

# 岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价

伏文兵<sup>1,2</sup>, 严友进<sup>2</sup>, 李华林<sup>3</sup>,  
林棧桓<sup>1,2</sup>, 胡刚<sup>1,2</sup>, 黄朝海<sup>1,2</sup>

1. 贵州华力创通工程咨询有限公司, 贵阳 550000;
2. 贵州省森林资源与环境研究中心/贵州大学 林学院/贵州大学 土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025;
3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083

**摘要:** 为了定量揭示西南喀斯特地区石漠化综合治理后的生态效益, 以绥阳县典型喀斯特石漠化地区两条小流域(太白河和洪光坝小流域)为研究对象, 基于野外试验、调查收集、实地验证、定点监测等手段获取数据, 通过植物多样指数、国家林业行业标准(LY/T 1721-2008)、土壤流失方程(RUSLE)和社会经济评价指标体系对喀斯特地区石漠化综合治理效益进行评价。结果表明: ① 喀斯特石漠化小流域植物多样性指数、均匀度指数、物种丰富度指数增加, 优势度降低; 植被盖度增加, 土层厚度不变, 封育林枯枝落叶层增加, 林地面积增加 2 910.87 hm<sup>2</sup>。石漠化综合治理小流域植物群落逐渐复杂化。② 小流域生物量和固碳量分别为 19 550.52 t 和 20 548.96 t, 以封育林的生物量和固碳量为主, 固碳效益明显。③ 石漠化综合治理后小流域水土流失量减少 611.25 t, 并且随着时间的推移, 水土保持效益日益显著。④ 小流域农地生产力、农业产值、林业产值提高, 人均纯收入增加, 人民生活水平向小康发展。喀斯特地区石漠化综合治理后, 其生态环境逐渐改善, 固碳减沙效果明显, 农民生活水平提高, 对该区生态环境、区域经济、社会持续性发展具有极为积极的作用。

**关键词:** 喀斯特; 石漠化治理; 效益评价; 固碳效益; 土壤侵蚀

**中图分类号:** F327; X171.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2021)07-0146-11

喀斯特地貌是具有特殊能量、物质、功能和结构的生态系统, 其生态敏感度高, 稳定性差, 基岩裸露, 干旱频繁发生<sup>[1]</sup>。喀斯特地区岩溶发育强烈, 人地矛盾尖锐, 地表破碎, 山势陡峭, 土壤贫瘠, 耕地少, 人类活动强烈干扰生态环境, 使石漠化区与贫困区高度重叠, 是典型的生态脆弱区<sup>[2-4]</sup>。贵州省是我国水土流失严重的省份之一, 坡耕地面积大、石漠化严重<sup>[5]</sup>, 制约了贵州石漠化地区农业经济的发展和农民生活水平的提高。我国高度重视喀斯特地区石漠化和生态退化的治理, 国家“十一五”规划纲要中将贵州石漠化地区综合治理作为生态保护重点工程。2016 年《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》进一步推进贵州喀斯特地区石漠化综合治理<sup>[6]</sup>。在国家政策的支持下, 贵州省多县开展了喀斯特地区石漠化综合治理, 因此, 对石漠化综合治理后的效益进行评价显得十分必要。

对石漠化治理效益的评价一般从社会效益、经济效益和生态效益 3 个方面进行<sup>[4]</sup>。以往对喀斯特地区石漠化效益评价主要集中在两个方面: 一是微观或单因素探究植物群落与生境的关系<sup>[7-9]</sup>, 例如: 唐政

等<sup>[10]</sup>通过土壤原生动物群落大小和多样性来表征喀斯特地区生态恢复与土壤肥力的协调演变规律;文丽等<sup>[11]</sup>研究西南喀斯特植被演替过程中群落的特征表明:西南喀斯特植被演替是生物驱动与环境因素相互作用的结果,不同区域植被演替和植物群落不同;杜虎等<sup>[12]</sup>对喀斯特地区不同植物群落与土壤的耦合关系研究表明:不同植物群落与土壤耦合关系不同,不同生态系统应该制定相应合适的培育管理措施等.二是宏观地评价石漠化综合治理的模式与方法.例如:陈洪松等<sup>[6]</sup>宏观描述西南喀斯特地区石漠化综合治理成效、问题与对策表明:西南喀斯特地区石漠化与贫穷问题相互交织,通过石漠化综合治理能够初步遏制石漠化进一步扩展;陆原<sup>[13]</sup>借助系统论观点对喀斯特地区石漠化的内涵分析表明:应把人地关系之间的协调作为石漠化治理的宗旨;王克林等<sup>[2]</sup>研究喀斯特地区石漠化综合治理及其区域恢复效应表明:目前石漠化治理存在成效巩固困难、治理技术缺乏区域针对性、社会人文驱动机制不清等问题.综上所述:目前对喀斯特地区石漠化综合治理效益评价主要集中于单方面的生态效益评价和宏观的定性描述,对综合评价石漠化治理效益具有一定的局限性.本研究选择贵州省绥阳县岩溶地区典型岩溶槽谷石漠化小流域(太白河小流域和洪光坝小流域)为单元,基于野外试验、调查收集、实地验证、定点监测等手段获取数据,通过植被多样指数、国家林业行业标准(LY/T 1721-2008)、土壤流失方程(RUSLE)和社会经济评价指标,构建生态—社会—经济三位一体的植被评价体系,对喀斯特地区石漠化综合治理效益进行定量分析与评价,为喀斯特地区石漠化综合治理提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵州省绥阳县位于贵州省北部,大娄山脉中段,总面积 2 566 km<sup>2</sup>,地理坐标为 106°57'22"—107°31'11"E, 27°49'22"—28°29'34"N. 该区域属于中亚热带湿润季风性气候,冬无严寒,夏无酷暑,四季分明,降水较丰沛<sup>[14]</sup>,多年平均降水量 1 160 mm,多年平均气温 15.2 °C,极端最高气温 38.8 °C,极端最低气温 -6.2 °C,多年平均无霜期 283 d;年平均日照 1 114.2 h. 该区域地形起伏较大,地貌类型复杂,土壤主要以水稻土和黄壤为主,pH 值为 6.2~7.5,森林覆盖率达 47%. 喀斯特面积达 2 431.80 km<sup>2</sup>,占全县总面积的 94.77%,其中:潜在石漠化面积 790.84 km<sup>2</sup>,轻度石漠化面积 358.98 km<sup>2</sup>,中度石漠化面积 44.14 km<sup>2</sup>,强度石漠化面积 1.80 km<sup>2</sup>,无石漠化面积 1 236.04 km<sup>2</sup>(数据来源:《贵州省绥阳县喀斯特石漠化综合防治规划(2005—2050年)》). 2019年,绥阳县生产总值 137.8 亿元,增长 10.2%;城镇、农村居民人均可支配收入分别达 32 827 元、13 922 元,分别增长 8.8%,9.6%(数据来源:《绥阳县 2020 年政府工作报告》). 本次研究以绥阳县石漠化综合治理成果显著,且具有代表性的太白河和洪光坝两条小流域为研究对象(图 1),评价其石漠化综合治理效益. 太白河小流域位于绥阳县北部太白镇境内,距县城 82 km,包括凤凰村、富裕村、石轮村、水坝村、太平村 5 个村. 总人口 1.28 万人,农业人口 1.19 万人. 洪光坝小流域位于绥阳县东北部温泉镇境内,距县城 50 km,包括洪骆村、旺草镇角口村、广怀村、石羊村 4 个村. 总人口 0.89 万人,其中农业人口 0.86 万人.

