

黔中白云岩石漠区小流域土地利用变化及生态效益

杨光能¹, 张喜¹, 薛建辉², 吴永波², 侯贻菊¹, 崔迎春¹, 舒德远¹

(1.贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005; 2.南京林业大学, 南京 210037)

摘要:为明晰灰质白云岩石漠区和砾质白云岩石漠区综合治理工程中植被恢复模式的治理效果,采用科研示范和工程治理相融合、遥感影像和实地调查相结合的方法,在黔中不同白云岩组石漠化小流域分析了相应研究区及不同林草恢复模式的生态效益变化。结果表明:(1) 普定研究区属灰质白云岩石漠区,凯里研究区属砾质白云岩石漠区,2016 年 2 个研究区农林地景观基质相似度较高,普定研究区石漠化趋势性较强。(2) 2016—2020 年,普定研究区和凯里研究区林地面积转入量>转出量、耕地面积转入量<转出量。植被覆盖率增加、土壤侵蚀模数降低和石漠化等级面积率降低,普定研究区综合治理生态效益显著。(3) 普定研究区和凯里研究区植被覆盖率增加量、土壤侵蚀模数降低率和石漠化等级面积降低率呈生态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式的变化趋势,生态修复模式和封山育林模式的生态效益呈普定研究区>凯里研究区的变化趋势。综上,具有相似景观背景的石漠化小流域经综合治理后,呈植被覆盖率增加、土壤侵蚀模数降低和石漠化等级面积率降低的趋势,石漠化治理效果呈生态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式的变化趋势,灰质白云岩石漠区治理效果比砾质白云岩石漠区显著。

关键词:灰质白云岩石漠区;砾质白云岩石漠区;土地利用面积结构;林草恢复模式;植被覆盖率;土壤侵蚀模数;石漠化等级面积率

中图分类号:P642.25; S718.56; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0214-10

Changes in Land Use and Ecological Benefits in Different Small Watersheds with Dolomite Rock Desertification in Central Guizhou Province

YANG Guangneng¹, ZHANG Xi¹, XUE Jianhui², WU Yongbo²,

HOU Yiju¹, CUI Yingchun¹, SHU Deyuan¹

(1.Guizhou Provincial Academy of Forestry,

Guiyang 550005, China; 2.Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To analyse the governance effect of the vegetation restoration mode of the comprehensive treatment project in various calcareous dolomite deserts and gravelly dolomite deserts, the changes in the ecological benefits of different forest and grass restoration modes in small watersheds with dolomite rocky desertification in central Guizhou Province were analysed using a method integrating scientific research, engineering management, remote-sensing imagery, and field investigations. The results showed that: (1) The Puding research area (PDRA) belongs to a calcareous dolomite rocky desertification area, and the Kaili research area (KLRA) belongs to a gravelly dolomite rocky desertification area. The landscape matrix similarity of the agriculture and forests in PDRA and KLRA is high, and the rocky desertification trend in PDRA was strong in 2016. (2) From 2016 to 2020, in both PDRA and KLRA, the input amount was higher than that of the output in forestland, while the relative value was to the contrary in farmland. Additionally, the vegetation coverage rate increased and the soil erosion modulus and the rate of development of the rocky desertification grade areas decreased. The ecological benefit of the comprehensive control in PDRA was remarkable. (3) It was observed that as the vegetation coverage increases, the soil erosion modulus decreases, and the rocky desertification grade area decreases most in the ecological restoration model and least in the grassland animal

收稿日期:2021-12-29

修回日期:2022-02-14

资助项目:科技部重点研发计划“喀斯特高原石漠化综合治理及生物能源产业研究与示范”(2016YFC0502605)

第一作者:杨光能(1992—),男,云南临沧人,硕士,助理工程师,主要从事植被恢复生态学研究。E-mail:1092491861@qq.com

通信作者:张喜(1964—),男,四川苍溪人,博士,研究员,主要从事生态学和竹林经营学研究。E-mail:zhangxigzfa@tom.com

husbandry model. The ecological benefits of the ecological restoration model and the closed forest model in PDRA are higher than those in KLRA. In general, after comprehensive treatment in similar small watersheds with rocky desertification, it was observed that the vegetation coverage rate increased and the soil erosion modulus and the rate of development of the rocky desertification grade areas decreased. The governance effect of rocky desertification was observed most in the ecological restoration model and least in the grassland animal husbandry model, ergo, the governance effect of calcareous dolomite desert was better than that of gravelly dolomite desert.

Keywords: calcareous dolomite desert; gravelly dolomite desert; land use area structure; forest and grass restoration mode; vegetation coverage rate; soil erosion modulus; area ratio of rocky desertification grade

喀斯特石漠化是在岩溶地质环境背景下,受自然因素及人类活动的综合影响,植被结构发生变化导致地表土壤流失、下覆碳酸盐岩石裸露,地貌呈现类似荒漠化景观的土地退化过程^[1],是我国西南地区重大生态环境问题之一。2006 年国家启动岩溶地区石漠化综合治理工程^[2-3],重点解决喀斯特石漠区水土^[4-6]耦合机理、治理途径及模式^[7],西南喀斯特部分地区的土地利用结构及植被覆盖率发生了较大改变^[8],其中退耕还林工程的贡献率较高^[9]。石漠化类型及程度和母岩性质有明显的相关性^[10],由石灰岩组发育的显性石漠化基岩裸露面积大,小生境类型多样,重视程度高,治理途径及模式较为成熟^[7];由白云岩组发育的隐性石漠化基岩裸露面积小,母岩物理崩解高于化学溶解,地表堆积物相对连续,土壤石砾量高,是较易被忽视、植被恢复较为困难的类型,成为石漠化综合治理的难点。石漠化综合治理主要以小流域^[2-3,11-12]为单位,在气象干旱和水文干旱关联性^[13]、土地利用演变和石漠化分布格局^[14]、植被恢复中的树种选择^[15]、生物炭施用对土壤微生物^[16]及种子萌发^[17]的影响、石漠化综合治理生态效益评价等^[12]方面已有部分研究。利用不同时期遥感图像信息^[11,18-19]和实地斑块调查结合的方法分析白云岩石漠化小流域及不同植被恢复模式的植被类型及动态变化,提取相关指标分析主要生态效益^[12]变化的研究还未见报道。

