang mountain and Hailuogong where the rocky desertification is severe. Firstly, we should clarify the causes of rocky desertification in the Qinba region and compare them with the causes in Southwest China to determine whether the rocky desertification is mainly resulted from natural factors or human factors. Secondly, we should know how to clarify the causes of karst rocky desertification in the Qinba region; for example, we can dynamically monitor the change of rock desertification by field verification, remote sensing interpretation, climate change analysis, etc. We can also calculate the contribution rate of each influence factor by geographical detector model. Thirdly, we should further study influence factors of karst dissolution rate. We can monitor physical and chemical properties of soil (soil moisture, carbon dioxide concentration, pH, organic matter content and porosity) in areas with moderate to severe rocky desertification, and analyze the relationship between dissolution rate and physical and chemical properties of soil in rocky desertification areas. Finally, in order to provide basic data for carbon neutrality research in Shaanxi, we should conduct studies on the carbon sink of rocky desertification areas in the Qinba region, with the methods such as dissolution test pieces and hydrochemical runoff.

Key words karst rocky desertification, current situation, harm, cause of formation, managerial experiences, the Qinba region of Shaanxi Province

(编辑 张玲)