

# 基于模糊数学理论的川南地区典型小流域生态清洁度综合评价

周萍<sup>1,2</sup>, 文安邦<sup>1</sup>, 严冬春<sup>1</sup>, 史忠林<sup>1</sup>, 周继<sup>1</sup>

(1. 中国科学院, 水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** [目的] 评价川南地区典型生态清洁小流域清溪谷小流域的生态清洁程度, 以期有效指导山区各级生态清洁小流域建设工程实施方案的制定, 同时为类似区域生态清洁小流域建设及其效果评价提供科学理论与数据支持。[方法] 依据科学性、代表性、可操作性、适用性等原则, 结合清溪谷小流域的自然、社会和经济特征, 采用模糊数学法和层次分析法构建川南地区清溪谷典型小流域生态清洁度的综合评价指标体系框架。[结果] 清溪谷典型小流域生态清洁度的综合评价指标体系包含生态区、生产区、生活区 3 个子系统, 初选沟道水文形态、农业用地比例、生活污水处理率等 24 项作为评价指标。流域水系整治及水土流失综合治理的生态指标所占权重为 0.247, 生态农业发展指标所占权重为 0.373, 人居环境整治所占权重为 0.380。清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价指数分值为 0.772, 达到“清洁”等级。清溪谷生态清洁小流域系统处于良性、协调、稳定的发展状态。[结论] 通过生态清洁小流域建设, 改善了当地农业生产条件, 完善了产业结构调整, 有效控制了面源污染, 提供了洁净的水源、优美的生态和人居环境, 促进了流域水土资源、生态环境和经济社会的可持续发展。

**关键词:** 生态清洁小流域; 综合评价; 评估指标; 模糊数学理论; 层次分析法

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2019)01-0114-06

**中图分类号:** S157.2, Q148

**文献参数:** 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 基于模糊数学理论的川南地区典型小流域生态清洁度综合评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 114-119. DOI:10.13961/j.cnki.stbetb.2019.01.018; Zhou Ping, Wen Anbang, Yan Dongchun, et al. Comprehensive eco-cleanliness evaluation on typical watershed of Southern Sichuan Province based on fuzzy mathematics method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 114-119.

## Comprehensive Eco-cleanliness Evaluation on Typical Watershed of Southern Sichuan Province Based on Fuzzy Mathematics Method

Zhou Ping<sup>1,2</sup>, Wen Anbang<sup>1</sup>, Yan Dongchun<sup>1</sup>, Shi Zhonglin<sup>1</sup>, Zhou Ji<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, The Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** [Objective] The ecological cleanliness in the small watershed of the typical ecological clean basin in South Sichuan Province was evaluated, in order to effectively guide the formulation of the implementation plan for the construction of ecological clean and small watershed in mountainous areas, and to provide scientific theory and data support for the construction of ecological clean small watershed in similar areas and the evaluation of its effect. [Methods] Based on the principles of representativeness, operability and applicability, according to the natural, social and economic characteristics of the Qingxigu small watershed, a

收稿日期: 2018-07-20

修回日期: 2018-08-14

资助项目: 国家自然科学基金“土地埂对紫色土坡耕地梯化过程的作用机理”(41671286); 国家重点研发计划项目“多因素影响下长江泥沙来源及分布变化研究”(2016YFC0402301)

第一作者: 周萍(1981—), 女(汉族), 陕西省汉中市人, 博士, 副研究员, 主要从事坡耕地土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zp09@imde.ac.cn.

通讯作者: 文安邦(1964—), 男(汉族), 重庆市忠县人, 研究员, 博士生导师。主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wabang@imde.ac.cn.

comprehensive evaluation index system for eco-cleanliness evaluation in Qingxigu watershed was established by fuzzy mathematics method and analytic hierarchy process. [Results] The comprehensive evaluation index system of ecological cleanliness in Qingxigu watershed included 3 subsystems: ecological region, production region and living region, and 24 evaluation indices were chosen. The weight of the ecological index of watershed regulation of water system and soil conservation measurements was 0.247, the weight of ecological agriculture development was 0.373, the weight of renovating environment of human settlements was 0.380, and the total value of the ecological clean watershed was 0.772, reaching the 'clean' level. It indicated that the Qingxigu small watershed was in a healthy, coordinate and stable development. [Conclusion] The construction of eco-clean small watershed could improve the local agricultural condition, adjust production structure, control the non-point pollution, supply the pure and clean water resource and accelerate the sustainable development of the watershed.

