

红壤区小流域治理度的概念与评价方法^①

苏春丽^{1,2}, 梁 音^{1*}, 李德成¹, 孙 昕³

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 从水土保持、社会经济发展和生态服务功能等 3 个方面入手, 厘定了“小流域治理度”的概念, 结合小流域综合治理目的, 在专家意见和参考文献的基础上建立了一套小流域治理度的评价指标体系与方法, 并在江西省兴国县选择了塘背小流域进行计算验证。结果表明: 评价小流域治理度的 3 大类 19 项指标能反映小流域综合治理情况, 采用的层次分析法简单实用。塘背小流域经过多年治理恢复, 其治理度由治理前的 0.252 提高到 0.683, 提高了 0.431, 增加了 1.71 倍。

关键词: 小流域治理度; 层次分析法; 塘背小流域

中图分类号: S157

从 20 世纪 80 年代开始, 我国大规模地开展以小流域为单元的综合治理工作, 到 20 世纪末, 全国已开展治理小流域 1 万余条^[1], 但如何评价小流域治理程度? 对于一个小流域来讲综合治理处在何种状态? 到底还需不需要治理? 又还需要多大的治理投入? 等等这些问题, 目前还缺少一套完整的评价指标体系与方法。为此本文引入了小流域治理度的概念, 并建立了一套小流域治理状况评价指标体系与方法, 用以指导我国以小流域为单元的水土保持工作。国际上对于水土流失治理的评价, 其评价方法和指标体系是多种多样的。Sutherland^[2]通过水土流失模拟试验获取侵蚀速率、泥沙产出及植被覆盖等数据表征滑坡侵蚀治理状况; Jayanath 和 Gamini^[3]从社会经济角度对发展中国家水土流失进行评估, 指出人口、政策及农民收入对水土流失治理影响较大; Ferko 等^[4]对马里南部沟蚀治理情况水土流失控制措施进行评价时指出假设重建侵蚀治理基点及运用时间序列是有用的工具。而我国以小流域为单元的综合治理评价, 由于地域差异大, 评价方法和指标体系目前没有统一的规定。目前对于小流域治理评价主要集中在两方面, 一方面是基于水土流失的影响因素运用 USEL 或 RUSLE、SWAT 等模型进行评价; 另一方面是基于生态效益、社会效益和经济效益为主的水土保持效益评价, 这两方面的研究理论与方法日趋成熟, 但这些评价只表征了小流域某一

方面的治理情况, 并不能表征小流域综合治理的状态。因此, 本文尝试用一个综合的指标来表征小流域综合治理状态水平。

《水土保持技术监测指标体系》(SL277-2002) 将“在实施综合治理的区域(流域)内, 完成各项治理措施的面积占区域(流域)内水土流失面积的百分率”称为治理程度, 简称治理度。水土保持术语(GBT20465-2006)中表述为“水土流失治理程度(errosion control ratio)为在某一区域内, 水土流失治理面积占原有水土流失面积的百分比”, 这里对于“治理度”的含义, 实际上都是“面积比”的概念, 治理率的意思, 显然不能全面表征小流域综合治理水平。实际调查发现, 许多小流域水土流失治理率已达到了 100%, 有的已经超过了 100%, 这都是很正常的事, 因为治理之后有一个恢复过程, 恢复的过程中依然存在水土流失现象, 也许水土流失的强度有所减缓, 但还算水土流失面积, 还需要进一步治理, 因此单位面积内治理面积占水土流失面积的比率, 并不能全面反映小流域治理恢复状况。比如: 兴国县水土流失治理面积已远远超过了水土流失总面积, 但是小流域综合治理现状是怎样的状态呢? 目前还不清楚。为此, 本文在厘定小流域治理度概念的基础上, 建立小流域治理度的评价指标体系与方法, 以塘背小流域为例, 研究探索小流域治理度的问题。为我国小流域水土流失

^①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407206)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-438)和国家自然科学基金项目(40971163)资助。

* 通讯作者 (yliang@issas.ac.cn)

作者简介: 苏春丽(1984—), 女, 陕西汉中人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: suchunlibl@163.com