### 1.2 数据来源

根据《贵州省绥阳县喀斯特石漠化综合防治规划(2005—2050年)》,以小流域为单元,按照“因地制宜、突出重点、统筹规划、合理布局、相对集中、示范带动、以轻度和中度石漠化治理为突破口”的原则,开展绥阳县石漠化综合治理工程示范、监测等一系列工作. 为了监测和评估石漠化综合治理与效益,我们分别于 2014 年和 2016 年,组队到绥阳县进行了石漠化综合治理工作调研. 通过统计上报、现场验证、走访座谈的形式,对太白河流域和洪光坝流域石漠化治理工程试点区开展了石漠化综合治理成效调查,获取 2015 年两个流域土地利用以及石漠化现状分布面积数据. 并于 2014 年设置野外试验样区,对石漠化综合治理前后进行综合评估,通过现场实地调查了解石漠化综合治理措施、模式、技术、方法等情况,为本研究提供了数据来源.

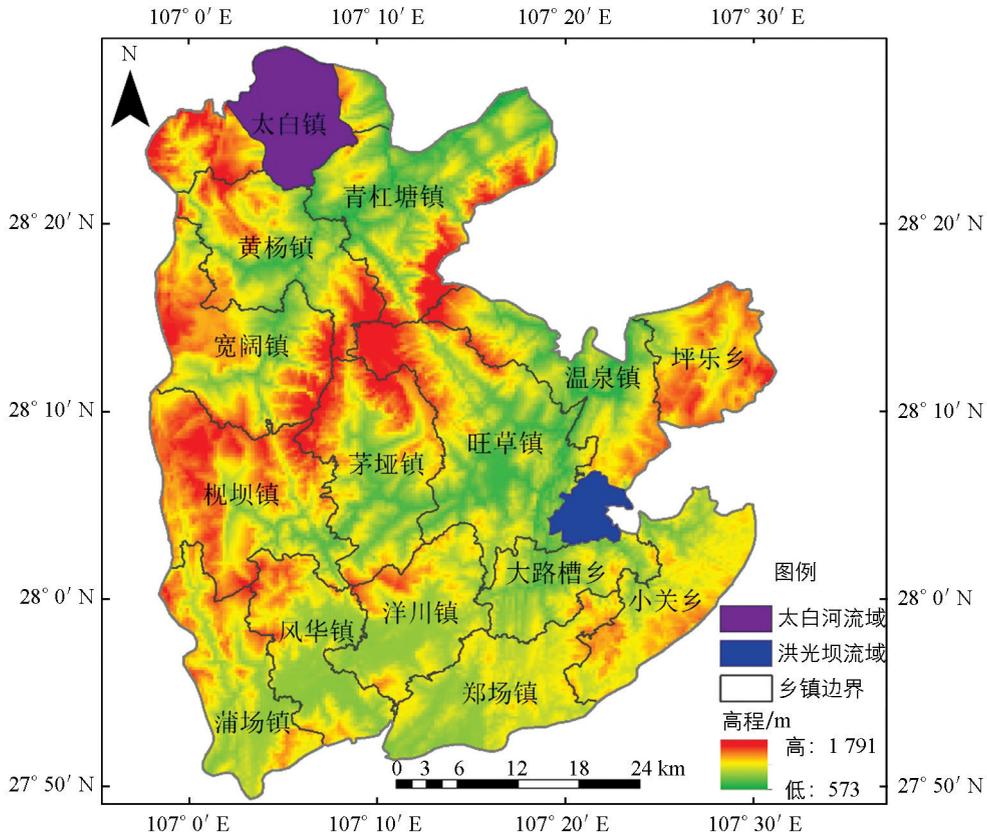


图 1 研究区地理位置示意图

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 试验设计及样地设置

在绥阳县太白河流域和洪光坝流域典型石漠化治理区选择不同植被类型的样地开展试验。太白河流域选择封山育林(封育林)样地 6 个,人工造林(人工林)样地 9 个;洪光坝流域选择封育林样地 5 个,人工林样地 6 个。其中,植被调查内容主要包括物种名、株数、频度、胸(地)径、高度、枝下高、冠幅以及人工造林与植草的保存率、生长发育状况、林木与草被盖度、生长量等。各样地基本信息如表 1 所示。