**Keywords:** eco-clean small watershed; comprehensive evaluation; evaluation indices; fuzzy mathematics method; analytic hierarchy process

小流域作为水源汇集的最小单元,是区域水源保护和水土保持工作的基本要素<sup>[1-2]</sup>。小流域作为一个开放的、多元化的自然—社会—经济综合体,是生态经济活动的基础,其可持续、健康发展对区域人口的生存与发展起着重要作用<sup>[3]</sup>。中国的小流域治理工作始于 20 世纪 50 年代<sup>[4]</sup>。并于 80 年代初在全国各地相继开展,到 1991 年《水土保持法》的颁布,标志着小流域治理进入到以预防为主、依法综合治理阶段。生态清洁小流域建设的提出源于 2003 年,北京市以水源保护为首要目的,首次开展生态清洁小流域的建设和探索<sup>[5]</sup>。建设生态清洁小流域是对传统的小流域综合治理的继承和发展,生态清洁小流域综合治理涉及水土保持、面源污染、点源污染、河流健康和人居环境等方面<sup>[6]</sup>。到 2014 年底,全国已有 30 个省的 335 个县开展了生态清洁小流域建设,实施小流域约 800 条<sup>[7-8]</sup>。2018 年根据《关于实施乡村振兴战略加快推进生态清洁小流域建设的指导意见》,提出了以生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展为要求,结合区域自然和经济社会条件禀赋,生态清洁小流域建设原则上划分为生态区、生产区、生活区。根据“三区”功能,因地制宜开展流域水系整治、水土流失综合治理、生态农业推广和人居环境整治。生态清洁小流域涉及了系统论、生态经济学、景观生态学、可持续发展理论、水土保持学及生态系统控制理论等<sup>[1]</sup>。中国目前在生态清洁小流域的建设、治理模式等方面已取得了一定成效<sup>[9]</sup>。

为对小流域的生态清洁现状和建设成果进行客观评价,需建立科学可行的评价指标体系。已有研究主要针对小流域生态系统健康、小流域生态经济评价、小流域水环境质量等方面评价,对生态清洁小流域整体综合评价的研究较缺乏,未建立系统的指标体

系及评价方法<sup>[10]</sup>。选择合适的评价方法是小流域综合治理效果评价的关键,主要从生态、经济和社会三大效益框架出发<sup>[11-12]</sup>,利用定性与定量相结合的方法进行流域生态系统评价。主要研究方法有综合指数法<sup>[13]</sup>、主成分分析法<sup>[14]</sup>、层次分析法<sup>[15-16]</sup>、PSR 框架模型法<sup>[17]</sup>、模糊数学法等。史晓霞等<sup>[18]</sup>运用逐次投影寻踪模型对马来西亚雪兰莪州的生态环境脆弱度进行评价研究。林积泉等<sup>[19]</sup>构建了小流域环境质量的综合评价指标体系。李智广等<sup>[20]</sup>对典型小流域治理综合效益评价的主要指标体系进行了分析和归类。而与生态清洁小流域“三区”功能评价相关的研究还较缺乏。同时急需结合当前研究与实践的重点,建立科学、可操作的生态清洁小流域评价指标体系,为不同类型小流域建立相应治理模式提供参考依据<sup>[21]</sup>。本文根据生态清洁小流域的基本理论及建设实践,并选择川南地区清溪谷典型生态清洁小流域建设的实际情况,拟采用模糊数学分析方法和层次分析法,从生态清洁小流域新要求的生态、生产、生活 3 方面进行分析,结合研究区调研和专家咨询,选取 24 个评价指标,构建符合该区特征的综合评价指标体系框架,对川南地区典型生态清洁小流域清溪谷小流域的生态清洁程度进行科学的评价研究,以期体现小流域生态环境在综合治理后的清洁现状和水平,有效指导山区各级生态清洁小流域建设工程实施方案的制定,同时为类似区域生态清洁小流域建设及其效果评价提供科学理论与数据支持。