本文在国家重点研发计划课题^[15,20]资助下,结合贵州省 2015 年启动的石漠化综合治理工程,在 2 个相似生物气候背景的不同白云岩组石漠化综合治

理小流域内选择一级支流建立研究区,分析土地利用结构及植被类型变化、不同研究区及植被恢复模式的主要生态效益指标动态变化过程,总结相似生物气候不同白云岩组石漠化小流域综合治理工程中植被恢复模式的效应差异性,为石漠化综合治理提供新的理论依据及示范案例。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

普定县城关镇沙湾小流域(26°17'30"—26°22'35"N, 105°43'25"—105°48'41"E,面积为 35.47 km²,海拔范围 1 100~1 450 m)和凯里市凯棠镇小河小流域(26°40'1"—26°46'15"N,108°3'41"—108°9'24"E,面积为 44.47 km²,海拔范围 560~1 100 m)同属岩溶高原石漠化综合治理区^[2],为贵州省 2015 年启动的岩溶地区石漠化综合治理小流域。沙湾小流域属乌江流域,年平均气温为 15.1℃,年平均降雨量为 1 396.9 mm,山地多,坝地少,为山原峰丛洼地地貌,灰质白云岩分布广泛,其次为白云岩和泥质砂岩等,其中耕地面积占 37.1%、林地面积占 46.6%、草地面积占 6.0%。小河小流域属清水江流域,年平均气温为 15.7℃,年平均降雨量为 1 234.5 mm,河流切割显著,相对高差较大,为低山地貌,砾质白云岩分布广泛,其次为石灰岩和碎屑沉积岩等,其中耕地占 41.41%、林地占 49.71%、草地占 2.05%。2 个小流域同属亚热带季风气候区及潜度—轻度石漠区,沙湾小流域重度石漠化面积占相当比例(表 1),自然地理和社会经济主要指标存在一定差异,在 2 县(市)有较高的代表性。

表 1 不同研究区所在小流域生态环境及社会经济主要指标对比

小流域	社会经济主要指标				气象要素			石漠化等级及面积率/%				
	人口密度/	人均耕地/	农民粮食/	农民纯收入/	1 月	7 月	≥10℃	重度	中度	轻度	潜度	无
	(人·km ⁻²)	(m ² /人)	(kg/人)	(元/人)	均温/℃	均温/℃	积温/℃					
沙湾	243	1134	146	6069	5.2	23.0	4556	1.4	6.7	33.6	22.0	36.4
小河	322	1600	780	1300	4.7	25.6	4832	0	11.4	21.1	20.2	47.3

注:表中数据分别来源于 2015 年普定县和凯里市人民政府的《岩溶石漠化综合治理实施方案》(2015—2017 年)。

1.2 治理原则与主要治理模式

2 个小流域土地利用类型相对完备,具备一般石漠化小流域中“山—水—林—草—田—路”一体化的基本特征。石漠化综合治理实施方案遵循以小流域为设计及治理单元,因地制宜、综合治理,预防为主、全面规划、综合防治,经济效益、社会效益和生态效益相统一,把石漠化综合防治和农村产业结构调整、替代产业培植、脱贫解困、农村经济发展及新农村建设相结合,坚持全民参与和先进科技成果支撑,依法依

规防治和治理成效保护。

石漠化综合治理工程措施中(表 2),沙湾小流域和小河小流域封山育林模式面积占治理总面积的 71.00%,65.58%,生态修复模式中防护林营造工程面积的相应值为 1.09%,13.43%,蓄水池和机耕道建设比例不同,其中小河小流域草地畜牧业模式面积比例为 33.33%,沙湾小流域生态修复模式中经济林营造面积比例为 15.57%。2 个小流域石漠化综合治理重在林草地植被恢复,辅以部分工程措施。

表 2 不同研究区所在小流域石漠化综合治理主要模式及参数

小流域	治理面积/ hm ²	封山育林模式 面积/hm ²	生态修复模式面积		草地畜牧业模式面积		蓄水池数/ 个	机耕道 长度/m
			防护林/hm ²	经济林/hm ²	草地/hm ²	棚圈工程/m ²		
沙湾小流域	1400	994	188	218			15	7.8
小河小流域	1380	905	15		460	6000	40	7.0

注:表中数据来源同表 1,其中蓄水池的规格为 30 m³,机耕道宽 3.5 m。

课题实施中结合石漠化综合治理工程建设、参与技术支撑与服务,研发、中试和引进了系列先进技术。(1) 封山育林模式中,引入石漠化山地生态恢复限制因子辨识技术、林分结构优化配置及可持续收获技术、森林植被与生态功能恢复技术等;(2) 生态修复模式(包括防护林和经济林营造、草地畜牧业建设)中,引入石漠化山地生态恢复限制因子辨识技术、适宜造林(种草)植物筛选技术、轻型基质育苗技术、生物材料覆盖技术、生物炭基肥施用技术、林分结构优化配置及可持续收获技术、人工植被群落稳定性和生态效益评价技术等。

在 2 个小流域的一级支流内,选择面积相近的研究区(二级小流域)进行主要模式实施效应及主要生态效益指标动态分析,即普定研究区(108°4′32″—108°6′28″E,26°43′27″—26°45′3″N,面积为 3.48 km²)和凯里研究区(105°43′33″—105°45′34″E,26°19′55″—26°21′13″N,面积为 4.77 km²),2 个研究区涵盖了相应小流域石漠化综合治理的主要治理措施,具有一定代表性及示范效应。

1.3 资料收集

凯里市和普定县所在研究区的 10 000 地形图和当地人民政府评审通过的《岩溶石漠化综合治理实施方案(2015—2017)》由 2 县(市)林业部门提供,2 个研究区 2016 年和 2020 年底 Landsat8_OLI 影像和 Google Earth 影像(Landsat8_OLI 影像从地理空间数据云获取,利用 91 卫图软件下载 Google Earth 影像)。

1.4 研究方法

1.4.1 实地斑块调查 参照《贵州省森林资源规划设计调查工作细则(2014—2016)》,2016 年底利用 1 : 10 000 地形图实地完成 2 个研究区的斑块边界勾

绘及因子调查,斑块因子包括地貌、坡度、成土母岩、岩石裸露率、土壤类型及土层厚度等生境因子,地类、工程类别、林型、林种、起源、龄组、优势树种和植被覆盖度等植被相关指标。

1.4.2 遥感图像分类信息提取 结合 2016 年底实地研究区斑块边界勾绘数据、Google Earth 影像及因子数据,在 ArcGIS 10.5 软件下目视解译,对每个斑块进行判读和边界修改,结合优势树种,获得 2016 年土地利用类型和植被类型数据。根据 2020 年 Google Earth 影像,在 2016 年数据的基础上,进行修边处理,获得 2020 年土地利用类型和植被类型^[21]数据,分类精度大于 90%。以研究区边界,裁剪 Landsat8_OLI 影像,在 Envi5.1 软件下完成植被覆盖度提取,具体操作如下:

(1) 植被指数^[22]。对 Landsat8_OLI 影像进行辐射标定、大气矫正,计算植被指数(NDVI):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中:NIR 为近红外波段(band5);R 为红外波段(band4)。

(2) 植被覆盖度^[23]。采用像元二分模型计算植被覆盖度(VFC):

$$VFC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中:NDVI,NDVI_{soil}和 NDVI_{veg}为任意像元、裸土像元和纯植被像元的 NDVI。公式可变为

$$VFC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (3)$$

式中:NDVI_{max}和 NDVI_{min}为区域内 NDVI 的最大值和最小值。其值参考李苗苗^[22]提出的估算方法,以 NDVI 值的累积概率为 5%和 95%的 NDVI 值作为 NDVI_{min}和 NDVI_{max}。

(3) 植被覆盖度等级。参考相关文献^[11,14],植被覆盖度划分为 6 个等级:Ⅰ级(<10%)、Ⅱ级(10%~20%)、Ⅲ级(20%~35%)、Ⅳ级(35%~50%)、Ⅴ级(50%~70%)和Ⅵ级(≥70%)。

1.4.3 主要生态效益指标选择 参照《石漠化治理监测与评价规范(LY/T2994—2018)》和文献^[12],选取生态系统稳定性指标中植被覆盖率、水土保持效益指标中土壤侵蚀模数和石漠化等级面积降低率作为生态效益评价的指标。

1.5 数据处理

(1) 转移矩阵^[24]。土地利用转移矩阵代表的是土地利用类型变化的方向。当以研究区土地利用类型的面积作为转移矩阵中的元素时,表示式(S_{ij}):

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: S_{ij} 为 t_1 时间 i 类土地利用类型在 t_2 时间转化为 j 类土地利用类型的面积, $i=j$ 时为土地利用类型未变化面积; t_1 和 t_2 为 2016 年底和 2020 年底; i 和 j 为 t_1 和 t_2 时间的土地利用类型($i=1,2,3,\cdots,n$;

$j=1,2,3,\cdots,m$)。

(2) 植被覆盖率。用 Envi 软件处理 2016 年、2020 年底的植被覆盖度数据,统计林草地(包括乔木林、灌木林、草地及变化)植被覆盖率($P, \%$):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \times s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (5)$$

式中: n 为林草地类型斑块数量; p_i 和 s_i 为第 i 斑块的植被覆盖度(%)及面积(hm^2)。

(3) 土壤侵蚀模数。参照文献^[25]计算与统计林草地的土壤侵蚀模数(E):

$$e_i = 66 \times l_i^{1.5} \times (1.01 - p_i) \quad (6)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \times s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (7)$$

式中: e_i 和 l_i 为第 i 斑块的土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 和坡度($^\circ$)。

(4) 石漠化等级。参照文献^[11,14],制定石漠化评价主要因子等级及赋值(表 3),分别计算各研究区内林草地斑块的石漠化等级评价因子值(R)及各地类石漠化等级面积变化率(D_{jk})。

表 3 石漠化程度评定标准

石漠化等级	石漠化等级评价因子及等级					因子赋值
	土壤侵蚀程度	基岩裸露率/%	植被覆盖度/%	坡度/ $^\circ$	土层厚度/cm	
无	不明显	<10	≥70	<5	≥25	6(Ⅵ)
潜在	不太明显	10~29	50~69	5~14	20~24	5(Ⅴ)
轻度	较明显	30~49	35~49	15~24	15~19	4(Ⅳ)
中度	明显	50~69	20~34	25~34	10~14	3(Ⅲ)
强度	强烈	70~89	10~19	35~44	5~9	2(Ⅱ)
极强度	极强烈	≥90	<10	≥45	<5	1(Ⅰ)

注:土壤侵蚀程度参照《土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》计算及分类。

$$R = \sum_{i=1}^n r_i \quad (8)$$

式中: r_i 为第 i 石漠化等级评价因子的赋值, $n=5$ 。

斑块石漠化程度变化(d_{jk}): $R_{2016}=R_{2020}$ 时,石漠化程度无变化; $R_{2016}<R_{2020}$ 时,斑块石漠化程度减轻; $R_{2016}>R_{2020}$ 时,斑块石漠化程度增加。其中, $k=1,2,3$ 。

$$D_{jk} = d_{jk} / \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K d_{jk} \quad (9)$$

式中: j 为斑块序号。

2 结果与分析

2.1 土地利用类型及面积变化

2.1.1 土地利用类型结构变化 2016 年土地利用类型结构中(图 1—2),乔木林地、灌木林地、竹林地、草地、园地、耕地、水体和建设用地面积比例在普定研究区为

27.09%, 29.10%, 0.02%, 0, 9.81%, 26.82%, 0.10%, 7.06%, 凯里研究区为 39.79%, 31.42%, 0, 4.19%, 5.58%, 15.06%, 0.73%, 3.23%, 相应林地(包括乔木林、灌木林和竹林地)面积比例为 56.21%, 71.21%, 农林地(包括林地、园地和耕地)面积比例为 92.84%, 91.85%。适宜于植被恢复为主体的石漠化综合治理效应分析。普定研究区农地和建设用地面积比大、开发程度高,与其邻近县城关镇有关;凯里研究区牧草地面积占相当比例,与其远离中心城市,是苗族聚集区有关。

2016—2020 年 2 个研究区林地面积增加 5.04%, 0.56%, 主要是因观光农业园建设和石漠化综合治理目标导致林地面积增大;园地面积在普定研究区呈增加趋势、凯里研究区呈降低趋势,形成原因为前者是观光农业园中葡萄(*Vitis vinifera*)园建设,后者是观光农业园中路网建设。2 个研究区耕地面积降幅最

大,普定研究区的相应值较高,主要原因是退耕造林以及以葡萄园为主体的观光农业园建设。普定研究区竹林和水面面积没有变化,凯里研究区水面面积略有增加,原因是沿河两岸农家乐中鱼塘数量及面积增加。建设用地面积中,普定研究区呈降低趋势,凯里

研究区呈增加趋势,2 个研究区除因观光农业园建设中的路网调整外,普定研究区还因部分采石厂停产复绿。2 个研究区在观光农业园建设为主要目标的石漠化综合治理中,耕地面积下降、林地面积上升,土地利用类型面积结构趋于优化。