表 1 绥阳县典型喀斯特小流域样地信息

流域	植被类型	样地编号	坡位	坡度	坡向	海拔/m	植 被
太白河小流域	人工林	T1	中	16°	WS	877	金银花( <i>Lonicera japonica</i> Thunb.)
	人工林	T2	中	23°	WS	1 163	金银花( <i>Lonicera japonica</i> Thunb.)
	人工林	T3	中	19°	WS	992	李子( <i>Prunus salicina</i> Lindl.)
	人工林	T4	中	15°	WS	891	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	人工林	T5	中	19°	EN	846	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	人工林	T6	中	24°	EN	874	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	人工林	T7	中	24°	EN	1 138	油茶( <i>Camellia oleifera</i> Abel.)
	人工林	T8	中	24°	EN	1 200	油茶( <i>Camellia oleifera</i> Abel.)
	人工林	T9	中	24°	EN	1 261	油茶( <i>Camellia oleifera</i> Abel.)
	封育林	T10	中	35°	EN	981	物种丰富(火棘、蕨、柃子等)
	封育林	T11	中	17°	EN	981	物种丰富(火棘、蕨、茛苳等)
	封育林	T12	中	35°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)
	封育林	T13	中	18°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)
	封育林	T14	中	20°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)
	封育林	T15	中	22°	EN	976	物种丰富(火棘、麻栎、茛苳等)

续表 1

流域	植被类型	样地编号	坡位	坡度	坡向	海拔/m	植 被
洪光坝小流域	人工林	H1	中	16°	WS	877	金银花( <i>Lonicera japonica</i> Thunb.)
	人工林	H2	中	23°	WS	1 163	金银花( <i>Lonicera japonica</i> Thunb.)
	人工林	H3	中	19°	WS	992	李子( <i>Prunus salicina</i> Lindl.)
	人工林	H4	中	15°	WS	892	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	人工林	H5	中	19°	EN	846	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	人工林	H6	中	24°	EN	874	桃子( <i>Amygdalus persica</i> L.)
	封育林	H7	中	35°	EN	981	物种丰富(火棘、蕨、栲子等)
	封育林	H8	中	17°	EN	981	物种丰富(火棘、蕨、茛苳等)
	封育林	H9	中	35°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)
	封育林	H10	中	18°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)
	封育林	H11	中	20°	EN	981	物种丰富(火棘、柏树、茛苳等)

### 1.3.2 植被多样性计算方法

研究区植物群落物种组成、结构变化代表了该区域内植被恢复演替发展的方向。通过对治理工程实施封育措施和人工造林措施前后的植物物种多样性变化的研究, 分析植被变化趋势, 评价治理效果。本研究选择物种丰富度指数、生物多样性指数、均匀度指数、生态优势度指数对项目治理区植物多样性进行评价。具体计算公式和生态含义如表 2 所示。

表 2 植物多样性分析指标及公式<sup>[15-16]</sup>

指 数	计算公式	物理意义	生态学含义
Patrick 丰富度指数( $R$ )	$R = S'$	$S'$ 为物种数。	表征物种的丰富程度和种类。
Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )	$H' = -\sum_{i=1}^{S'} P_i \log_2 P_i$	$P_i = n_i / N_i$ , 代表第 $i$ 个物种的个体数 $n_i$ 占有所有个体总数 $N_i$ 的比例; $S$ 为物种数。	表征群落结构复杂多样的程度。
Simpson 优势度指数( $D$ )	$D = 1 - \sum_{i=1}^{S'} P_i^2$	$S'$ 为物种数; $P_i$ 为物种 $i$ 的个体总数占样方群落中总个体数的比例。	优势度指数越大, 表明不同种类植物数量分布越不均匀, 优势植被的生态功能越突出。
Pielou 均匀度指数( $J$ )	$J = H' / \log_2 S'$	$J$ 为均匀度指数; $H'$ 为多样性指数; $S'$ 为物种数。	表征各物种个体数分配的均匀程度。

### 1.3.3 植被固碳量估算方法

森林生态系统是陆地生态系统最重要和面积最大的子系统<sup>[17]</sup>, 是地球陆地生态系统的主体, 是陆地碳的主要储存库<sup>[18]</sup>。森林植被通过光合作用, 可吸收和存储大气中的  $\text{CO}_2$ , 从而维持大气中的  $\text{CO}_2$  平衡<sup>[19]</sup>。因此要评价喀斯特地区石漠化综合治理的效益, 评估植被固碳量的变化必不可少。本研究植被固碳量依据国家林业行业标准《森林生态服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)<sup>[20]</sup>进行计算。计算公式如下:

$$G_{\text{固碳}} = 1.63R_{\text{碳}} AB_{\text{年}} \quad (1)$$

式中:  $G_{\text{固碳}}$  为植被年固碳量, 单位:  $\text{t/a}$ ;  $R_{\text{碳}}$  为  $\text{CO}_2$  中 C 的比例, 为 27.27%;  $A$  为林分面积, 单位:  $\text{hm}^2$ ;  $B_{\text{年}}$  为林分净生产力, 单位:  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 1.3.4 土壤侵蚀估算方法

本研究选用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)开展太白河和洪光坝小流域土壤流失研究<sup>[21]</sup>,其计算公式为:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中:  $A$  为单位面积上时间和空间平均的土壤流失量(土壤侵蚀模数),单位:  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子,单位:  $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子,单位:  $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ;  $LS$  为坡长与坡度因子;  $C$  为植被覆盖因子;  $P$  为水土保持措施因子。

#### 1) 降雨侵蚀力因子

在 RUSLE 中,将一次降雨总动能与该次降雨最大 30 min 雨强的乘积称为降雨侵蚀力。本研究采用卜兆宏等<sup>[22-23]</sup>和黄炎和等<sup>[24]</sup>根据南方亚热带实测数据提出的  $R$  值计算式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792H_i) = 0.1792 \sum_{i=1}^{12} H_i - 18.6324 \approx 0.1792\bar{H} - 18.6324 \quad (3)$$

式中:  $R$  为降雨侵蚀力因子;  $H_i$  为月降雨量(mm);  $\bar{H}$  为年均降雨量(mm)。根据项目试点工程区各区年均降雨计算各区降雨侵蚀力,为 112.64。