治理规划、投资预算等提供理论依据，并考虑了可持续发展理论，有利于提高小流域综合治理与开发水平^[5]，为综合治理投资决策和管理规范化提供科学依据。

1 评价指标体系与方法

1.1 “小流域治理度”的概念

小流域治理度是用来表征小流域内水土保持生态恢复和经济可持续发展程度的综合数值。在小流域治理过程中，由于有方向性的人为活动干预，使小流域结构（山、水、田、林、路）与功能（生态、经济和社会）发生了改变，如何用一个综合数值来表征这种变化？特引入小流域治理度的概念。具体来说，用小流域内土壤侵蚀强度与数量、水土保持措施、生态服务功能、经济可持续发展水平等指标，以小流域水土保持生态恢复和经济可持续发展为目标，进行数值处理得到一个综合数值，将此数值定义为小流域治理度，用 P 表示，其值介于 0~1 之间。 P 值越大说明小流域内生态服务功能越好、经济可持续性越高； P 值越小，说明流域内水土流失越严重，生态环境脆弱，需要进一步治理与恢复。

1.2 指标体系建立的原则

评价指标体系应在时间上反映小流域治理的速度和趋势，在空间上反映小流域生态经济系统的整体布局和结构，在数量上反映治理的规模，在层次上反映小流域系统的功能和水平。指标筛选及指标体系的建立要达到两个目的：①能全面充分地反映小流域治理状况；②指标概念明确，指标数量尽可能少，便于获取。小流域治理评价应遵循如下主导原则：

(1) 目的性和政策导向性。要符合国家、社会对小流域治理的要求。指标体系要紧紧围绕水土保持功能及服务价值评价进行设计，并由代表社会、经济、环境等组成部分的典型指标构成，多方位、多角度地反映水土保持的环境影响和响应；要体现我国小流域治理的方针政策，全面贯彻落实《中华人民共和国水土保持法》和全国第五次水土保持工作会议精神，总结我国小流域治理经验和存在问题，通过评价，确定小流域治理现状，确定今后治理方向。

(2) 科学性和可操作性。评价指标与评价方法应符合生态学、经济学原理以及农、林、牧、水保等有关学科的基本原理与概念，并尽可能地应用现代手段予以权衡和定量表达。指标要概念明确、定义清楚，方便数据采集和资料收集，要考虑现行科技水平，并利于水土保持工作的高效开展。

(3) 系统性。指标体系要包括水土保持功能所涉及到的众多方面，使其成为一个系统，指标体系要形成阶层性的功能群，层次之间要相互适应并具有一致性，要具有与其相适应的导向作用，即每项上层指标都要有相应的下层指标与其相适应。不仅要注意指标体系整体的内在联系，而且要注意整体的功能和目标，要能全面地反映小流域治理状况。

(4) 简明突出和普适可比性。指标选择要尽可能全面，但应该区别主次、轻重，要突出水土保持效应的重要问题和问题的主要方面，尽量选择各个区域都可适用的指标，使指标既能反映实际情况，又便于比较优劣。

1.3 指标体系建立

本文以小流域内土壤侵蚀现状，水土保持措施落实情况以及社会经济、生态功能等为内容，以符合国家相关标准为前提，查阅相关文献、咨询有关专家，参考 2006 年水利部水土保持监测中心^[6]制定的《水土保持监测技术指标体系》，在实地考察的基础上，确定了 3 大类 19 个指标，构建小流域治理度评价指标体系（表 1）。

1.4 单项指标的获取方法

根据已有的研究及国家标准的计算方法，结合研究的需要，各单项指标数据获取方法如下^[6-8]：

(1) 水土流失治理率 C_1 (%)。小流域内已治理的面积与产生水土流失面积的比值。小流域内已治理面积即实施水土保持措施的面积，包括造林地、种草地、基本农田及截水沟拦截等面积之和。

$$\text{水土流失治理率} = \frac{\text{已治理面积}}{\text{水土流失面积}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 土壤侵蚀综合指数 C_2 (无量纲)。小流域内各级土壤侵蚀面积和土地总面积量化分级，进行权重变换后形成的一个综合指标数值^[9]，其表达式为：

$$EI = \sum_{i=1}^n (W_i A_i) / S \quad (2)$$

式中， EI 为评价单元土壤侵蚀综合指数； W_i 为评价单元土壤侵蚀等级权重分值； A_i 为评价单元第 i 等级侵蚀的面积； S 为评价单元的土地总面积； $n = 5$ ； i 为土壤侵蚀等级数，其取值范围为 1~5 之间的整数。