## 1 研究内容与方法

### 1.1 研究区概况

清溪谷小流域位于四川省泸州市纳溪区西北大渡口镇中部,地理位置 105°14'20"—105°18'40"E,

28°40′40″—28°43′20″N, 距离纳溪城区 15 km。小流域面积 23.58 km<sup>2</sup>, 地势南高北低, 地形地貌属于丘陵地貌, 海拔在 264~480 m 之间, 相对高差 60~100 m, 流域内沟谷纵横, 狭窄, 箱形谷发育, 构造轴部丘顶多形成坪状高地, 轴部两侧呈紧凑排列的陡斜面丘。清溪谷小流域属亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 17.4 ℃, 年极端最高气温 40.2 ℃, 年极端最低气温 -1.2 ℃, 年日照时数 1 050.5 h, 无霜期 315 d。年平均降水量 1 300 mm, 降雨量集中在夏秋季的 5—9 月, 占全年降水量的 70%, 6—8 月是暴雨季节, 最大日降雨达 150 mm。植被覆盖率为 67.81%。小流域内主要粮食作物是水稻、玉米, 主要经济作物有茶、李子等。流域内的丘顶、部分丘坡有成片天然林, 主要为杂竹林。水土流失面积为 1.25 km<sup>2</sup>, 占土地总面积的 5.3%, 主要为水力侵蚀。近年来, 随着流域旅游产业的发展, 污水、垃圾污染较严重, 河道水质明显下降。部分地区由于植被破坏、径流改变, 土壤乃至地质结构受到影响, 存在潜在地质灾害。2016 年以来, 清溪谷小流域严格按照建设生态清洁型小流域的水土保持思路, 开展清洁小流域综合治理工作。目前, 该小流域水土流失综合治理程度在 85% 以上, 林草保存面积占宜林宜草面积的 80% 以上, 25° 以上的坡耕地全部退耕还林还草, 小流域内平均土壤侵蚀量控制在土壤容许流失量以下。

## 1.2 资料收集及指标数据获取

清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价采用的基础资料有 1:5 万地形图, 1:5 万土壤侵蚀强度图, 1:5 万植被覆盖图(2017 年), 1:10 万土地利用现状图(2017 年)。基础数据主要来源于实地调研和研究区域内长期监测数据。清溪谷典型小流域水土流失数据依据 2011 年全国第一次水利普查成果资料, 结合现场调查复核的方法确定, 土地利用结构及比例、人均水资源量、人口数量、人均农业产值、人均住房、第一和第三产业比值、人均旅游文化产值及人均纯收入等数据通过以流域为单位实地调研获取, 沟道水文形态、水质状况及土壤侵蚀等数据来自研究区内长期定位观测气象站和把口站。社会经济数据依据泸州市纳溪区 2017 年统计年鉴、已有文献资料、现场访谈调查和实地考察等形式获取, 并通过采样分析补充部分评价指标并验证指标信息的准确性。

## 1.3 评价指标体系的框架

生态清洁小流域评价指标体系应充分体现出小流域在水土流失综合治理后的清洁现状和水平, 指标可衡量研究区实施清洁小流域建设后的生产生活条

件和生态环境状况。生态清洁小流域建设评价指标体系的建立应遵循科学性、代表性、可操作性、适用性等原则<sup>[22]</sup>, 根据指标体系的遴选和建立方法以及清溪谷典型小流域的自然、社会和经济特征, 采用层次分析法构建生态经济评价指标体系的框架, 清溪谷小流域的生态经济指标体系分为 3 个层次(目标层、准则层、指标层), 包含 3 个子系统(生态区子系统、生产区子系统、生活区子系统)。剔除有关联的指标, 本研究初选可以反映典型小流域生态清洁度的要素指标 24 项作为小流域生态清洁度综合评价指标(表 1)。