#### 2) 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性反映土壤在雨滴击溅、径流冲刷或者两者共同作用下,被分散、搬运的难易程度。确定土壤可蚀性的最好办法是在天然小区上直接测定,但必须有足够数量而且观测历时较长的数据库资料。土壤可蚀性因子  $K$  反映了不同土壤的侵蚀率,渗入率,总持水能,磨蚀、搬运及可蚀性。本研究根据项目工程区主要土壤类型、有机质含量,结合杨广斌等<sup>[25]</sup>和高华端等<sup>[26]</sup>计算的不同土壤类型  $K$  值的研究结果,最终确定绥阳县为 0.28。

#### 3) 坡长与坡度因子

在通用土壤流失方程中,地形对土壤侵蚀的影响用坡长和坡度因子来计算。坡度因子( $S$ )反映坡度对侵蚀的影响,土壤侵蚀程度随坡度的增加而增加,且增加速度加快。坡长( $L$ )定义为从地表径流源点到坡度减少直至有沉积出现地方之间的距离,或到一个明显的渠道之间的水平距离。本研究采用黄炎和等<sup>[27]</sup>建立的亚热带地形因子方程计算:

$$LS = 0.08L^{0.35}S^{0.6} \quad (4)$$

式中:  $L$  为侵蚀坡面的坡长(m);  $S$  为侵蚀坡面的坡度( $^\circ$ )。根据绥阳县典型区域坡长、坡度调查结果,本研究  $LS$  值为 3.62。

#### 4) 植被覆盖因子

该因子是在相同土壤、坡度和相同的降雨条件下,某一特定作物或植被情况时的土壤流失量与耕种过后连续休闲的土地土壤流失量的比值,一般为 0~1。该因子包括植被、作物种植顺序、生产力水平、生产季长短、栽培措施、作物残余物管理、降雨分布等相互作用,主要体现在植被盖度的变化上。样地治理前后植被盖度计算植被覆盖因子  $C$ 。本研究  $C$  值估算采用如下公式(蔡崇法等<sup>[28]</sup>):

$$C = \begin{cases} 1 & f_c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c & 0 < f_c < 78.3\% \\ 0 & f_c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f_c$  为植被盖度。

#### 5) 水土保持措施因子

水土保持措施因子( $P$ )是指特定水土保持措施下土壤流失量与相应未实施水土保持措施的顺坡耕作地块的土壤流失量之比。包含于这一因子中的侵蚀控制措施有:等高耕作、等高带状种植、修梯田、土壤保持耕作、轮作等。本研究主要的工程措施是修建梯田和梯田整修,根据游松财等<sup>[29]</sup>估算江西省泰和县土壤侵

蚀量的方法和流域的野外调查,对治理前后的  $P$  进行赋值.

## 2 结果与分析

### 2.1 石漠化现状

从图2可知:太白河流域土地总面积 3 010  $\text{hm}^2$ ,其中水田 40.46  $\text{hm}^2$ ,梯坪地 6.51  $\text{hm}^2$ ,坡耕地 1 242.94  $\text{hm}^2$ ,灌木林地 936.49  $\text{hm}^2$ ,乔木林地 125.91  $\text{hm}^2$ ,其他林地 563.51  $\text{hm}^2$ ,经济林 1.96  $\text{hm}^2$ ,建设用地 43.69  $\text{hm}^2$ ,水域 11.67  $\text{hm}^2$ ,其他土地 36.86  $\text{hm}^2$ .洪光坝小流域土地总面积 3 500.93  $\text{hm}^2$ ,其中水田 615.36  $\text{hm}^2$ ,梯坪地 157.06  $\text{hm}^2$ ,坡耕地 651.68  $\text{hm}^2$ ,灌木林地 975.30  $\text{hm}^2$ ,乔木林地 439.69  $\text{hm}^2$ ,其他林地 577.12  $\text{hm}^2$ ,建设用地 75.75  $\text{hm}^2$ ,水域面积 8.97  $\text{hm}^2$ .坡耕地和灌木林地均为两个小流域的主要土地利用类型.