(3) 土地利用结构特征指数 C_3 (无量纲)。根据已有研究，在其他因素不变的情况下，不同土地利用类型的土壤侵蚀特征具有明显的差异^[10]，基于土壤侵蚀与土地利用关系，倪晋仁等^[11]运用层次分析法按土地利用类型对水土保持的有利程度确定其相应的权

表 1 小流域治理度评价指标体系及其含义

Table 1 Assessing index system and concept of watershed management and recovery degree

目标层	准则层	指标层	指标含义
小流域治理度 P	水土保持状态 B_1	水土流失治理率 C_1	表征小流域内水土流失治理状况
		土壤侵蚀综合指数 C_2	反映小流域内土壤侵蚀状况
		土地利用结构特征指数 C_3	反映土地利用对水土流失影响
		林草措施系数 C_4	反映林草措施实施情况
		工程措施系数 C_5	反映工程措施实施情况
	社会经济指数 B_2	人均产粮 C_6	表征人均占有耕地的比重, 以及潜在的开垦与退耕能力
		人均年收入 C_7	表征农民自发治理水土流失的能力大小
		恩格尔系数 C_8	反映小流域内农民的富裕程度, 影响到水土流失治理的可能性
		劳动生产率 C_9	反映小流域内耕地的产出能力
		人口密度 C_{10}	表示小流域内人为活动的强弱
生态功能指数 B_3	生态功能指数 B_3	流域形状系数 C_{11}	影响侵蚀的强度和空间分布
		年输沙模数 C_{12}	反映小流域产沙与输沙情况
		年径流系数 C_{13}	既是影响水土流失的动力因素, 又是水土保持蓄水效益的体现
	生态功能指数 B_3	生态系统抗逆力 C_{14}	反映小流域内生态系统抵御自然灾害的能力大小
		平均坡度 C_{15}	表征小流域内地形对径流冲刷能力的改变
		平均有效土层厚度 C_{16}	影响作物生长态势与抗侵蚀年限
		土壤有机质平均含量 C_{17}	表征小流域内土壤的肥力大小和土壤抗蚀抗冲的性能
		生物多样性指数 C_{18}	反映小流域生态系统的稳定性
		林下枯枝落叶层厚度 C_{19}	影响侵蚀打击力和径流冲刷能力

重。建立了土地利用结构特征指数 SI 来表征土壤侵蚀的相对大小, 其表达式为:

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i a_i}{A} \times 100 \quad (3)$$

式中, SI 为土地利用结构特征指数, w_i 为第 i 类土地利用类型的重要性权重, a_i 为第 i 类土地利用类型的面积, A 为小流域总面积。

(4) 林草措施系数 C_4 (无量纲)。小流域内郁闭度或者盖度在 0.3 以上的林草措施保存面积与林草措施实施面积之比值。

林草措施系数 = 林草措施保存面积(郁闭度或覆盖度 ≥ 0.3) / 林草措施实施面积 (4)

(5) 工程措施系数 C_5 (无量纲)。小流域内工程措施(截水沟、蓄水池、塘坝、梯田及谷坊等)保存面积(或座数)与其对应设计面积(或座数)比值, 再乘以其合格率。工程措施合格情况综合执行水土保持综合治理验收规范(GBT 15773—1995), 各项措施验收质量要求及水土保持监测技术指标体系(SL 227—2002)单项治理措施质量合格标准进行测定。合格率用根据标准测得的合格量除以设计工程措施面积。

$$\text{工程措施系数} = \text{工程措施保存面积}/\text{工程措施面积} \times \text{合格率} \quad (5)$$

(6) 人均产粮 C_6 (kg/人)。小流域内粮食总产量与农业人口数的比值。粮食总产量, 禾谷类与豆类粮食以实物产量计算, 薯类以实物除以 5 折算。

$$\text{人均产粮} = \text{粮食总产量}/\text{农业人口} \quad (6)$$

(7) 人均年收入 C_7 (元/人)。指小流域内一定时期内的纯收益与该时期流域人口数的比值。

$$\text{人均年收入} = \text{年总收入}/\text{总人口数} \quad (7)$$

(8) 恩格尔系数 C_8 (%)。是指食品支出总额占个人消费支出总额的比值。简单地说, 一个家庭的恩格尔系数越小, 这个家庭生活就越好; 反之, 这个家庭越贫困。