表 1 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标类型
生态 清 洁 小 流 域 效 益 评 价 A	生态指标 B <sub>1</sub> (流域水系整治及 水土流失综合治理)	沟道水文形态 C <sub>1</sub>	上升型
		水质状况 C <sub>2</sub>	下降型
		沟道行洪能力 C <sub>3</sub>	上升型
		土壤侵蚀模数 C <sub>4</sub>	下降型
		土壤侵蚀面积比例 C <sub>5</sub>	下降型
		林业用地比例 C <sub>6</sub>	上升型
	生产指标 B <sub>2</sub> (生态农业)	农业用地比例 C <sub>7</sub>	上升型
		人均耕地面积 C <sub>8</sub>	上升型
		人均水资源量 C <sub>9</sub>	上升型
		自然资源人均产值 C <sub>10</sub>	上升型
		人均农业产值 C <sub>11</sub>	上升型
		人均旅游文化产值 C <sub>12</sub>	上升型
	生活指标 B <sub>3</sub> (人居环境整治)	第一和第三产业比值 C <sub>13</sub>	上升型
		农民人均纯收入 C <sub>14</sub>	上升型
		恩格尔系数 C <sub>15</sub>	下降型
		生活污水处理率 C <sub>16</sub>	上升型
		生活垃圾处理率 C <sub>17</sub>	上升型
		村庄绿化率 C <sub>18</sub>	上升型
		畜禽养殖污水处理率 C <sub>19</sub>	上升型
		化肥施用强度 C <sub>20</sub>	上升型
		农药施用强度 C <sub>21</sub>	上升型
		距流域出口 C <sub>22</sub>	下降型
		距最近河道 C <sub>23</sub>	下降型
		人均住房 C <sub>24</sub>	上升型

注: 表 1 中沟道水文形态指河流中支撑生物生存的水文及形态要素, 其对水体自然状态保持、生物群落的多样性等具有重要意义, 受人类活动的影响较显著<sup>[23]</sup>。沟道行洪能力指小流域内村庄不被淹没或者淹没损失较小的洪水重现期几年一遇。

## 1.4 评价方法

1.4.1 评价指标的归一化 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价首先是对评价指标进行归一化处理, 由于评价系统的具体指标具有不同的量纲和量纲单位, 为了解决模型参数的量纲统一问题, 需对具体指标的原始数据进行无量纲化处理。首先运用模糊集合理论引入隶属函数进行指标量化(无量纲标准化处理)。

对于效益型指标,有:  $y_{ij} = (x_{ij} / x_{jmax})^c \times 100\%$  (1)

对于成本型指标,有:  $y_{ij} = (x_{jmin} / x_{ij})^c \times 100\%$  (2)

式中:  $x_{jmax}$ ,  $x_{jmin}$ —— $I_j$  指标的最大值和最小值,系统运行最佳值。 $C$ ——刻画模糊度的常数,一般  $C > 1$ ,这里取 1.1(生态清洁小流域系统模糊度较低)。基于生态清洁小流域综合评价的调查,结合相关标准和专家意见确定清溪谷小流域各项评价指标的上、下限阈值。

1.4.2 评价指标权重的确定 评价过程的关键是评价指标权重的确定,评价指标权重的确定是对评价指标的重要性进行赋权,即对各评价指标在整个系统中的影响程度进行度量,以量化和区分其贡献大小。由于层次分析法确定多层次多要素的指标权重具有高度的逻辑性、系统性、简洁性和实用性等优点,涉及到的数据指标明确简单,可操作性较好<sup>[24]</sup>,且考虑生态清洁小流域评价的多层次性、多因素性,是一个定性定量相结合的评价系统,因此,本文采用层次分析法来确定评价指标的权重,并进行判断矩阵的一致性检验<sup>[25]</sup>。若 A 层次中因素  $A_k$  与下层次  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ … $B_n$  有联系,则判断矩阵如下:

$$P_{A(k)} = b_{ij} = \begin{Bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $b_{ij}$ ——判断矩阵  $P$  中的元素,表示对因素  $A_k$  而言,  $B_i$  与  $B_j$  相对重要性的数值。通过判断矩阵可以得出各评价指标对上一层因素的权重以及各要素对目标层的权重。