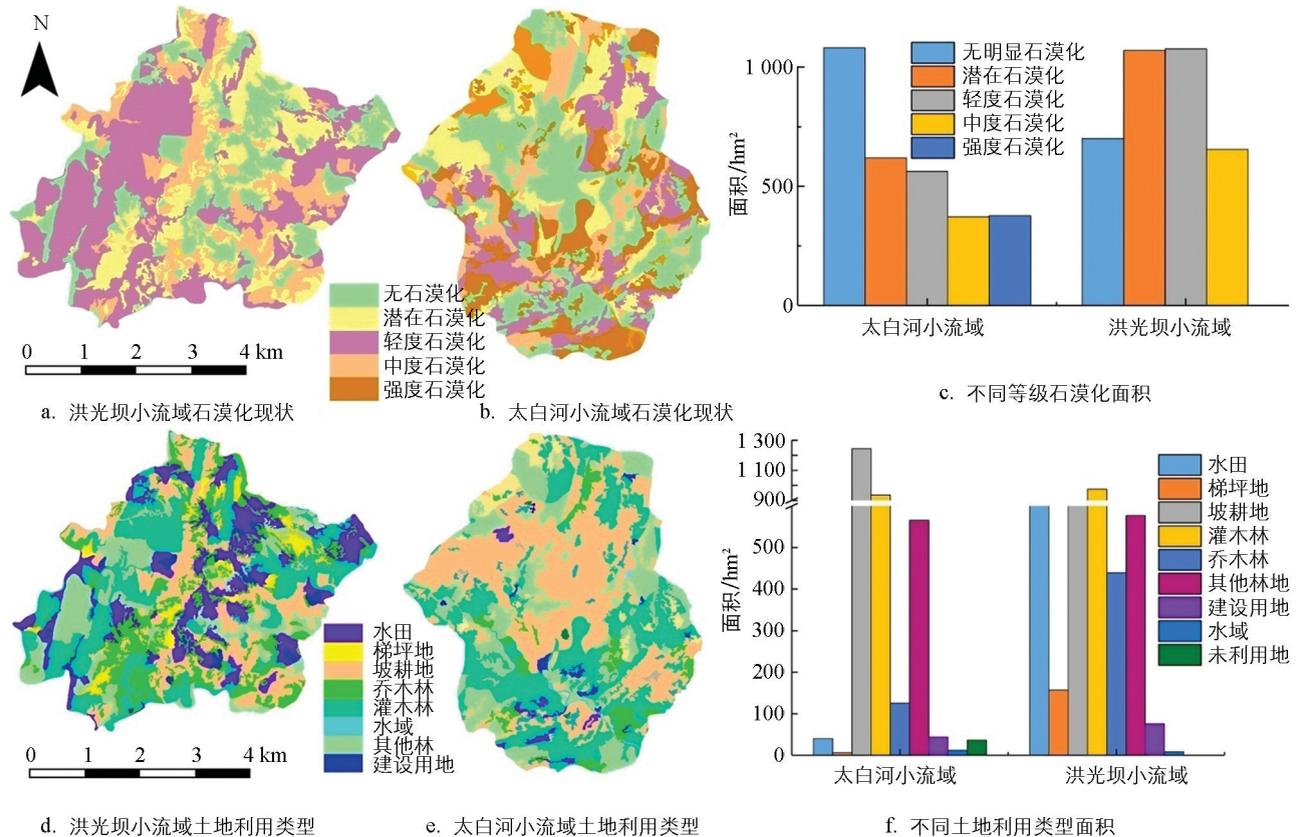


图2 2015年绥阳县喀斯特典型小流域土地利用类型和石漠化现状

太白河小流域无明显石漠化面积 1 080.92  $\text{hm}^2$ ,潜在石漠化面积 619.08  $\text{hm}^2$ ,轻度石漠化面积 561.69  $\text{hm}^2$ ,中度石漠化面积 371.68  $\text{hm}^2$ ,强度石漠化面积 376.63  $\text{hm}^2$ ,无明显石漠化面积占总面积的 36%.洪光坝小流域无明显石漠化面积 700.11  $\text{hm}^2$ ,潜在石漠化面积 1 069.63  $\text{hm}^2$ ,轻度石漠化面积 1 077.14  $\text{hm}^2$ ,中度石漠化面积 654.05  $\text{m}^2$ ,无强度石漠化,无明显石漠化面积占总面积的 20%.石漠化类型中两个小流域均有不同等级的石漠化发生,应该采取合适的植物措施、工程措施和耕种措施防止石漠化情况持续加重.

### 2.2 植被恢复效益评价

#### 2.2.1 植被多样性变化

太白河小流域和洪光坝小流域 Shannon-Wiener 多样性指数分别从治理前的 0.747 和 0.732 提高到治理后的 0.751 和 0.744(图3);优势度分别从治理前的 0.553 和 0.563 降低到治理后的 0.546 和 0.544;均匀度分别从治理前的 0.412 和 0.405 提高到治理后的 0.419 和 0.421;物种丰富度也逐渐增加(图3).结果

表明,通过封育管理和人工造林等石漠化治理措施,物种组成和群落结构发生改变,物种丰富度提高,群落复杂性增加,结构和层次更加多样化.在人工造林和封育管理措施下,研究区物种数、多样性指数均增加,均匀度指数、优势度指数按照群落正向演替发展规律进行.植物多样性有利于发挥石漠化生态系统的功能,使生态系统更加完善稳定.主要表现在物种多样化使石漠化系统内物种间竞争加强,有利于植物适应更加恶劣的环境而繁衍生存;物种间营养的相互关系更加多样化,使各营养水平间的能量流动趋于稳定;多样性的提高,使系统抵抗外界干扰的能力增强.