$$\text{恩格尔系数} = \text{食物消费支出}/\text{总消费支出} \times 100\% \quad (8)$$

(9) 劳动生产率 C_9 (kg/劳动日)。是指劳动者在一定时期内创造的劳动成果与其相适应的劳动消耗量的比值。在小流域内用耕地单产与单位耕地用工日的比值来表示。

$$\text{劳动生产率} = \text{单位产量}/\text{单位耕地用工} \quad (9)$$

(10) 人口密度 C_{10} (人/km²)。指小流域内单位面积的人口数量。

$$\text{人口密度} = \text{人口总数}/\text{小流域面积} \quad (10)$$

(11) 流域形状指数 C_{11} (无量纲)。是小流域同面积圆的周长与小流域分水线的实际长度之比。小流域形状与圆的形状相差越大, 小流域形状系数越小, 小流域形状越狭长, 径流变化越平缓。小流域形状系数值接近于 1 时, 说明小流域的形状接近于圆形, 这样的流域易造成大的洪水。

$$\text{流域形状指数} = \text{小流域同面积圆的周长}/\text{小流域分水线的实际长度} \quad (11)$$

(12) 年输沙模数 C_{12} ($t/(km^2 \cdot a)$)。是指被径流挟带输出测验断面的干泥沙量(质量), 即输沙量。通过卡口站测得。

$$\text{年输沙模数} = \text{年输沙量}/\text{小流域面积} \quad (12)$$

(13) 年径流系数 C_{13} (无量纲)。是指一定汇水面积内任意时段内的径流深度(mm)与同时段内的降水深度(mm)的比值。

$$\text{径流系数} = \text{径流深度}/\text{降水深度} \quad (13)$$

(14) 生态系统抗逆力 C_{14} (无量纲)。小流域生态经济系统在灾害年份的产值与正常年份产值之比。

$$R_a = \frac{\sum |F_i - F|}{NF} \quad (14)$$

式中, R_a 为系统评价期间的平均抗逆能力(%); F_i 为某灾害年系统的功能水平(产值); F 为评价期间各年系统功能平均值; N 为评价期间的年数。

(15) 平均坡度 C_{15} (%). 指小流域内各级坡度面积大小所占的百分比例。一般将坡度分为若干级^[6], 然后量算各级坡面所占的面积。

$$\text{平均坡度} = \sum (\text{各级坡度均值} \times \text{该级坡度面积比重}) \quad (15)$$

(16) 平均有效土层厚度 C_{16} (cm)。有效土层厚度是指作物生长发育所必需的土层厚度。在耕地中开挖 5 个土壤剖面, 实际测量后取平均值确定。

(17) 土壤有机质平均含量 C_{17} (g/kg)。根据水土保持工作需要, 测定表层(耕作层) 0~25 cm 厚的有机质含量, 测定有机质含量的常用方法是重铬酸钾-硫酸氧化法, 具体操作步骤按《土壤理化性质分析测验》进行。在水田、水体及居民地以外的土地利用类型上用土钻各取 5 份样, 测其有机质含量, 平均后得每类土地利用的有机质含量 SOM , 经面积加权后最终得到小流域内土壤有机质平均含量。

$$\overline{SOM} = \frac{\sum_{i=1}^n SOM_i \times a_i}{A} \times 10 \quad (16)$$

式中, \overline{SOM} 为小流域平均有机质含量(g/kg); SOM_i

为第 i 类土地利用类型的有机质含量(%); a_i 为第 i 类土地利用类型面积(km^2); A 为小流域总面积(km^2)。

(18) 生物多样性指数 C_{18} (无量纲)。本指标是指小流域综合治理带来生物种群数量增加, 通过实测小流域内均匀分布的多个样区动植物数量进行统计计算。用生物多样性指数中常用的物种多样性指数 Shannon-Wiener 指数^[12]来表征。

$$H' = -\sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{n} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{n} \right) \quad (17)$$

式中, H' 为物种多样性指数; s 为样品中的种类数; n_i 为样品中第 i 种生物的个体数; n 为样品中生物总个体数。

(19) 林下枯枝落叶层厚度 C_{19} (cm)。按照森林类型设计的小样方, 面积为 1 m × 1 m, 样方的数量视森林类型的面积而定, 必须满足数理统计学的样本要求, 最终取其面积加权平均。在每个样方内, 测定枯枝落叶层的厚度取其平均值。

