

# 西南岩溶区水土保持生态效应指标体系与定量评价

柯奇画<sup>1</sup>, 张科利<sup>1</sup>, 陈月红<sup>2</sup>, 陈美淇<sup>3,4</sup>, 罗建勇<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 地理科学学部 地理学院, 北京 100875; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;  
3. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院 南京土壤研究所, 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**西南岩溶区是我国水土流失重点治理区,但对于其治理的生态效应尚缺乏一套科学客观、简单可行的快速评价方法。通过将数据统计分析结果与专家经验判断相结合,构建了西南岩溶区不同尺度下水土保持生态效应评价指标体系,并提出了综合量化模型。实例研究表明:该评价方法兼顾科学性和实用性,能对西南岩溶区坡面、小流域和区域尺度的水土保持生态效应进行快速的量化评价,可为今后西南岩溶区水土保持生态效应的监测与评价提供参考依据。

**关键词:**西南岩溶区;水土保持生态效应;不同尺度;指标体系;定量评价

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0148-07

## Index System and Quantitative Evaluation for the Ecological Effects of Soil and Water Conservation in Karst Area of Southwest China

KE Qihua<sup>1</sup>, ZHANG Keli<sup>1</sup>, CHEN Yuehong<sup>2</sup>, CHEN Meiqi<sup>3,4</sup>, LUO Jianyong<sup>1</sup>

(1. School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;  
3. State Key Laboratory of Soil & Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Southwest karst area is the key area for soil erosion control in China. Nevertheless, scientific, objective, user-friendly and quick method for evaluation on the ecological effects of soil and water loss control in Southwest karst area is unavailable. Through a combination of data statistical analysis with experts' experience, we established an index system for the ecological effects of soil and water conservation on different scales in karst area of southwest China, and proposed a quantitative model for the evaluation as well. The case study shows that: this method balancing scientificity and practicability can provide a quick quantitative evaluation for the ecological effects of soil and water loss control on the slope, in small watershed and region in southwest karst area, can also offer some references for the future monitoring and evaluation for the ecological effects of soil and water conservation in karst area of southwest China.

**Keywords:** karst region of southwest China; ecological effects of soil and water conservation; different spatial scales; index system; quantitative evaluation

西南岩溶区,即云贵高原区,属于全国水土保持区划中的一级分区,包括四川、贵州、云南和广西 4 省(自治区)共 273 个县(市、区)的岩溶分布集中而又连片的地区<sup>[1]</sup>。西南岩溶区是我国土壤侵蚀的主要区域之一,也是我国基岩裸露度最高、生态问题最突出

的区域。为了控制水土流失和石漠化发展,自 20 世纪 80 年代以来,在西南岩溶区开展水土流失防治,实施了多项大型生态建设工程。但工程实施是否合理、生态效应究竟如何都还缺乏评价标准。因此,急需开展水土保持生态效应评价方法的研究。开展及时准

收稿日期:2018-01-25

修回日期:2018-03-23

资助项目:水利部公益性行业科研专项“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045);国家自然科学基金重点项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748);国家重点研发计划项目“近年来国家重大生态工程关键技术评估”(2016YFC0503704)

第一作者:柯奇画(1993—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀相关研究。E-mail:qhke@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张科利(1962—),男,陕西宝鸡人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀相关研究。E-mail:keli@bnu.edu.cn

确的水土保持生态效应评价,不仅可以尽早发现治理过程中存在的问题,还能为政府对水土流失治理和生态环境建设等方面的宏观决策提供科学依据。目前,西南岩溶区水土流失治理生态效应的评价尚处于探索阶段,缺乏科学客观、简单可行的快速评价体系和方法。现有的指标体系大多无法同时兼顾科学性和实用性,存在指标不全面、不具体,或过于繁杂、获取数据难度大,指标之间交叉作用明显,多为无法直接体现水土保持治理效果的间接性指标等问题。本文拟在结合监测数据和专家经验的基础上,建立既科学客观又简易可行的评价指标体系和量化评价模型,为今后西南岩溶区水土保持生态效应的监测与评价提供参考依据。

1 水土保持生态效应评价体系构建

1.1 构建原则

除了传统的指标体系构建原则,水土保持生态效应评价指标体系的构建还需要遵循以下原则:

(1) 标准化原则:所有的指标都应该是能直接体现水土保持措施作用的标准化指标,与地理位置、自然气候特征、面积大小等因素无关;(2) 尺度匹配原则:指标的选取要与分析尺度相匹配,不同尺度下指标的内涵和获取难度不同,适用于一种尺度下的指标不能直接推广到其他尺度。

1.2 构建步骤

构建水土保持生态效应评价指标体系,是一项严谨的科研工作,需要经过多重筛选才能得到一套科学又实用的指标体系。西南岩溶区水土保持生态效应评价指标体系的构建步骤如下:

1.2.1 指标库建立 查阅了大量西南岩溶区不同尺度(包括坡面、小流域、示范区、省、地区等)水土保持生态效应评价指标体系等方面的文献资料,在此基础上进行指标归类汇总,然后利用频度统计法(选用文献中出现频率不少于 3 次的指标)剔除一部分非代表性指标,得到共 75 个指标的西南岩溶区水土保持生态效应监测与评价指标库。指标库详情见图 1。

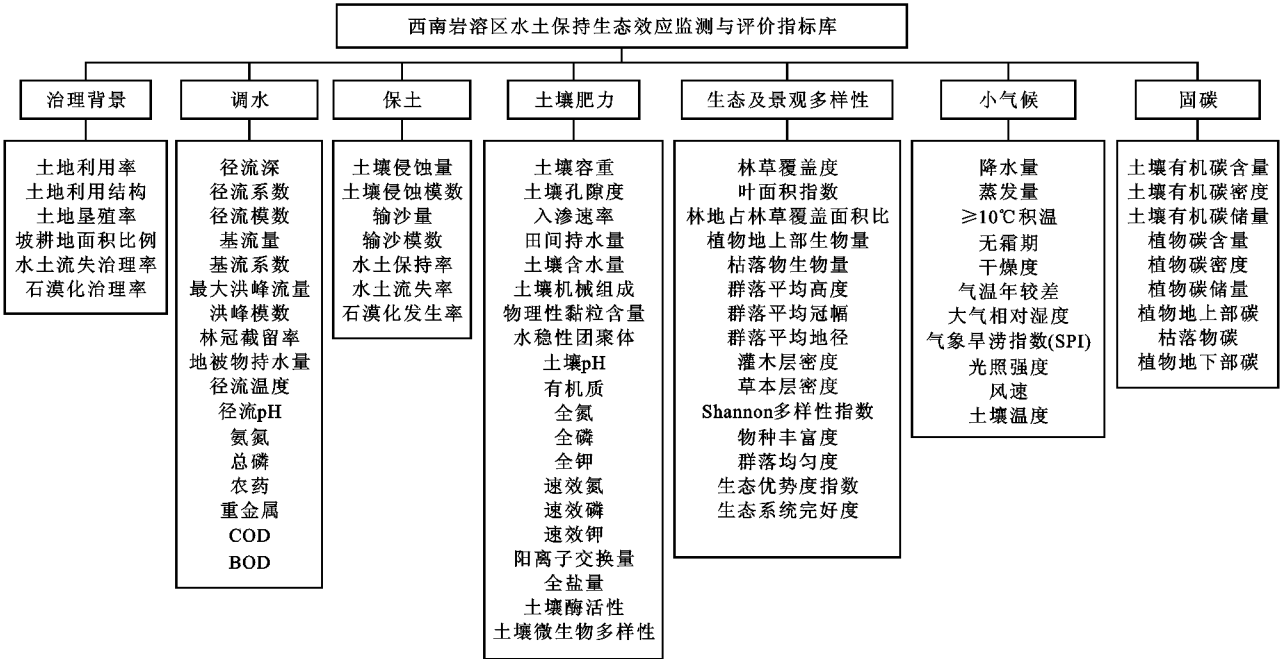


图 1 西南岩溶区水土保持生态效应评价指标库

1.2.2 指标初选 邀请水土保持专家,采用会议咨询的形式,经过几轮商讨得到各尺度指标体系的一级指标和二级指标,同时对指标库中的三级指标进一步筛选,遴选出具备该区代表性的关键指标和具有水土保持物理意义的标准化指标,初步形成西南岩溶区 3 个不同尺度下水土保持生态效应评价的初选指标。其中,由于关于西南岩溶区小流域尺度的相关研究较少,而且数据不完整、不连续、不配套,因此后续无法基于实测数据确定小流域尺度的水土保持生态效应评价指标体系。在此仅列出坡面尺度和区域尺度的