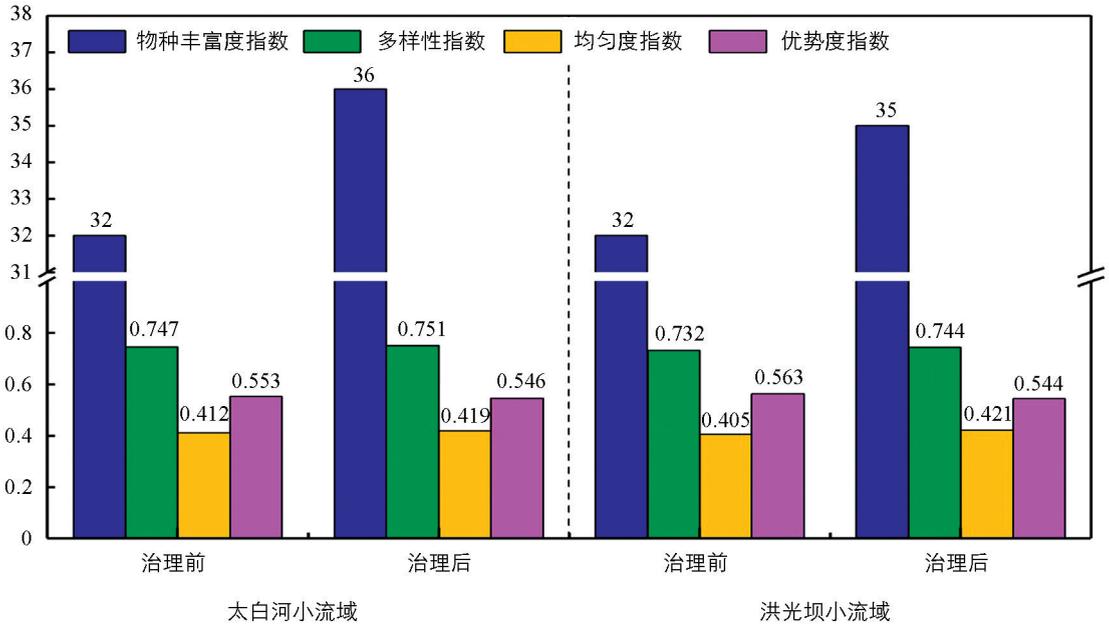


图 3 石漠化综合治理前后植被多样性变化

### 2.2.2 植物群落特征变化

植被盖度反映植被的茂密程度和植物进行光合作用面积的大小;土层厚度(覆盖层)是植物根系、土壤微生物和土壤养分的载体;枯枝落叶层(腐殖层)肥力性质最好,是植物根系和微生物分布最多的一层,对土壤的改良和防止水土流失有着重要的作用;林地面积的增加对该区域生态环境的改善有着重要的意义.从表 3 可知:各种治理措施使得植被盖度有不同程度的提高,其中人工林的效果最为明显,其次是封育林.治理前后封育林和人工林的土层厚度不变;封育林枯枝落叶层增加 2 cm,而人工林的枯枝落叶层不变;林地面积增加,太白河流域新增林草面积 1 300 hm<sup>2</sup>,其中封育林 1 120 hm<sup>2</sup>,人工林 180 hm<sup>2</sup>;洪光坝流域新增林草面积 1 610.87 hm<sup>2</sup>,其中封育林 1 463.41 hm<sup>2</sup>,人工林 147.46 hm<sup>2</sup>.

根据野外调查可知:石漠化治理措施提高了石漠化区域的植被盖度,而土层厚度和枯枝落叶层没有明显变化.土壤形成是一个十分漫长的过程,喀斯特地区地理条件特殊,形成土壤更加困难.在河谷以及河漫滩区域,封育林枯枝落叶层平均增加 2 cm.因封山育林区去除人为干扰后,植被生长相对茂密,而人工林地区枯枝落叶层较薄,主要是植被稀疏,处于恢复的初级阶段.2015 年绥阳县干旱,天气持续高温少雨,人工林的存活率较低.

表 3 石漠化小流域植被群落特征

流域	时间段	植被覆盖度/%		土层厚度/cm		枯枝落叶层厚度/cm		新增林地面积/hm <sup>2</sup>	
		封育林	人工林	封育林	人工林	封育林	人工林	封育林	人工林
太白河小流域	治理前	52	0	23.4	40	3	0	—	—
	治理后	58	15	23.4	40	5	0	1 120	180
洪光坝小流域	治理前	54	0	25.4	40	3	0	—	—
	治理后	60	15	25.4	40	5	0	1 463.41	147.46

### 2.3 植被固碳量效益评估

由表4可知,2015年太白河和洪光坝小流域人工林生物量分别为264.60 t和237.41 t;封育林生物量分别为7 414.40 t和11 634.11 t.太白河和洪光坝小流域人工林固碳量分别为2.90 t和7.95 t;封育林固碳量分别为8 904.00 t和11 634.11 t.石漠化综合治理后流域的生物量和固碳量均明显增加,封育林增加的生物量和固碳量大于人工林.封育林中乔、灌、草均有,年生长量均较大,而人工林面积少,且成活率低,年生长量很小,还未充分发挥人工林的保水保土效益.封育林的固碳量和生物量增加相对于人工林更显著.植物群落地上生物量增加,表明群落所处的生境将趋于好转,群落具有较好的生态系统功能,同时植被水土保持的效果明显<sup>[30]</sup>.植被是影响水土流失的关键因子之一,而生物量是植被生态系统中的关键<sup>[31]</sup>,是植被发挥涵水保土功能的关键,是实现其健康持续发展的根本保证.研究表明,实施石漠化综合治理工程成效显著,固碳效益明显,生境逐渐变好.

表4 石漠化小流域植被固碳效益

流 域	人工林		封育林		人工林		封育林	
	单位系数/ (t/(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> )	生物量/ t	单位系数/ (t/(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> )	生物量/ (t·a <sup>-1</sup> )	固碳系数/ (t/(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> )	固碳量/ t	固碳系数/ (t/(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> )	固碳量/ t
太白河小流域	1.47	264.60	6.62	7 414.40	1.61×10 <sup>-6</sup>	2.90	7.95	8 904.00
洪光坝小流域	1.61	237.41	7.59	11 634.11	1.61×10 <sup>-6</sup>	7.95	7.95	11 634.11

### 2.4 水土保持效益评价

从图4可知,太白河小流域治理前后土壤侵蚀模数分别为517.39,503.41 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀模数减少13.98 t/(km<sup>2</sup>·a);治理前后的水土流失总量分别为15 573.44,15 152.64 t,水土流失量减少420.80 t.洪光坝小流域治理前后土壤侵蚀模数分别为347.27,341.83 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀模数减少5.44 t/(km<sup>2</sup>·a);治理前后的水土流失总量分别为12 157.68,11 967.23 t,水土流失量减少190.45 t.石漠化综合治理实施一年其水土流失量减少,土壤侵蚀模数降低,而随着林草措施效益的发挥,其效益将日益显著.从水土保持的角度来看,绥阳县石漠化综合治理工程效益显著.