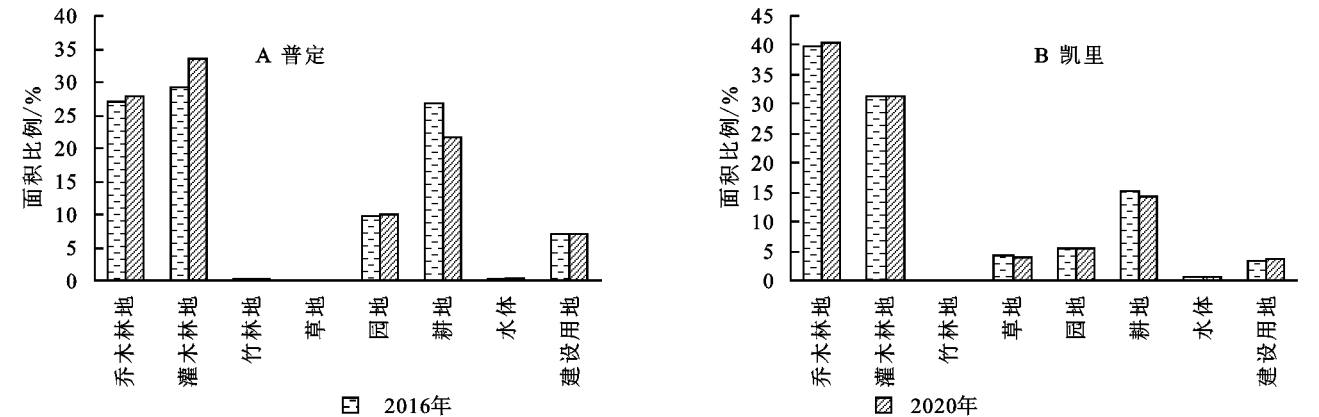


图 1 普定研究区和凯里研究区土地利用类型面积数量变化

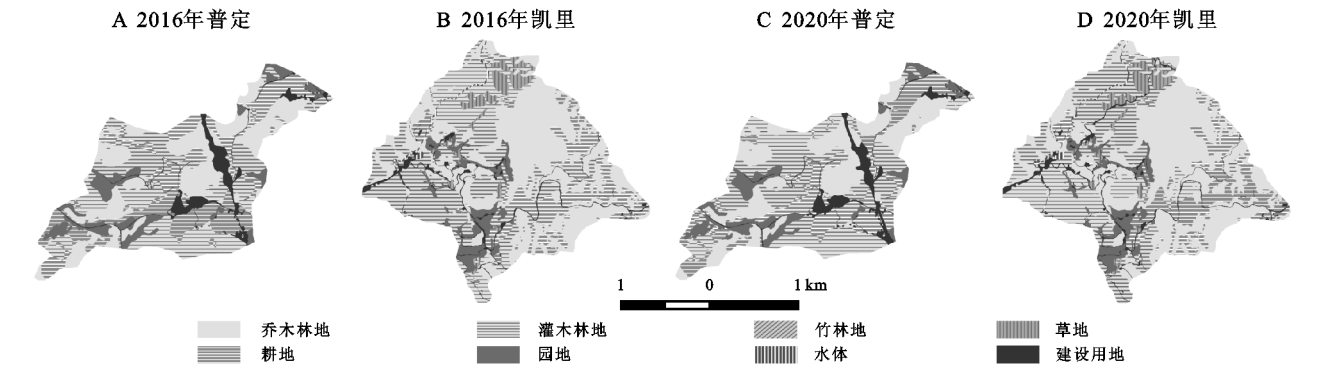


图 2 普定研究区和凯里研究区土地利用类型面积空间变化

2.1.2 土地利用类型转移变化 分析发现(表 4—5), 2016—2020 年,普定研究区转移面积为 22.40 hm²,占研究区总面积的 6.43%,凯里研究区的相应值为 8.66 hm², 1.81%,普定研究区土地利用类型面积调整强度高于凯里研究区。转出面积比例排序中,普定研究区为耕地(85.04%)>建设用地(6.79%)>灌木林地(3.04%)>乔木林地(2.81%)>园地(1.61%),凯里研究区为耕地(42.73%)>灌木林地(38.91%)>草地(14.67%)>乔木林地(3.35%)>园地(0.35%),2 个研究区耕地转出面积

较大,园地转出面积较小;转入面积比例中,普定研究区为灌木林地(70.58%)>乔木林地(13.53%)>建设用地(5.36%)>耕地(5.13%)>园地(4.69%),凯里研究区为乔木林地(40.65%)>灌木林地(32.79%)>建设用地(26.10%)>水体(0.46%),2 个研究区乔木林地和灌木林地转入面积较大,建设用地转入面积占相当比例。2 个研究区地类转移面积中,林地转入量>转出量、耕地转入量<转出量,植被得到进一步恢复,观光农业园要素配置更趋合理。

表 4 普定研究区土地利用类型转移矩阵 hm²

年份	地类	2020 年						
		乔木林地	灌木林地	竹林地	园地	耕地	水体	建设用地
2016 年	乔木林地	93.75	0	0	0	0.54	0	0.09
	灌木林地	0	100.71	0	0	0.61	0	0.07
	竹林地	0	0	0.07	0	0	0	0
	园地	0	0	0	33.81	0	0	0.36
	耕地	1.51	15.81	0	1.05	74.36	0	0.68
	水体	0	0	0	0	0	0.34	0
	建设用地	1.52	0	0	0	0	0	23.07
	转入合计	3.03	15.81	0.00	1.05	1.15	0.00	1.20
	转出合计							22.40

注:下划线数值为未发生转移的面积,下同。

表 5 凯里研究区土地利用类型转移矩阵 hm²

年份	地类	2020 年						
		乔木林地	灌木林地	草地	园地	耕地	水体	建设用地
2016 年	乔木林地	189.57	0	0	0	0	0	0.29
	灌木林地	2.65	146.58	0	0	0	0	0.72
	草地	0	0.19	18.90	0	0	0	1.08
	园地	0	0	0	26.61	0	0	0.03
	耕地	0.87	2.65	0	0	68.18	0.04	0.14
	水体	0	0	0	0	0	3.50	0
	建设用地	0	0	0	0	0	0	15.43
	转入合计	3.52	2.84	0.00	0.00	0.00	0.04	2.26