水土保持生态效应评价初选指标,具体见表 1、表 2。  
1.2.3 指标体系确定 收集西南岩溶区不同尺度下水土保持生态效应指标的相关数据,结合数据的可获得性,通过敏感性分析和相关性分析对初选指标体系进行调整,剔除三级指标中难以获取、不敏感或与其他指标相关性中等的指标,最终确定指标体系。通过相关分析筛选数据的具体方法是:在每个二级指标下,保留一个与其他三级指标相关性最好的指标并删除与该指标密切相关的所有指标,如果还有剩余指标,将与其他指标相关性最差的一个指标保留,既简化指

标体系,又较为全面地反映二级指标的内涵。

表 1 西南岩溶区坡面尺度水土保持生态效应评价初选指标

一级指标	二级指标	三级指标
调水(水)	调节径流	径流系数
保土(土)	土壤侵蚀	土壤侵蚀模数
		土壤容重
	土壤物理性质	土壤机械组成
		水稳性大团聚体
培肥(肥)	土壤化学性质	有机质
		全氮
		全磷
		全钾
植被(生)	植被覆盖	植被覆盖度
	生物量	植物地上部生物量
	植物多样性	香农多样性指数
	土壤有机碳	土壤有机碳密度
固碳(碳)	植物碳	植物地上部碳密度

表 2 西南岩溶区区域尺度水土保持生态效应评价初选指标

一级指标	二级指标	三级指标
调水(水)	调节径流	径流系数
保土(土)	土壤侵蚀	洪峰模数
		输沙模数
	石漠化	水土流失率
		石漠化发生率
植被(生)	植被覆盖	植被覆盖度
	生物量	植物地上部生物量
	植物多样性	香农多样性指数
	土壤有机碳	土壤有机碳密度
固碳(碳)	植物碳	植物地上部碳密度

**坡面尺度** 调水保土效应的指标数据来自贵州毕节、龙里以及遵义三地的野外径流小区多年监测资料,培肥、植被和固碳效应的指标数据则来自于广西环江喀斯特生态试验站的野外实测资料和相关研究数据。通过空间代替时间的方法,即以裸露小区或坡耕地的多年平均状态代表治理前的状况,用不同水土保持措施或不同退耕还林还草模式的多年平均状态代表治理后不同治理模式下的状况,对坡面尺度各项生态效应三级指标进行敏感性分析和关联性。经过筛选后,得到坡面尺度水土保持生态效应评价指标体系的递阶层次结构如图 2 所示。

**区域尺度** 利用乌江流域贵州段 2006—2014 年的降雨和水文泥沙数据,贵州省 20 世纪 80 年代以来的水土流失和石漠化遥感监测数据以及 2005 年、2010 年、2015 年的植被覆盖度、生物量和固碳数据,通过年份数据对贵州省各项生态效应三级指标的敏感性和关联性进行分析。在获取数据的过程中发现,

与坡面的次降雨事件的径流系数不同,流域或区域尺度径流系数的获取需要在次降雨过程、次洪水过程资料的基础上进行径流分割才能得到,资料获取和数据计算都较为繁杂,可操作性较差,因此径流系数不适合作为流域或区域尺度的调水效应指标。经过调整和筛选后,得到流域或区域尺度水土保持生态效应评价指标体系的递阶层次结构如图 3 所示。