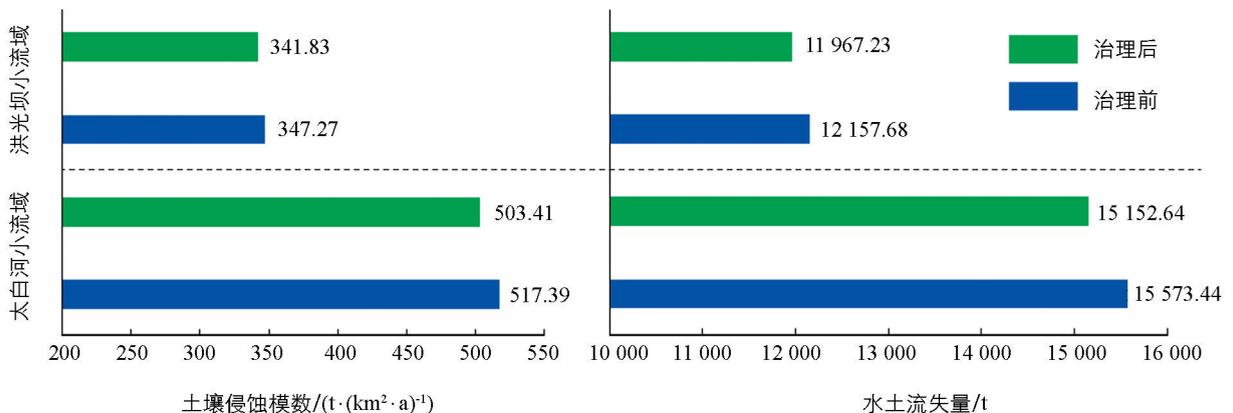


图4 石漠化综合治理水土保持效益评价

### 2.5 社会经济评价

本研究选择农地生成力、农业产值、林业产值、人均收入、恩格尔系数等来对石漠化综合治理区的社会经济进行评价,评估石漠化综合治理前后社会效益(图5).太白河和洪光坝小流域农地生产力分别提高55.21 kg/hm<sup>2</sup>和24.08 kg/hm<sup>2</sup>;农业产值总量分别提高12万元和28万元;林业产值总量分别提高16.50万元和6.6万元;人均收入分别增加0.36万元和0.52万元;恩格尔系数分别降低1.3%和2.3%.根据实地调查:石漠化综合治理后,小流域实施水利水保工程后,农地周边的交通、水肥条件得到改善,农户种植知识增加,技术改进,从而使得粮食产量出现逐年增加的趋势,人均收入增加.农业产值与农地生产力关系极为密切,项目工程区经过实施的林草工程、小型水利水保措施及其他基本农田建设项目等,使得农地

生产条件得到改善,较大程度地提高了农地生产力,最终促使了农业产值的提高.林业产值提高不显著,其所栽植的经济林(油茶、桃、李、金银花)收益比较慢,待其产生效益至少得 3 年的时间.而随着时间的推移,营林措施效益逐渐明显,林木质量逐渐提高,促使林业产值的提高.恩格尔系数 $>59\%$ 为贫困, $(50\%, 59\%]$ 为温饱, $(40\%, 50\%]$ 为小康, $(30\%, 40\%]$ 为富裕, $\leq 30\%$ 为最富裕.研究区人民生活总体达到温饱水平,而逐渐向小康靠拢.

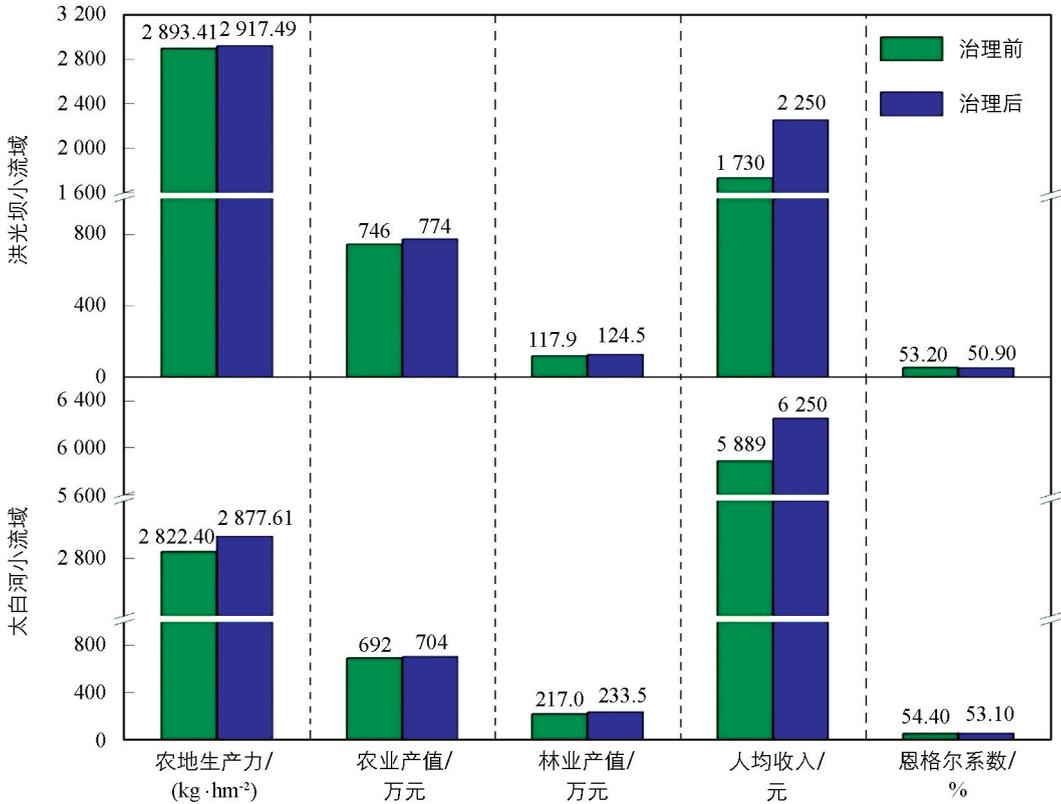


图 5 石漠化综合治理社会效益评价

### 3 结论与讨论

喀斯特石漠化太白河和洪光坝流域植被 Shannon-Wiener 多样性指数、均匀度指数、物种丰富度指数增加,优势度降低.在人工造林和封育管理措施下,研究区植被按照群落正向演替发展规律进行.植被盖度有不同程度的提高,其中人工林的效果最为明显,其次是封育林.封育林和人工林的土层厚度不变;封育林枯枝落叶层增加 2 cm,而人工林的枯枝落叶层不变.两个流域林地面积增加 2 910.87  $\text{hm}^2$ .绥阳县典型石漠化综合治理流域植被群落逐渐恢复并趋于复杂化.

2015 年绥阳县太白河和洪光坝小流域生物量和固碳量分别为 19 550.52 t 和 20 548.96 t,封育林增加的生物量和固碳量大于人工林.植物群落地上生物量增加,实施石漠化综合治理成效显著,固碳效益明显,生境逐渐变好.

太白河小流域治理后土壤侵蚀模数减少 13.98  $\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ ;水土流失量减少 420.80 t.洪光坝小流域治理土壤侵蚀模数减少 5.44  $\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ ;水土流失量减少 190.45 t.随着时间的推移,两个典型喀斯特石漠化小流域林草措施效益逐渐发挥,水土保持效益日益显著.