根据评价体系结构,选用能够较好解决复杂系统中多层次、多结构和单目标的层次分析法进行小流域生态清洁评价,提出小流域生态清洁指数( $C$ )的计算方法:

$$C = \sum_{i=1}^m A_i \sum_{j=1}^n B_j P_{ij} \quad (4)$$

式中:  $A_i$ ——子目标层内第  $i$  个子目标的权重;  $B_j$ ——某子目标层下第  $j$  个指标在该子目标层所占权重;  $P_{ij}$ ——子目标层内第  $i$  个子目标层下选取的第  $j$  个指标无量纲化后的分值;  $m$ ——子目标层内子目标的个数;  $n$ ——指标层内指标的个数。

1.4.3 划分标准 参考李浩宇等<sup>[26]</sup>对于流域生态健康指标评价标准的相关研究的划分标准,将生态清洁小流域评价结果分为 4 个等级:很清洁、清洁、较清洁、不清洁,并建立生态清洁小流域评价总得分与评价等级的对应关系为:  $> 0.85$  分,“很清洁”等级;  $0.85 \sim 0.75$  分,“清洁”等级;  $0.75 \sim 0.60$  分,“较清洁”等级;  $< 0.60$  分,“不清洁”等级(表 2)。

表 2 生态清洁小流域评价等级划分评价总得分

项目	等级划分评价得分			
	$> 0.85$	$0.85 \sim 0.75$	$0.75 \sim 0.6$	$< 0.6$
评价等级	很清洁	清洁	较清洁	不清洁

## 2 结果与分析

### 2.1 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价指标体系的权重

根据生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展要求,结合当地自然和经济社会条件禀赋,清溪谷生态清洁小流域划分为生态区、生产区、生活区。需根据“三区”功能,因地制宜实施了流域水系整治、水土流失综合治理、生态农业推广和人居环境整治。首先对统计数据 and 实地调查数据进行归一化无量纲处理。并运用模糊集合理论分别对效益型指标和成本型指标进行无量纲标准化处理量化。再通过建立指标决策矩阵,并计算指标层和准则层的权重系数(表 3)。

由表 3 可以看出,清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价中生产指标和生活指标权重明显高于生态指标,说明清溪谷典型小流域经过生态清洁治理后,生态环境显著改善,对该小流域的生态农业发展及人居环境整治还需加强。清溪谷典型小流域由于其独特的地质地貌及气候水文条件,较适合发展农业生态旅游及具有地方区域特色的特早茶种植,这对该生态清洁小流域的生态农业发展、农民增收及聚落环境改善具有较强的促进作用。清溪谷小流域的生态指标主要是针对流域水系整治及水土流失综合治理,其中沟道水文形态(指标权重为 0.045)、土壤侵蚀模数(指标权重为 0.045)和林业用地比例(指标权重为 0.047)3 个指标对生态环境的影响较大。生产指标主要是针对小流域的生态农业建设和发展提出的,其中人均旅游文化产值(指标权重为 0.051),第一和第三产业比值(指标权重为 0.055)及农民人均纯收入(指标权重为 0.054)3 个指标对该小流域生态农业产业发展影响较大。生活指标主要是指对小流域人居环境的整治。生活指标中影响较大的指标为生活垃圾处理率(指标权重为 0.048)、化肥施用强度(指标权重为 0.053)和农药施用强度(指标权重为 0.055)。从生态清洁小流域的评价指标框架及评价结果来看,生态指标(流域水系整治及水土流失综合治理)所占权重为 0.247,生产指标(生态农业)所占权重为 0.373,生活指标(人居环境整治)所占权重为 0.380。清溪谷生态清洁小流域建设的重点为生态农业建设和人居环境整治,即生产区和生活区建设为主。