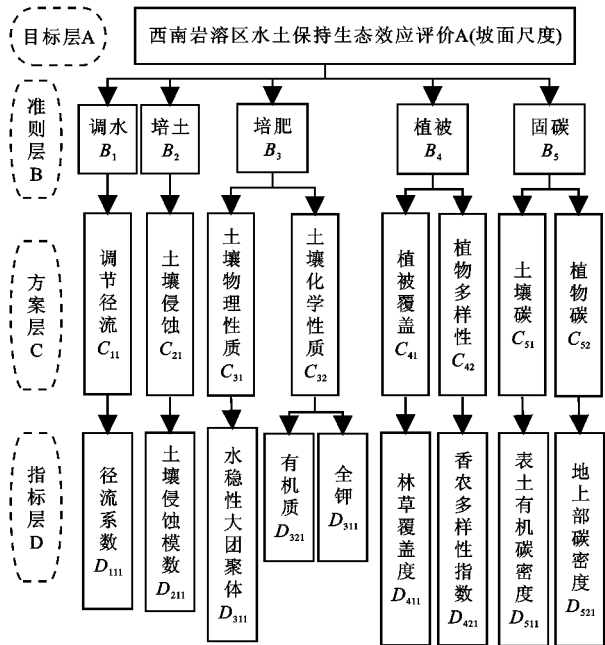


图 2 西南岩溶区坡面尺度水土保持生态效应评价指标体系的递阶层次结构图

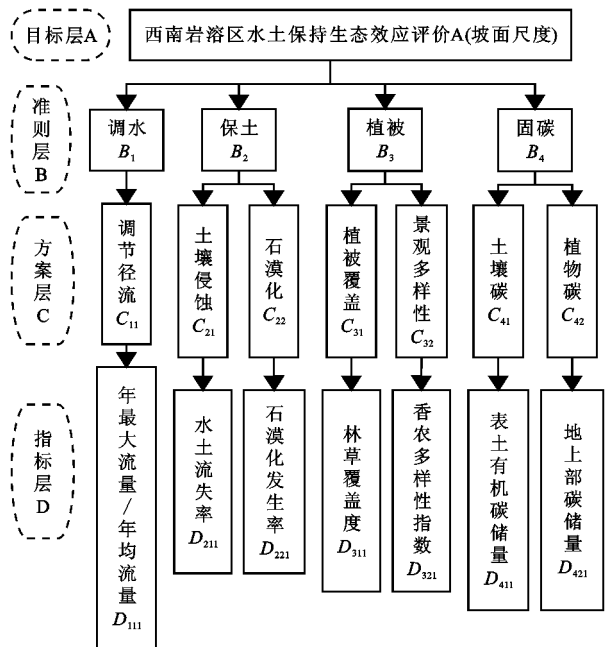


图 3 西南岩溶区区域尺度水土保持生态效应评价指标体系的递阶层次结构图

小流域尺度介于坡面尺度和流域/区域尺度之间;同时,小流域又具备大流域的结构特征,因为无论是大流域还是小流域,它们都是由更小的、次一级的

子流域组成,小流域本身又可被看作被缩小的大流域。因此,小流域与大流域的水文泥沙过程具有关联性和相似性。此外,由于选取的指标都是相对的标准化的指标,可大大减弱尺度效应带来的偏差,因此小流域的评价指标体系可以参考流域/区域尺度的结果。

2 水土保持生态效应量化评价

2.1 指标权重确定

指标权重的大小可以直接反映各个指标的相对重要性,所以指标权重的确定在量化评价过程中占有非常重要的地位。由于数据限制,采用德尔菲法(Delphi method)与层次分析法(简称 AHP)相结合的方法分析和确定各指标权重,其中德尔菲法的专家打分依据包括专家经验和指标数据的敏感程度(变异系数)。这样既能吸取宝贵的专家经验,弥补西南岩溶区各指标配套监测数据缺乏的不足,又能较好地解决权重指标主观随意性的问题,可取得较满意的结果。

表 3 坡面尺度水土保持生态效应评价指标各单层权重及三级指标的体系权重

准则层(B)	B 层权重	方案层(C)	C 层权重	指标层(D)	D 层权重	三级指标权重
调水 B <sub>1</sub>	0.195	调节径流 C <sub>11</sub>	1.000	径流系数 D <sub>111</sub>	1.000	0.195
保土 B <sub>2</sub>	0.357	土壤侵蚀 C <sub>21</sub>	1.000	土壤侵蚀模数 D <sub>211</sub>	1.000	0.357
		土壤物理性质 C <sub>31</sub>	0.431	水稳性大团聚体 D <sub>311</sub>	1.000	0.084
培肥 B <sub>3</sub>	0.194	土壤化学性质 C <sub>32</sub>	0.569	有机质 D <sub>321</sub>	0.633	0.070
				全钾 D <sub>322</sub>	0.367	0.041
		植被覆盖 C <sub>41</sub>	0.633	林草覆盖度 D <sub>411</sub>	1.000	0.094
植被 B <sub>4</sub>	0.148	植物多样性 C <sub>42</sub>	0.367	香农多样性指数 D <sub>421</sub>	1.000	0.054
		土壤碳 C <sub>51</sub>	0.367	表土有机碳密度 D <sub>511</sub>	1.000	0.039
固碳 B <sub>5</sub>	0.106	植物碳 C <sub>52</sub>	0.633	地上部碳密度 D <sub>521</sub>	1.000	0.067