小流域内农地生产力提高,治理后农业产值提高 40 万元,林业产值提高 23.10 万元.人均收入增加,恩格尔系数降低,人民生活水平向小康水平发展.

综上所述,通过石漠化综合治理工程的实施,绥阳县治理区的生态环境得到了较大程度的改善,固碳减沙效果明显,农民生活水平有一定程度提高,经济状况得到了好转.开展岩溶地区石漠化综合治理工程对该区生态环境、区域经济、社会持续性发展具有极为积极的作用.

## 参考文献:

- [1] 李华林,高华端,杨涛,等. 凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(4): 687-694.
- [2] 王克林,岳跃民,陈洪松,等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [3] 穆洪晓. 西南喀斯特地区石漠化综合治理效益评价及典型案例研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- [4] 张静,宋海燕,赵雅洁,等. AM 宿主植物金银花对喀斯特干湿交替的光合响应[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(10): 43-49.
- [5] 李华林,高华端,胡勤,等. 喀斯特地区坡面径流对产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 26-30.
- [6] 陈洪松,岳跃民,王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理:成效、问题与对策[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.
- [7] 林艳华,梁千慧,刘锦春. 喀斯特地区适生树种复羽叶栎树幼苗对于旱胁迫下异质生境的生长和光合响应[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(8): 20-26.
- [8] 刘愿理,廖和平,巫芯宇,等. 西南喀斯特地区耕地破碎与贫困的空间耦合关系研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 10-20.
- [9] 段倩倩,杨晓红,黄先智. 石漠化地区生态桑林根际土壤微生物资源多样性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(7): 25-29.
- [10] 唐政,李继光,李慧,等. 喀斯特生态恢复过程中土壤原生动物的指示作用研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1808-1813.
- [11] 文丽,宋同清,杜虎,等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5822-5833.
- [12] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. 植物生态学报, 2013, 37(3): 197-208.
- [13] 陆原. 浅谈广南县喀斯特地区石漠化综合治理[J]. 生物技术世界, 2016, 13(4): 24.
- [14] 庞敏. 贵州喀斯特地区传统村落空间肌理识别及其分异研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019.
- [15] 张承琴,王普昶,龙翠玲,等. 贵州喀斯特峰丛洼地不同石漠化等级植物群落物种组成和多样性特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 48-53.
- [16] 温培才,王霖娇,盛茂银. 西南喀斯特高原峡谷石漠化生态系统植物群落特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(2): 175-184.
- [17] 陈望雄. 东洞庭湖区域森林生态系统健康评价与预警研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2012.
- [18] 郑沛,杨林伟,韩玮,等. 基于生态系统服务功能的森林社会效益价值评估——以云南省森林资源为例[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 161-170.
- [19] 申明岳,史戈,贾春燕,等. 泰山风景名胜区森林生态系统服务功能价值评估[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 715-719.
- [20] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范: LY/T 1721—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [21] 李月. 基于GIS和RUSLE的典型喀斯特流域土壤侵蚀时空演变规律[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
- [22] 卜兆宏,董勤瑞,周伏建,等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(4): 408-418.
- [23] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J]. 福建水土保持, 1989, 1(2): 58-60.
- [24] 黄炎和,卢程隆,郑添发,等. 闽东南降雨侵蚀力指标R值的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1-5.
- [25] 杨广斌,李亦秋,安裕伦. 基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 73-78.
- [26] 高华端,李锐. 喀斯特地区原状土的可蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 1-4.
- [27] 黄炎和,卢程隆,付勤,等. 闽东南土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4): 13-18.
- [28] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [29] 游松财,李文卿. GIS支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62.
- [30] 王晗生,刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. 干旱区资源与环境, 1999(2): 63-69.
- [31] 叶吉,郝占庆,姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2859-2862.

## Evaluation of Ecological Benefits of Comprehensive Management of Rocky Desertification in Karst Trough Valleys

FU Wen-bing<sup>1,2</sup>, YAN You-jin<sup>2</sup>, LI Hua-lin<sup>3</sup>,  
LIN Zhi-huan<sup>1,2</sup>, HU Gang<sup>1,2</sup>, HUANG Chao-hai<sup>1,2</sup>

1. GuizhouHualichuangtong Engineering Consultants Co., Ltd, Guiyang 550000, China;

2. Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou / College of Forestry, Guizhou University /  
Guizhou University Institute of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guiyang 550025, China;

3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract:** In order to quantitatively reveal the benefits of comprehensive control of rocky desertification in karst areas in southwest China, two small watersheds (Taibaihe watershed and Hongguangba watershed) in Suiyang of Guizhou, a county with typical karst rocky desertification, were taken as the research object. Based on the data of field experiment, investigation and collection, field verification, fixed location monitoring and other means, the benefits of comprehensive management of karst rocky desertification were evaluated with plant diversity index, the national forestry industry standards (LY/T1721-2008), soil loss equation (RUSLE) and the social and economic evaluation index system. The following results were obtained. ① The plant diversity index, evenness index and species richness index increased and the dominance degree decreased in these watersheds after the efforts of comprehensive management; vegetation coverage increased, soil thickness remained unchanged, the litter layer became thicker in closed hills and woodland area increased by 2 910. 87 ha. Plant communities in the small watersheds of integrated control of desertification were becoming more and more complicated. ② Carbon sequestration benefits were significant, biomass and carbon sequestration in these small watersheds being 19 550. 52 t and 20 548. 96 t, respectively, owing mainly to the practice of closing hillside to facilitate afforestation. ③ Soil and water loss decreased by 611. 25 t after comprehensive control of rocky desertification, and this benefit would become more and more significant. ④ Farmland productivity, agricultural output value and forestry output value in the watersheds increased, and the per-capita net income increased. The living standards of the local people are moving towards a comfortable standard of living.

**Key words:** karst; rocky desertification control; benefit evaluation; carbon fixation efficiency; soil erosion

责任编辑 包 颖