2.2 植被类型及面积变化

2.2.1 植被类型变化 参照贵州植被分类系统^[21](图 3—4),2016 年普定研究区和凯里研究区(草地归入灌草丛类型)林地面积比例为 56.20%,75.40%,其中在普定研究区阔叶林(包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、山地常绿落叶阔叶混交林和竹林)、针叶林(包括暖性针叶林和石灰岩山地针叶林)和灌丛林(包括石灰岩山地落叶灌丛、石灰岩山地藤刺灌丛和石灰岩山地灌草丛)面积比例为 23.23%,3.87%,29.10%,凯里研究区相应值为 4.95%,34.83%,35.62%,普定研究区林地面积比较低,阔叶林面积比较高,凯里研究区林地面积比较高,针叶林面积比较高。普定研究区当地居民有在房前屋后和村寨周围营建“风水林”的传统习惯,原生性和次生性阔叶林保护较好,人工造林也以经济性和观赏性阔叶树种为主;凯里研究区苗族聚居,习惯性喜爱的柏木(*Cupressus funebris*)等人工针叶用材林和用于畜牧

业发展的灌草丛林地面积较大。

2020 年,普定研究区和凯里研究区林地面积比例为 61.24%,75.69%,林地面积呈增长态势。阔叶林、针叶林和灌丛林面积比例在普定研究区为 23.92%,3.87%,33.45%,凯里研究区为 5.14%,35.32%,35.23%,普定研究区针叶林面积没有变化、阔叶林和灌丛林面积增加,凯里研究区灌丛面积下降、阔叶林和针叶林面积增加,主要受石漠化综合治理目标、人为经营活动方向及先进技术的综合影响。普定研究区在防护林和经济林营造中回避了针叶树种、重点栽种阔叶类树种,坡地灌丛林面积增加;凯里研究区防护林营造中保留了柏木等适生性针叶树种,灌丛草地建设重在提质增效、引进皇竹草(*Pennisetum sinese*)等优良牧草品种集约栽培,灌丛林面积因植被自然恢复提质和防护林营造而有所下降。2 个研究区植被类型面积有由灌丛林向针叶林及阔叶林增加的趋势,林分质量进一步改善。

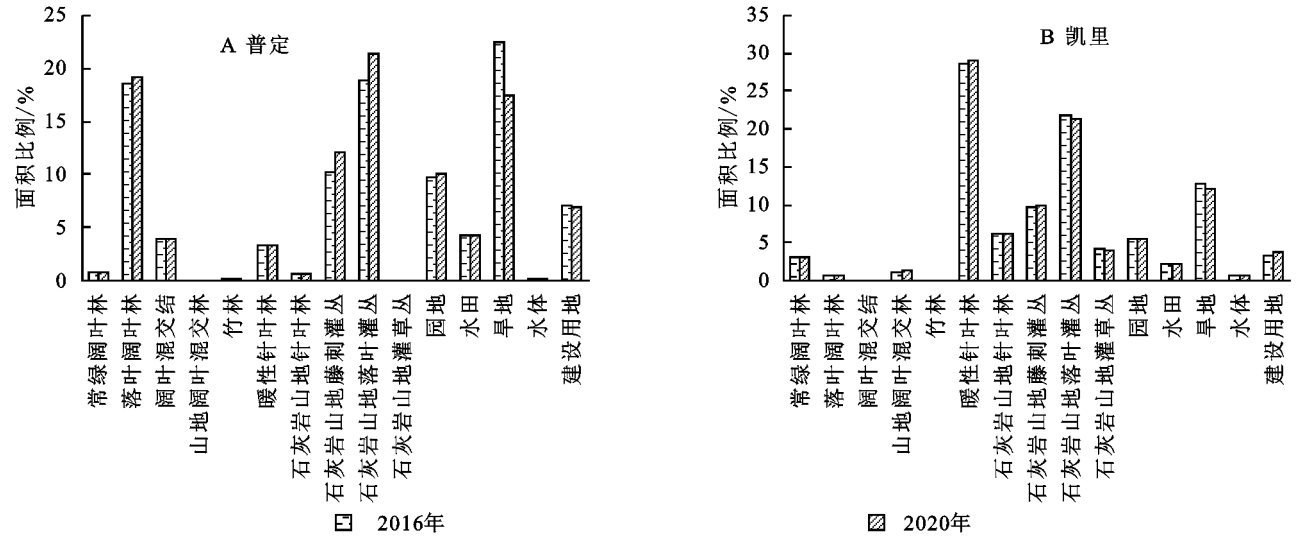


图 3 普定研究区和凯里研究区植被类型面积数量变化

2.2.2 植被覆盖度等级变化 分析发现(图 5),2016 年林草地植被覆盖度Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ等级的面积比

组成中,普定研究区为 0,0.19%,0.10%,7.32%,92.39%,凯里研究区为 0.19%,0.94%,23.05%,25.47%,50.34%;

2020年普定研究区林草地植被覆盖度5个等级的面积比的相应值为0,0,0,4.69%,95.31%,凯里研究区为0,1.86%,23.01%,27.40%,47.73%。2016—2020年2个研究区不同等级面积比随植被覆盖度等级升高呈增加趋势。植被覆盖度 $\geq V$ 等级的面积比例中,普定研究

区由99.71%上升至100.00%,凯里研究区由75.81%下降至75.13%,林草地植被覆盖率在普定研究区持续增长,治理效应显著;凯里研究区有降低趋势,主要因为过度放牧导致的灌丛草地质量下降和部分灌丛草地改种葡萄。