表 4 小流域和区域尺度水土保持生态效应评价指标各单层权重及三级指标的体系权重

准则层(B)	B 层权重	方案层(C)	C 层权重	指标层(D)	D 层权重	三级指标权重
调水 B <sub>1</sub>	0.240	调节径流 C <sub>11</sub>	1.000	年最大流量/年均流量 D <sub>111</sub>	1.000	0.240
保土 B <sub>2</sub>	0.444	土壤侵蚀 C <sub>21</sub>	0.500	水土流失率 D <sub>211</sub>	1.000	0.222
		石漠化 C <sub>22</sub>	0.500	石漠化发生率 D <sub>221</sub>	1.000	0.222
植被 B <sub>3</sub>	0.195	植被覆盖 C <sub>31</sub>	0.633	林草覆盖度 D <sub>311</sub>	1.000	0.123
		景观多样性 C <sub>32</sub>	0.367	香农多样性指数 D <sub>321</sub>	1.000	0.072
固碳 B <sub>4</sub>	0.121	土壤碳 C <sub>41</sub>	0.367	表土有机碳密度 D <sub>411</sub>	1.000	0.044
		植物碳 C <sub>42</sub>	0.633	地上部碳密度 D <sub>421</sub>	1.000	0.077

2.2 指标标准化

利用指标质量离散刻度,对各三级指标进行标准化。结合国家、地区标准或者公认的量化值,并根据监测数据、专家咨询和大量文献资料<sup>[6-20]</sup>,确定了各项指标的标准化分级界限,得到西南岩溶区水土保持生态效应指标的质量离散刻度。各指标的各级标准在 0~1 划分为 5 个区间,将最优的条件取值 1 分,超过 1 分的按 1 分记,最劣的条件取值 0 分,低于 0 分的按 0 分算,其余评分据此内插推算。公式可参考式

果。整个过程分为三部分:

(1) 首先建立递阶层次结构模型(图 2,图 3),采用 Delphi 法请水土保持专家就各指标的重要性程度进行打分;打分依据除了专家经验,还要考虑各指标敏感程度的差异,较为客观地确定各指标的相对重要性。

(2) 然后运用 AHP 法按照重要性标度构造各层次间的判断矩阵,利用 MATLAB 软件计算各判断矩阵的最大特征值,并需通过一致性检验,进行归一化处理求得各层次评价指标的权重。该分析选择的重要性标度是适合精确权重确定、各项统计性能优良的指数标度 $(a^0 - a^8)^{[2-4]}$ ,一致性检验方法选择指数标度判断矩阵的一致性检验方法<sup>[5]</sup>。

(3) 最后将准则层 B、方案层 C 和指标层 D 这 3 层的单层权重按照隶属结构依次相乘,即可得到各三级指标在整个指标体系中的权重。经过以上步骤,分别得到坡面、小流域和区域尺度水土保持生态效应评价指标权重(表 3 和表 4)。

(1)或式(2):

$$Y=b+\frac{B-X}{B-A}\times 0.2$$
(1)

$$Y=a-\frac{X-A}{B-A}\times 0.2$$
(2)

式中:X 为某三级指标的状态值;Y 为该指标对应的标准化值;A~B 为指标值对应的分级范围;a~b 为标准化值对应的分级范围。以土壤侵蚀模数为 200 [t/(km<sup>2</sup>·a)]为例,该指标值对应的等级是 50~300