表 3 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价指标权重

目标层	准则层	指标层	标准化值	指标权重	准则层权重
典型小流域生态清洁度综合评价	生态指标 (流域水系整治及水土流失综合治理)	沟道水文形态	0.78	0.045	0.247
		水质状况	0.73	0.042	
		沟道行洪能力	0.73	0.042	
		土壤侵蚀模数	0.77	0.045	
		土壤侵蚀面积比例	0.44	0.025	
		林业用地比例	0.81	0.047	
		农业用地比例	0.69	0.040	
		人均耕地面积	0.57	0.033	
		人均水资源量	0.08	0.005	
	生产指标 (生态农业)	自然资源人均产值	0.71	0.041	0.373
		人均农业产值	0.74	0.043	
		人均旅游文化产值	0.88	0.051	
		第一和第三产业比值	0.96	0.055	
		农民人均纯收入	0.92	0.054	
		恩格尔系数	0.89	0.052	
		生活污水处理率	0.78	0.045	
		生活垃圾处理率	0.84	0.048	
		村庄绿化率	0.66	0.038	
	生活指标 (人居环境整治)	畜禽养殖污水处理率	0.78	0.045	0.380
		化肥施用强度	0.91	0.053	
		农药施用强度	0.96	0.055	
		距流域出口	0.50	0.029	
		距最近河道	0.48	0.028	
		人均住房	0.66	0.038	

## 2.2 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价与等级划分

对清溪谷典型小流域生态清洁度系统进行综合评价与等级划分时,运用模糊数学理论和层次分析法,将评价总指数的范围划分成若干连续区间,每一区间代表一个评价等级,每个区间代表一种流域发展状况,形成连续的等级阶梯。同时,参考李浩宇等<sup>[26]</sup>对流域生态健康指标评价标准的相关研究的划分标准,本研究运用多目标分级评价方法,得出清溪谷生态清

洁小流域生态指标层得分为 0.732,生产指标层得分为 0.807,生活指标层得分为 0.764,小流域综合评价总得分为 0.772(表 4)。

由表 4 可知,该小流域系统已达到“清洁”等级,系统处于良性、协调、稳定发展状态。通过清洁型小流域治理,改善了当地农业生产条件、完善产业结构调整,有效控制了面源污染,提供了洁净的水源、优美的生态和人居环境,促进了流域水土资源、生态环境和经济社会的可持续发展。

表 4 清溪谷典型小流域生态清洁度综合评价及等级

目标层	子目标层	准则层	评价得分	评价总得分	清洁等级
清溪谷生态清洁小流域	生态区	流域水系整治及水土流失综合治理	0.732	0.772	清洁
	生产区	生态农业	0.807		
	生活区	人居环境整治	0.764		

## 3 讨论与结论

本研究基于清溪谷典型小流域的自然、社会和经济特征,采用模糊数学法和层次分析法构建生态清洁评价指标体系的框架,将清溪谷生态清洁小流域的综合评价指标体系分为 3 个层次,即目标层、准则层、指

标层,包含生态区、生产区、生活区 3 个子系统,剔除关联度较高的指标,本研究初选沟道水文形态、农业用地比例、生活污水处理率等 24 项作为清溪谷小流域生态清洁度综合评价的指标因子。

通过开展清溪谷清洁小流域的各项综合治理,使得该小流域的土壤侵蚀面积减少,部分水土流失区域

转化成了农业用地或经济林用地,小流域水质状况由治理之前的Ⅳ类水质提升为Ⅲ类水质。近几年来,清溪谷生态清洁小流域的生态旅游观光业、特早生态有机茶园建设、特色农家乐等不断发展,带动了流域系统人均旅游文化产值的提高,一定程度上增加了农民收入。在人居环境整治方面,主要从农村生活污水处理率、生活垃圾处理率的提高和农业化肥、农药使用强度的减少为主要抓手,进行清洁小流域生活区的建设和改善,从而提高整个清洁小流域的建设效果。从研究结果来看,清溪谷生态清洁小流域建设以生态区、生产区、生活区“三区”建设为核心。因地制宜实施流域水系整治、水土流失综合治理、生态农业推广和人居环境整治,从生态清洁小流域的评价指标框架及评价结果来看,流域水系整治及水土流失综合治理的生态指标所占权重为 0.247,生态指标层得分为 0.732,生产指标所占权重为 0.373,生产指标层得分为 0.807,人居环境整治所占权重为 0.380,生活指标层得分为 0.764,该生态清洁小流域建设的重点为生态农业建设和人居环境整治,即生产区和生活区建设为主。再运用多目标分级评价方法得出清溪谷典型小流域生态清洁度的综合评价总指数分值为 0.772,说明清溪谷典型小流域生态清洁系统已达到“清洁”等级,小流域系统处于良性、协调、稳定的发展状态。