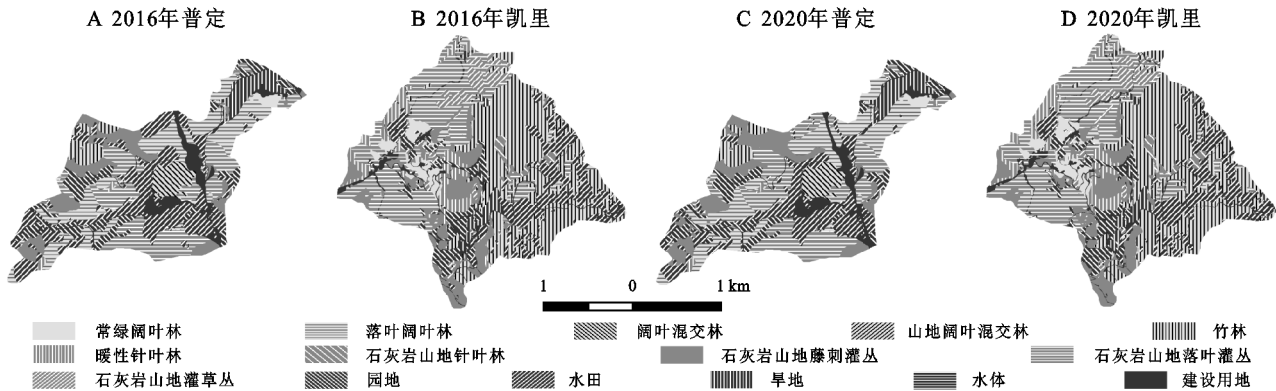


图4 普定研究区和凯里研究区植被类型面积空间变化

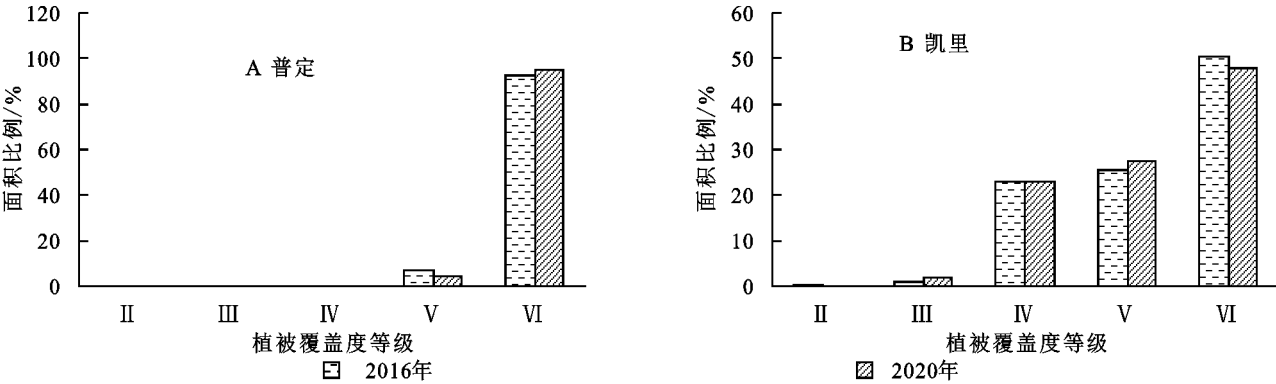


图5 普定研究区和凯里研究区植被覆盖度等级面积变化

进一步分析林草地不同植被类型的覆盖度等级发现(图6),2016年乔木林地覆盖度Ⅲ,Ⅳ,V和Ⅵ等级面积比例在普定研究区为0,0.21%,5.71%,94.08%,凯里研究区为0.48%,8.96%,15.17%,75.39%;2020年相应值在普定研究区为0,0,5.28%,94.72%,凯里研究区为0.35%,8.36%,16.38%,74.90%。2016年灌木林地覆盖度Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,V和Ⅵ等级面积比例在普定研究区为0,0.37%,0,8.75%,90.87%,凯里研究区为0.46%,1.43%,38.15%,34.62%,25.34%;2020年相应值在普定研究区为0,0,0,4.20%,95.80%,凯里研究区为0,0.54%,38.54%,43.40%,17.52%。2016—2020年植被覆盖度 $\geq V$ 等级面积比例中,乔木林地,在普定研究区由91.29%上升至100.00%,凯里研究区由90.56%上升至91.29%;灌木林地相应值在普定研究区由60.92%上升至100.00%,凯里研究区由59.96%上升至60.92%。乔木林和灌木林地面积率在普定研究区较高、增长快,凯里研究区的相应值较低、增长慢。普定研究区竹林地覆盖度整体性增

长1个等级。凯里研究区草地覆盖度Ⅲ,Ⅳ,V和Ⅵ等级面积比例在2016年为1.67%,43.66%,54.66%,0,2020年相应值为27.96%,50.22%,13.24%,8.58%,2016年和2020年草地覆盖度 $\geq V$ 等级面积比例分别为54.66%,21.82%,草地覆盖度值整体性下降,Ⅵ等级草地覆盖度值升高。

2.3 生态效益主要指标变化

2.3.1 植被覆盖率变化 分析发现(表6),2016年和2020年植被覆盖率呈凯里研究区>普定研究区、增加量呈凯里研究区<普定研究区的变化趋势,2个研究区植被覆盖率呈增加态势。封山育林模式中,2016年底普定研究区和凯里研究区植被覆盖率为68.49%,57.07%,2020年的相应值为87.97%,74.51%,植被覆盖率及增长量呈增加趋势,呈普定研究区>凯里研究区的趋势,受2个研究区2016年林分龄级与质量综合影响。生态修复模式中,2020年植被覆盖率较高,达到80%以上,呈普定研究区>凯里研究区的趋势,受2个研究区石漠化基质异质性和先进营造林技

术引进的综合影响。凯里研究区草地植被覆盖率呈增加态势,增长量为 14.69%,受新品种引进和草地集约经

营技术的综合影响。植被覆盖率增加量呈生态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式。

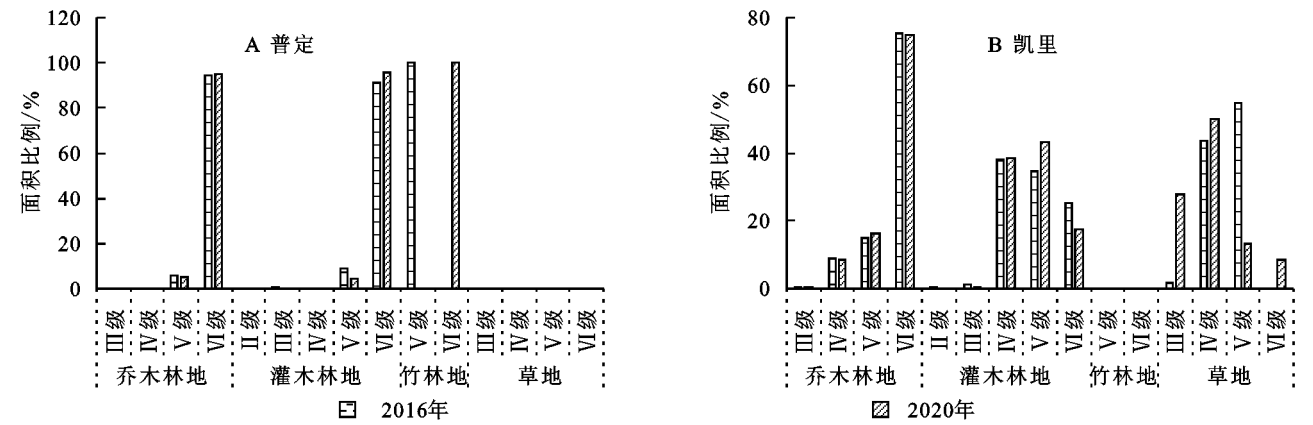


图 6 普定研究区和凯里研究区不同林地类型植被覆盖度等级面积变化

表 6 不同研究区植被覆盖率变化				%
项目	普定研究区		凯里研究区	
	2016 年	2020 年	2016 年	2020 年
封山育林模式	68.49	87.97	57.07	74.51
生态修复模式	0	89.00	0	83.05
草地畜牧业模式			38.77	53.46
研究区	38.46	54.25	42.22	55.60