[t/(km<sup>2</sup>·a)](0.8~0.6)。各项指标值经过标准化后都在 0~1,指标标准化值越大,对生态效应的贡献

越大。西南岩溶区水土保持生态效应评价指标的标准化分级见表 5。

表 5 西南岩溶区水土保持生态效应评价指标标准化分级标准

序号	指标	I	II	III	IV	V
1	坡面径流系数	0~0.025	0.025~0.05	0.05~0.1	0.1~0.15	0.15~0.2
2	流域年最大流量/年均流量	1~3	3~5	6~8	8~10	10~12
3	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	0~50	50~300	300~1500	1500~3000	3000~6000
4	水土流失率/%	20~30	30~40	40~60	60~70	70~80
5	石漠化发生率/%	5~10	10~20	20~30	30~40	40~45
6	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	70~60	60~50	50~30	30~20	20~10
7	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	15~13	13~11	11~9	9~7	7~5
8	林草覆盖度/%	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20
9	Shannon 多样性指数	3.5~3	3~2.5	2.5~2	2~1.5	1.5~1
10	表土有机碳密度/(t·hm <sup>-2</sup> )	75~65	65~55	55~35	35~25	25~15
11	植物地上部密度/(t·hm <sup>-2</sup> )	100~80	80~60	60~40	40~20	20~0
	标准化值	1.0~0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	0.2~0.0

注:土壤有机碳密度测定采集 0—20 cm 土层土壤样品。

2.3 综合评价量化模型

2.3.1 量化模型的原理 利用线性加权求和法计算水土保持生态状态总得分,可直接将所有三级指标的标准化值与对应的指标权重相乘,得每个指标的生态状态得分,然后累加得到水土保持生态状态总得分;亦可分别求得准则层(B)各因子(如,调水、保土、施肥、植被、固碳)的生态状态值,再累加得到对应尺度下水土保持生态状态总得分。水土保持生态状态总得分 A 的计算公式见式(3):

$$A = (\sum_{i=1}^n W_i \times P_i) \times 100 \tag{3}$$

式中:W<sub>i</sub> 为各指标的相对权重(0~1);P<sub>i</sub> 是各指标的标准化值(0~1);n 表示指标总数。

该模型将水土保持生态状态综合得分 A 的取值范围设在 0~100,其大小反映了某个坡面、小流域或区域的生态状况,如果分值越大,则生态状况越好,治理成果越显著、效益越好,反之则反。根据计算出的综合分值,先把岩溶地区治理的生态状况粗分为合格与不合格,再把合格分为中等、良好、优 3 个等级,最后按照等分原则,把不合格分为很差和差两个等级。在查询国内外相关研究成果和广泛征求专家意见的基础上,结合岩溶地区实际情况,初步得出西南岩溶区水土保持生态状态值的等级划分(表 6)。

表 6 西南岩溶区水土保持生态状态值等级划分

分值 A	0~25	25~50	50~70	70~85	85~100
等级	不合格		合格		
	很差	差	中	良	优

2.3.2 量化模型的应用 以上量化模型既可用于评

价某年的水土保持生态状态值,也可用于评价一段治理期内的水土保持生态效应。当评价对象是某年的水土保持生态状态值时,代入量化模型的各项指标数据应该是该年的平均状态值;当评价对象是某几年治理期内的水土保持生态效应时,代入量化模型的各项指标数据应该是两个时间节点的平均状态值,算出起始年份和截止年份的总得分后,前后得分变率的大小和正负即反映了这段时间内的水土保持生态效应。其中,两个时间节点的平均状态值,既可以是起始年和结束年的两个年内平均状态值,也可以是分别以起始年和截止年为中心的前后几年(建议 3 a 或 5 a 不等)的两个多年平均状态值。如果相差时间足够长(如 20 a 及以上)或两个时间节点前后几年气候特征相似,则可直接用起始年和结束年这 2 个年内平均状态值来计算这段时间内的水土保持生态效应;若两个节点时间相差不大,为了避免气候变化(如丰枯水年)的影响,建议通过取多年平均值来减少气候变化对水土保持生态效应计算的干扰,如 2001—2005 年这 5 a 的多年平均状态值和 2011—2015 年这 5 a 的多年平均状态值,通过这两个多年平均状态值计算出来的两个总得分,以此来评价 2003—2013 年期间的水土保持生态效应。总而言之,该模型的具体应用可根据评价目的和数据的获取情况来调整,选择最合适、可行的处理方式即可。