本研究运用模糊数学法和层次分析法不仅避免了人为制定权重的主观性,评价理论清晰,评价方法简捷,可操作性强,也反映了生态清洁小流域在建设前后的突变特征。但本研究中仍存在一些不足。如本研究在各指标的选取过程中不可避免的受到人为主观因素的影响,各指标间的相对重要性可能会随着生态清洁小流域在治理和发展而变化。同时,当前生态清洁小流域建设中还存在前期的调查和监测较少或缺失等问题。且随着生态清洁小流域建设工作不断推进,如何系统地开展监测以及准确地评价生态清洁小流域建设效果,仍是摆在水土保持管理者和建设者面前的一个难题<sup>[27]</sup>。需要在今后的工作中,将评价体系不断运用于实践,根据分析评价效果与实际效果的契合度进行不断修正,使评价结果更加客观和准确,使评价体系更趋完善和科学,为类似小流域或区域生态清洁综合治理提供理论依据和数据支持。

#### [参 考 文 献]

- [1] 祁生林. 生态清洁小流域建设理论及实践[D]. 北京:北京林业大学,2006:3-16.
- [2] Chen L D, Tian H Y, Fu B J, et al. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale[J]. Chinese Geographical Science, 2009,19(1):37-45.
- [3] 胡元林. 高原湖泊流域可持续发展理论及评价模型研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
- [4] 朱显谟. 抢救“土壤水库”实为黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键:四论黄土高原国土整治 28 字方略[J]. 水土保持学报,2000,14(1):1-6.
- [5] 王振华,李青云,黄苗,等. 生态清洁小流域建设研究现状及展望[J]. 人民长江,2011,42(2):115-118.
- [6] 谢磊,武晓峰,段淑怀. 北京市山区小流域生态清洁程度评价指标体系研究[J]. 中国水土保持,2012(10):1-2,35.
- [7] 蒲朝勇,高媛. 生态清洁小流域建设现状与展望[J]. 中国水土保持,2015(6):7-10.
- [8] 段巧甫. 小流域综合治理开发是加快生态环境建设的有效途径[J]. 中国水土保持,2000(6):13-15.
- [9] 杨进怀,吴敬东,祁生林,等. 北京市生态清洁小流域建设技术措施研究[J]. 中国水土保持科学,2007,5(4):18-21.
- [10] 马丰丰,田育新,罗佳,等. 生态清洁小流域评价指标体系的构建[J]. 湖南林业科技,2010,37(3):82-84.
- [11] 戴全厚,刘国彬,刘明义,等. 小流域生态经济系统可持续发展评价[J]. 地理学报,2005,60(2):209-218.
- [12] 王冬梅,李永贵,蒋文琼,等. 北京山区小流域经济发展的影响因素分析:以石匣小流域为例[J]. 北京林业大学学报,2002,24(1):53-58.
- [13] Jiang Lijun, Miao Honghong, Ouyang Zhiyun. An investigation of factors that influence the effects of management of protected areas[J]. Acta ecologica sinica, 2006,26(11):3776-3781.
- [14] Li Ainong, Wang Angsheng, Liang Shunling. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of mingjiang River, China[J]. Ecological Modeling, 2006,192(1):175-187.
- [15] Shim J P. Bibliographical research on the analytic hierarchy process[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1989,23(3):161-167.
- [16] Song Guoba, Chen Yu, Tian Meirong. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain region of China based on GIS and AHP method[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):465-475.
- [17] 左伟,王桥,王文杰,等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究,2002,18(1):67-71.
- [18] 史晓霞,李京,刘家福. 马来西亚雪兰莪州生态环境脆弱度评价—基于逐次投影寻踪模型的研究[J]. 灾害学报,2008,17(6):129-133.
- [19] 林积泉,王伯铎,马俊杰,等. 小流域治理环境质量综合评价指标体系研究[J]. 水土保持研究,2005,12(1):69-71.