1.5 权重确定

确定各层次指标因子权重的方法有 Delphi 法、层次分析法(AHP, analytical hierarchy process)、统计方法(方差倒数、变异系数或复相关系数)等, 本文采用较为常用 AHP 法来确定各层次指标的权重。

层次分析法基本原理是对 n 个评价指标关于某个评价目标的重要程度做两两比较, 获得判断矩阵 A , 再求 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}(A) = m$ 对应的特征向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$, 并将其归一化即得到评价指标的权重值。指标 x_i 与 x_j 关于某个评价目标的相对重要性程度之比的赋值参考 1~3 比例标度法(表 2)确定, 由多个专家分别给出判断矩阵, 最后取平均值(表 3、4)。经过对指标体系各层次指标因子的两两比较, 得到各指标因子重要性的判断矩阵。对各矩阵进行一致性检验, 其一致性比率 $CR = \text{一致性指标}(CI)/\text{随机一致性指标}(RI)$, 均小于 0.1, 即通过一致性检验, 按照上述方法求出各指标因子的权重(表 5)。

1.6 评价指标值标准化

本文利用指标质量离散刻度对各指标进行标准化。指标质量离散刻度是结合国家、地方标准或者比较公认量化值基础上, 再根据调查资料、专家咨询和专项研究资料, 确定指标标准化分级界限, 各指标各级标准以分值的形式在 0~1 之间划分为 5 个区间(表 6), 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, 其余评分据此内插推算。各项指标值经过量化后都是正值, 指标值越大, 效用越大。

表 2 比例标度 1~3 参考表

Table 2 Definition of 1~3 proportional scaling

标度 a_{ij}	说明
1	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 具有同样重要性
3/2	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比 x_j 稍微重要
2	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比 x_j 明显重要
5/2	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比 x_j 强烈重要
3	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比 x_j 极端重要
倒数	若指标 x_i 与 x_j 比较, 判断矩阵值为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 3 小流域治理度准则层重要性判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of index significance at rule hierarchy

因子	水土保持状态 B_1	社会经济指数 B_2	生态功能指数 B_3
水土保持状态 B_1	1	2	2
社会经济指数 B_2	1/2	1	1/2
生态功能指数 B_3	1/2	2	1

表 4 小流域治理度指标层因子重要性判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of factor significance at index hierarchy

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}
C_1	1	2	1	2	2														
C_2	1/2	1	1/2	1	1														
C_3	1	2	1	2	2														
C_4	1/2	1	1/2	1	1														
C_5	1/2	1	1	1/2	1														
C_6				1	1/2	2/3	1/2	1											
C_7					2	1	3/2	1	2										
C_8						3/2	2/3	1	2/3	3/2									
C_9							2	1	3/2	1	2								
C_{10}								1	1/2	2/3	1/2	1	2/3	1	1/2	1/2	1/2	2/3	
C_{11}									1	3/2	1/2	1	2/3	1	1/2	1/2	1/2	2/3	
C_{12}										2/3	1	2/3	3/2	1	3/2	2/3	2/3	1	
C_{13}										2	3/2	1	2	3/2	2	1	1	3/2	
C_{14}											1	2/3	1/2	1	2/3	1	1/2	1/2	2/3
C_{15}											3/2	1	2/3	3/2	1	2/3	2/3	2/3	1
C_{16}												1	2/3	1/2	1	3/2	1/2	1/2	2/3
C_{17}												2	3/2	1	2	3/2	2	1	3/2
C_{18}													2	3/2	1	2	3/2	1	3/2
C_{19}														3/2	1	2/3	3/2	2/3	1