3 典型案例分析——以贵州省为例

贵州省是西南岩溶区的典型省份,且贵州省各项

生态效应指标的监测数据较为完整,时间跨度较长也较为连续。因此选择贵州省作为西南岩溶区区域尺度水土保持生态效应评价的案例对象。

3.1 数据情况

利用现有相关年鉴、文献、调查资料和 NDVI 产品,搜集贵州省水土保持生态效应各指标数据。根据数据的获取情况,选择 2005 年作为初始年、2015 年作为截止年,评价贵州省 2015 年的水土保持生态状况相对于 2005 年水土保持生态状况的变化程度,即评价 2005—2015 年期间贵州省水土保持工作的生态效应。其中,为了避免气候变化对调水效应的干扰,

同时受数据分布限制,调水效应指标的数据分别选择 2006—2009 年和 2011—2014 年的多年平均值作为 2005 年和 2015 年的多年平均状态值。此外,由于 2005 年没有水土流失调查数据发布,因此将时间距离最近的 2002 年的数据作为 2005 年的水土流失状态的近似值。

3.2 贵州省水土保持生态效应评价

根据表 5 的指标标准化分级标准,对各项指标的状态值进行标准化得到标准化值,然后将标准化值与对应的指标权重相乘得到该指标的指标值。各单项指标标准化和指数化结果见表 7。

表 7 贵州省 2005 年和 2015 年水土保持生态状况评价三级指标标准化和指数化结果

指标	权重	2005 年			2015 年		
		状态值	标准化值	指标值	状态值	标准化值	指标值
年最大流量/年均流量	0.24	6.48	0.55	0.13	6.16	0.58	0.14
水土流失率	0.222	41.56%	0.58	0.13	33.42%	0.73	0.16
石漠化发生率	0.222	18.68%	0.63	0.14	13.06%	0.74	0.16
林草覆盖度	0.123	59.80%	0.8	0.1	65.70%	0.9	0.11
香农多样性指数	0.071	1.34	0.14	0.01	1.37	0.15	0.01
表土有机碳密度	0.044	62.02	0.74	0.03	62.49	0.75	0.03
地上部碳密度	0.076	90.6	0.91	0.07	98.4	0.98	0.07

对各三级指标的指数值进行归类汇总,得到治理前后生态总效应下一级各子效应的指标值,各一级指标值累加后乘以 100 即可算出百分制下的生态效应总得分;治理后的指标值减去治理前的指标值可得到指标增量,进一步计算出的指标增率即可指标治理效果。具体结果见表 8。

表 8 贵州省 2005—2015 年期间水土保持生态效应评价结果

效应 分类	指标值		指标 增量	指标 增率/%
	2005 年	2015 年		
调水	0.13	0.14	0.01	5.89
保土	0.27	0.33	0.06	21.44
植被	0.11	0.12	0.01	12.87
固碳	0.10	0.11	0.01	6.25
总计	0.610	0.696	0.09	14.03
总得分	61	70	9	14

贵州省 2005 年和 2015 年水土保持生态状况总得分分别为 61 分和 70 分,生态状况均属于中等水平。与 2005 年相比,贵州省 2015 年的生态状况总得分提高了 9 分,总增率为 14%,年均增率 1.4%。其中,权重最大的保土效应指标值的增幅最大,为 21.44%;其次是植被效应和固碳效应,增幅分别为 12.87%和 6.25%;增幅最小的是调水效应指标,为 5.89%。调水效应指标的增幅较小可能与数据的年份分布有关,由于贵州省可获水文数

据的年份分布范围(2006—2014 年)过小,为了消除丰枯水年的影响,分别选择 2006—2009 年和 2011—2014 年的多年平均状态值作为 2005 年和 2015 年的状态值,很有可能使原本的调水效应被低估。若数据条件允许,选择 2003—2007 年的水文数据计算以 2005 年为中心的多年平均状态值,2013—2017 年的水文数据计算以 2015 年为中心的多年平均状态值,调水效应指标增幅应该比较明显。总体来看,2005—2015 年贵州省的水土保持工作取得了较好的生态效应成果,期间生态状况总得分的增率为为 14%。但目前为止,贵州省的生态状况依然处于中等级别,依然需要坚持和加强水土保持防治工作。