注:2016—2020 年土地利用类型转移斑块不列入模式计算,列入研究区计算,下同。

2.3.2 土壤侵蚀模数变化 分析发现(表 7),土壤侵蚀模数值在 2016 年呈普定研究区>凯里研究区,2020 年呈普定研究区<凯里研究区,侵蚀模数减少量呈普定研究区>凯里研究区的变化趋势,2 个研究区土壤侵蚀模数值呈减少态势。2016—2020 年 2 个研究区封山育林模式和生态修复模式的土壤侵蚀模数值降低,呈普定研究区>凯里研究区的变化趋势,普定研究区的降幅较大,受石漠化基质和先进营造林技术的综合影响;凯里研究区草地畜牧业模式土壤侵蚀模数值降低,降幅不及封山育林模式和生态修复模式。土壤侵蚀模数降低量呈生态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式。

表 7 不同研究区土壤侵蚀模数变化				
			t/(km ² · a)	
项目	普定研究区		凯里研究区	
	2016 年	2020 年	2016 年	2020 年
封山育林模式	3718.23	1492.26	4239.23	2713.04
生态修复模式	6795.93	807.44	4269.20	970.69
草地畜牧业模式			5027.90	4396.00
研究区	4742.07	3177.64	4380.28	3263.04

2.3.3 石漠化等级面积率变化 分析发现(表 8),2016—2020 年,普定研究区和凯里研究区石漠化等级降低面积率为 57.17%,31.98%,无变化面积率为 5.57%,42.98%,石漠化趋势得到有效遏制。封山育林模式中,普定研究区和凯里研究区石漠化等级降低面积率为 93.36%,43.04%,无变化面积率为 6.07%,44.55%,面积增加率为 0.58%,12.41%,治理效应呈凯里研究区<普定研究区的趋势,这与石漠化基质的差异性和凯里研究区因发展草地畜牧业而高频率用火、时常越界波及林地有关。草地畜牧业模式中,凯里研究区石漠化等级面积降低率、无变化率和增加率为 16.99%,22.82%,60.19%,治理效应不及封山育林模式。生态修复模式是石漠化治理效应较佳模式。

表 8 不同研究区石漠化等级变化的面积组成								hm ²
项目	普定研究区				凯里研究区			
	无变化	降低量	增加量	总面积	无变化	降低量	增加量	总面积
封山育林模式	11.8	181.61	1.12	194.53	150.94	145.82	42.03	338.79
生态修复模式	0	17.33	0	17.33	0	3.53	0	3.53
草地畜牧业模式					4.31	3.21	11.37	18.89
总面积	11.8	198.94	1.12	211.86	155.25	152.56	53.40	361.21

3 讨论

(1) 研究区域代表性及小流域植被恢复模式效应的差异性。普定沙湾小流域和凯里小河小流域同

属亚热带季风气候、岩溶高原石漠区,为潜度—轻度石漠等级^[1,11,14]。农林地面积比例在沙湾小流域和小河小流域为 89.70%,93.17%,景观基质相似度高^[8-9,18-19]。普定研究区和凯里研究区属二级小流域,占相应一级

小流域面积比例为 9.81%, 10.73%, 相应农林地面积比例为 87.22%, 90.46%, 2 个研究区在相应小流域中有较高的代表性。封山育林模式面积比例在沙湾小流域和小河小流域为 28.02%, 20.35%, 在普定研究区和凯里研究区的相应值为 55.90%, 71.02%; 生态修复模式相应值为 11.45% 和 0.34%, 4.98% 和 0.74%; 草地畜牧业模式在凯里研究区的相应值为 10.34%, 3.96%, 受石漠区基质差异^[10]和工程治理目标的综合影响^[1-3]。2 个研究区林草恢复措施类型相对齐备, 与小流域相应措施的面积比存在一定差异。研究区和小流域间综合治理效应有尺度性转换差异^[11-12, 14], 随研究区和小流域间面积比例增大、综合治理效应尺度性差异变小。这种面积比例的差异不会改变单项措施效应评价的趋势性。

(2) 石漠化基质变化导致土地利用-植被类型-生态效益的差异性。普定研究区属灰质白云岩石漠区、凯里研究区属砾质白云岩石漠区^[1, 10], 土层平均厚度和岩石裸露率在普定研究区为 81.84 cm, 20.61%, 凯里研究区的相应值为 48.98 cm, 7.99%, 2 个研究区土层平均厚度和岩石裸露率值差异性明显。2016 年石漠化综合治理工程实施初期, 普定研究区植被覆盖率值小于凯里研究区、土壤侵蚀模数值呈相反趋势, 是由土地利用结构、植被类型以及面积结构性差异引起的^[1, 14]。这种变化的本质因素是石漠化基质的差异性, 也不可否认生物气候^[2-4]、植被类型^[5-6, 12, 25]和人为活动^[9, 14, 18-19]的影响。

(3) 石漠化综合治理土地利用结构变化及效应的差异性。2016—2020 年 2 个研究区耕地面积转出部分主要为乔木林地和灌木林地等、林地面积转入部分主要为耕地和建设用地等, 林地转入面积大于转出面积、耕地转入面积小于转出面积, 符合石漠化综合治理的一般规律^[1-3, 7-8, 11], 其中农地是最活跃的变化地类^[9, 18-19]。受 2 个研究区属不同级别观光农业园及过境公路建设的影响, 建设用地由林地和农地等转入, 成为石漠化综合治理中特有影响因素。植被覆盖率增加量、土壤侵蚀模数降低率和石漠化等级降低面积率呈普定研究区>凯里研究区, 普定研究区石漠化综合治理效应较好^[5-6, 12], 受石漠化基质类型^[10]及水分等^[4, 13]立地要素、治理模式类型^[7, 20]和引进先进技术^[15-17]的综合影响。