缓冲区选用有一定的耐淹能力,又有一定耐旱能力的植物品种,蓄水区种植耐淹能力较强和抗污染能力较好的植物品种。雨水花园作为有效的雨水收集和净化系统,AHP层次分析法在权重赋值,植物综合得分方面具有一定的主观性和片面性,如植物的纳污吸污能力在实践中应结合应用目标综合考虑。因此,在后续的研究中,应加强雨水花园植物跟踪调查、植物生理生态学实验、湿地生态系统中野生乡土植物的筛选,为豫北乃至中原地区雨水花园植物的选择和海绵城市建设提供理论支撑。

#### [参 考 文 献]

- [1] 福州市城乡建设委员会. 海绵城市——低影响开发雨水系统构建[EB/OL]. (2015-01-08)[2017-11-17]http://www.fzjw.gov.cn/cms/siteresource/.
- [2] 安阳市海绵城市建设项目设计导则:低影响开发雨水系统构建(试行)[S]. 安阳市住房和城乡建设局,2016.
- [3] Steiner L M, Robert D W. Rain Gardens: Sustainable Landscaping for a Beautiful Yard & a Healthy World [M]. Canada: Voyageur Press Inc, 2012.
- [4] Woelfle-Erskine C. Capturing the Rain for Your Own Water-efficient Garden [M]. Sweden: Timber Press, 2012.
- [5] Kraus H, Spafford A. Rain Gardening in the South: Ecologically Designed Gardens for Drought, Deluge and Everything in Between[M]. USA: John F Blair Publisher, 2013.
- [6] 万映伶,王美仙. 国内外雨水花园研究综述[J]. 建筑与文化,2015(7):127-129.
- [7] 蔡妍,董丽. 基于 AHP 的北京地区雨水花园植物选择研究[M]//张启翔. 中国观赏园艺研究进展,北京:中国林业出版社,2016.
- [8] 熊盼,陈榕,姜帅,等. 张家界市园林地被植物景观质量评价与应用研究[J]. 水土保持通报,2018,38(5):307-312.
- [9] 刘翠英,贺学林,张雄. 毛乌素沙地可用于园林绿化的植物资源及开发利用[J]. 水土保持通报,2006,26(4):91-95.
- [10] 邵春丽,翁殊斐,赵宝玉. 基于 AHP 法的滨水绿道植物景观评价体系构建[J]. 西北林学院学报,2013,28(3):206-209.
- [11] 刘斯荣,刘春丽. 雨水花园中植物的选择与设计[J]. 湖北工业大学学报,2016,31(3):113-116.
- [12] 李效文,贾黎明,郝小飞,等. 森林景观 SBE 评价方法[J]. 中国城市林业,2007,5(3):33-36.
- [13] 陈翠玉,杨善云,严莉,等. 基于 AHP 的柳州市居住区植物景观评价体系构建[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(6):134-140.
- [14] 宁惠娟,邵峰,孙茜茜,等. 基于 AHP 法的杭州花港观鱼公园植物景观评价[J]. 浙江农业学报,2011,23(4):717-724.
- [15] 王佳,王思思,车伍,等. 雨水花园植物的选择与设计[J]. 北方园艺,2012(19):77-81.
- [20] 李智广,李锐,杨勤科,等. 小流域治理综合效益评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,1998,18(7):71-75.
- [21] 王春玲,李世明,王久丽. 小流域综合治理效益评价管理信息系统的研究与应用[J]. 北京林业大学学报,2001,23(2):53-56.
- [22] 邵强,李友俊,田庆旺. 综合评价指标体系构建方法[J]. 大庆石油学院学报,2004,28(3):74-76.
- [23] Boon P J, Holmes N T, Raven P J. Developing standard approaches for recording and assessing river hydro-morphology: The role of the European Committee for Standardization (CEN) [J]. Aquatic Conservation, Marine and Freshwater Ecosystems, 2010,20(S1):55-61.
- [24] 倪晋仁,李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报,2001,56(5):611-621.
- [25] 王继军,郑科,郑世清,等. 中尺度生态农业建设效益评价指标体系研究[J]. 水土保持研究,2000,7(3):219-247.
- [26] 李浩宇,周利军,李凯. 流域生态健康指标评价标准研究[J]. 产业与科技论坛,2015,14(15):125-127.
- [27] 常国梁. 北京市生态清洁小流域治理措施布局研究[J]. 北京水务,2012(4):64-67.

(上接第 119 页)