4 结论

近年来,水土保持效应评价研究亟待发展。本文通过收集大量实测数据和文献数据开展了量化研究,并广泛征求专家经验,构造了西南岩溶区坡面、小流域和区域尺度下的水土保持生态效应评价体系 and 量化评价模型。其中,坡面尺度的水土保持生态效应评价体系分为水、土、肥、生、碳五大类,共有 9 个三级指标;小流域和区域尺度共用一套指标体系,分为水、土、生、碳四大类,共 7 个三级指标。这套评价方法可实现科学、快速地评价西南岩溶区不同空间尺度的

水土保持生态效应,是对岩溶区水土保持理论和石漠化治理理论研究内容的丰富,为西南岩溶区水土保持生态效应的监测与评价提供了一种可参考和推广应用的方法。

致谢:本研究在资料获取的过程中得到了中国水利水电科学研究院水资源研究所、中国科学院地球化学研究所、广西环江农田生态系统国家野外科学观测研究站等有关领导和工作人员的大力支持和帮助,谨此一并致谢。

#### 参考文献:

- [1] 王治国,张超,孙保平,等.全国水土保持区划概述[J].中国水土保持,2015(12):12-17.
- [2] 吕跃进,张维,曾雪兰.指数标度与 1—9 标度互不相容及其比较研究[J].工程数学学报,2003,20(8):77-81.
- [3] 吕跃进,张维.指数标度在 AHP 标度系统中的作用[J].系统工程学报,2003,18(5):452-456.
- [4] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60.
- [5] 吕跃进.指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J].统计与决策,2006,24(18):31-32.
- [6] 吴尧,官明开,曹煜,等.近 50 年珠江三大支流水沙关系变化研究[J].水道港口,2016,37(4):405-410.
- [7] 熊亚兰,张科利,杨光徽,等.乌江流域水沙特性变化分析[J].生态环境学报,2008,17(5):230-235.
- [8] 师长兴.长江上游输沙模数分布图的制作及其空间分异特征初步分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(11):1322-1326.
- [9] 许全喜,陈松生,熊明,等.嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J].泥沙研究,2008(2):1-8.
- [10] 王萍.珠江流域人类活动作用下水沙特征变化响应研究[D].广州:中山大学,2010.
- [11] 任洪玉.基于 GIS 的中国径流输沙时空动态变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [12] 朱秀迪,王志刚,任斐鹏,等.西南岩溶区小流域划分与水文特征分析[J].中国水土保持,2017(2):25-27.
- [13] 罗志远,杨全明,吴刚.贵州省洪水特性及洪峰模数规律浅析[J].水利规划与设计,2009(2):8-10.
- [14] 石浩,张京恩.清水江流域贵州省境内暴雨洪水特性浅析[J].河南水利与南水北调,2012(11):27-28.
- [15] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学,2003,33(1):72-80.
- [16] 中华人民共和国水利部.岩溶地区水土流失综合治理技术标准:SL461-2009[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [17] 苏跃.喀斯特小流域土壤质量变化及其对水环境质量的影晌[D].重庆:西南大学,2008.
- [18] 刘洋.喀斯特石漠化治理的水土保持效益监测评价研究[D].贵阳:贵州师范大学,2014.
- [19] 陈洪云.喀斯特石漠化综合治理生态监测与效益评价[D].贵阳:贵州师范大学,2007.
- [20] 张如生.水土保持效益及政策效果评价方法研究[D].北京:中国农业大学,2006.
- [17] 王清,喻理飞,李先林.黔中喀斯特植被恢复过程中水土保持功能变化初步研究[J].贵州科学,2005,23(1):58-61.
- [18] 莫林,张红莲.飞机草地理分布、危害、传播和防治技术的研究进展[J].广西农学报,2014,29(6):44-46,73.
- [19] 吕仕洪,陆树华,李先琨,等.广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报[J].中国岩溶,2005,24(3):196-201.
- [20] 唐赛春,吕仕洪,潘玉梅,等.广西喀斯特地区割草结合植树方法对飞机草的控制效果[J].应用生态学报,2011,22(7):1944-1948.
- [21] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [22] 刘云鹏,张社奇,谷洁,等.不同土地利用方式对陕西黄河湿地土壤水分物理性质的影响[J].安徽农业科学,2011,39(5):2725-2728.
- [23] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等.宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J].水土保持学报,2007,21(1):95-98.
- [24] Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Soil erodibility, microbial biomass, and physical-chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China [J]. Ecological Research, 2010,25(3):531-541.

(上接第 147 页)