(4) 不同林草植被恢复模式效应及在 2 个研究区间的差异性。植被覆盖率增加量、土壤侵蚀模数降低率和石漠化等级降低面积率在 2 个研究区呈生

态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式, 生态修复模式引进了系列先进技术促进植被生长^[15-17], 生态效益增加量较大; 草地畜牧业模式在植被层结构及生物量积累^[5-6]上不及生态修复模式和封山育林模式, 生态效益增加量较小。生态修复模式和封山育林模式生态效益呈普定研究区>凯里研究区的变化趋势, 主要受石漠化基质类型^[10]及水分等^[4, 13]立地要素的影响。

(5) 研究方法对石漠化综合治理工程效应评价的影响。有别于其他单项方法对小流域土地利用^[11]、植被覆盖度^[8-9, 22-23]和石漠化综合治理效应^[11-12]的评估, 本研究采用相同时间断面遥感影像和现地地形图斑块勾绘及斑块主要因子调查相结合的方法, 弥补了遥感卫星影像在斑块主要因子量获取上的不足^[8-9, 18-19, 22-23], 丰富了生态效益分析内容。遥感卫星影像和现地调查相结合方法比单一的遥感卫星影像法的评价效果好, 值得推介。

4 结论

(1) 普定研究区和凯里研究区同属亚热带季风气候、岩溶高原石漠区, 为潜度—轻度石漠化等级, 前者属灰质白云岩石漠区, 后者属砾质白云岩石漠区, 基质类型是影响石漠化综合治理工程目标及林草恢复模式效应的本质因素。2016 年, 普定研究区农地及林地面积比例为 36.63%, 20.64%, 凯里研究区的相应值为 56.21%, 71.21%, 农林地景观基质相似度高; 普定研究区和凯里研究区植被覆盖率为 38.46%, 42.22%, 土壤侵蚀模数为 4 742.07, 4 380.28 t/(km²·a), 普定研究区石漠化趋势较强。

(2) 2016—2020 年 2 个研究区林地面积转入量>转出量、耕地面积转入量<转出量, 石漠化综合治理主要影响因素为耕地、林地和建设用地。普定研究区和凯里研究区植被覆盖率增加量为 15.79%, 13.38%, 土壤侵蚀模数降低率为 32.98%, 25.51%, 石漠化等级降低面积率为 57.17%, 31.98%, 普定研究区综合治理效应显著。

(3) 植被覆盖率增加量、土壤侵蚀模数降低率和石漠化等级降低面积率中, 生态修复模式相应值在普定研究区为 89.00%, 88.12%, 100.00%, 凯里研究区为 83.05%, 77.26%, 100.00%; 封山育林模式相应值在普定研究区为 19.48%, 59.87%, 93.36%, 凯里研究区为 17.44%, 36.00%, 43.04%; 凯里研究区草地畜牧业模式相应值为 14.69%, 12.57%, 16.99%。生

态效益呈生态修复模式>封山育林模式>草地畜牧业模式的变化趋势,生态修复模式和封山育林模式生态效益呈普定研究区>凯里研究区的变化趋势。

参考文献:

[1] 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.

[2] 中华人民共和国中央人民政府.岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)[EB/OL]. 2008-04-17[2021-12-28].http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content_946918.htm.

[3] 中华人民共和国中央人民政府.发展改革委同有关部门联合印发《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》[EB/OL]. 2016-04-20[2021-12-28].http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/20/content_5066197.htm.

[4] LeGrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions: hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems[J].Science, 1973, 179(4076):859-864.

[5] 张喜,薛建辉,生原喜久雄,等.黔中山地喀斯特森林的水文学过程和养分动态[J].植物生态学报,2007,31(5):757-768.

[6] 张喜,薛建辉,许效天,等.黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J].热带亚热带植物学报,2007,15(6):527-537.

[7] 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.

[8] Zhang M, Zhang L, Ren X, et al. Effect of land use and land cover change on the changes in net primary productivity in karst areas of southwest China: a case study of Huanjiang maonan autonomous county[J]. Journal of Resources and Ecology, 2020,11(6):606-616.

[9] Li W, Wang W, Chen J, Zhang Z. Assessing effects of the Returning Farmland to Forest Program on vegetation cover changes at multiple spatial scales: The case of northwest Yunnan, China[J]. Journal of Environmental Management,2022,304:114303.

[10] 王德炉,朱守谦,黄宝龙.贵州喀斯特石漠化类型及程度评价[J].生态学报,2005,25(5):1057-1063.

[11] 周忠发.基于 GIS 的喀斯特流域石漠化综合防治探讨:以贵州织金县洗马河流域为例[J].水土保持研究,

2007,14(5):264-266.

[12] 吴鹏,朱军,崔迎春,等.喀斯特地区石漠化综合治理生态效益指标体系构建及评价:以杠寨小流域为例[J].中南林业科技大学学报,2014,34(10):95-101,106.

[13] 杨铭珂,贺中华,任荣仪.黔中地区气象水文干旱演变特征及其响应关系[J].水土保持研究,2022,29(1):264-280.

[14] 熊康宁,黎平,周忠发.喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究[M].北京:地质出版社,2002.

[15] 向凯旋,张喜,刘济明,等.基于幼林生长表现的白云岩石漠区造林树种筛选研究[J].西部林业科学,2017,46(6):61-66.

[16] Zhou Z, Yan T, Zhu Q, et al. Bacterial community structure shifts induced by biochar amendment to karst calcareous soil in southwestern areas of China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(1):356-365.

[17] Bu X, Xue J, Wu Y, et al. Effect of biochar on seed germination and seedling growth of *Robinia pseud-acacia* L. in karst calcareous soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020,51(1):1-12.

[18] Mc A, Meh B, Aam A. Land use/land cover change assessment of Halda watershed using remote sensing and GIS[J]. the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020,23(1):63-75.

[19] 金贵,邓祥征,陈冬冬,等.黄淮海平原农地流转空间分布与格局特征[J].资源科学,2016,38(8):1515-1524.

[20] 熊康宁,朱大运,彭韬,等.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.

[21] 黄威廉,龙屠玉,杨龙.贵州植被[M].贵阳:贵州人民出版社,1988.

[22] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.

[23] 佟斯琴,包玉海,张巧凤,等.基于像元二分法和强度分析方法的内蒙古植被覆盖度时空变化规律分析[J].生态环境学报,2016,25(5):737-743.

[24] 徐嘉兴.典型平原矿区土地生态演变及评价研究[D].北京:中国矿业大学,2013.

[25] 张晓珊,巫启新.板桥河小流域水源林、水保林综合治理试验示范区立地分类的研究[J].贵州林业科技,1991,19(2):10-16.