表5 小流域治理度各因子权重

Table 5 Weight of factor significance at index hierarchy

目标层	准则层	W_{Bi}	指标层	W_{Ci}	W_i
小流域治理度 P	水土保持状态	0.493	水土流失治理率 C_1	0.282	0.139
	B_1		土壤侵蚀综合指数 C_2	0.141	0.070
			土地利用结构特征指数 C_3	0.281	0.138
			林草措施系数 C_4	0.141	0.070
			工程措施系数 C_5	0.155	0.076
社会经济指数	0.196		人均产粮 C_6	0.124	0.024
	B_2		人均年收入 C_7	0.256	0.050
			恩格尔系数 C_8	0.239	0.047
			劳动生产率 C_9	0.256	0.050
			人口密度 C_{10}	0.125	0.025
生态功能指数	0.311		流域形状系数 C_{11}	0.083	0.026
	B_3		年输沙模数 C_{12}	0.106	0.033
			年径流系数 C_{13}	0.152	0.047
			生态系统抗逆力 C_{14}	0.074	0.023
			平均坡度 C_{15}	0.098	0.031
			平均有效土层厚度 C_{16}	0.077	0.024
			土壤有机质平均含量 C_{17}	0.152	0.047
			生物多样性指数 C_{18}	0.152	0.047
			林下枯枝落叶层厚度 C_{19}	0.106	0.033

表6 小流域治理度指标标准化分级

Table 6 Indicator standardized classification of watershed management and recovery degree

指标层	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
水土流失治理率 C_1	<20	20~40	40~60	60~80	>80
土壤侵蚀综合指数 C_2	>61.49	61.49~34.76	34.76~20.05	20.05~8.02	<8.02
土地利用结构特征指数 C_3	<3.9	3.9~9.4	9.4~14.9	14.9~22.4	>22.4
林草措施系数 C_4	<0.3	0.3~0.45	0.45~0.6	0.6~0.75	>0.75
工程措施系数 C_5	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
人均产粮 C_6	<100	100~300	300~500	500~700	>700
人均年收入 C_7	<1500	1500~3500	3500~5500	5500~7500	>7500
恩格尔系数 C_8	>60	60~50	50~40	40~30	<30
劳动生产率 C_9	<10	10~30	30~50	50~70	>70
人口密度 C_{10}	>500	500~300	300~100	100~50	<50
流域形状系数 C_{11}	>0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2
年输沙模数 C_{12}	>8000	8000~5000	5000~2500	2500~500	<500
年径流系数 C_{13}	>0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	0.3~0.1	<0.1
生态系统抗逆力 C_{14}	<20	20~40	40~60	60~80	>80
平均坡度 C_{15}	>55	55~35	35~25	25~15	<15
平均有效土层厚度 C_{16}	<10	10~30	30~50	50~70	>70
土壤有机质平均含量 C_{17}	<10	10~20	20~30	30~40	>40
生物多样性指数 C_{18}	<0.5	0.5~1	1~2	2~3	>3
林下枯枝落叶层厚度 C_{19}	<0.5	0.5~1	1~2	2~3	>3

水土流失治理率 C_1 、工程措施系数 C_5 和生态系统抗逆力 C_{14} 其值本身为 0~1 之间的数, 且随着值增大, 效用越大, 直接将其值划分为对应 5 区间。流域形状指数 C_{11} 为 0~1 之间的数, 但其值越小越好, 反向划分为 5 个对应区间。

林草措施系数 C_4 根据植被覆盖分级界限^[13]来划分等级。土壤侵蚀综合指数 C_2 用侵蚀强度权重分级界限来划分等级。土地利用结构特征指数 C_3 用其相对应不同土地利用的权重值作为分级界限。恩格尔系数 C_8 以联合国划分贫富标准最富裕、富裕、小康水平、温饱及绝对贫困 5 级来划分对应标准^[8]。年输沙模数 C_{12} 参照土壤侵蚀强度分级标准^[14]结合实际相应调整确定分级界限。土壤有机质平均含量 C_{17} 根据土壤养分有机质分级标准确定分级界限。生物多样性指数 C_{18} 根据生物环境评价及分级方法中 Shannon-Wiener 指数分级评价标准结合调查咨询及评价需要确定分级标准。流域平均坡度 C_{15} 根据坡度分级进行界限确定。

人均产粮 C_6 以人均年需要实物数量^[6] (350~400 kg/(人·a)) 作适当调整做分级中间值, 其他各级分级等差划分。人均年收入 C_7 以 2007 年农民人均纯收入 4 140 元^[15]为参考根据需要作适当调整做分级中间值, 其他各级等差划分。劳动生产率 C_9 以现报道的我国水稻亩产最高纪录 1 231.17 kg^[16]、经调查该地区单位耕地每年每个农民需在地里劳动 30 天左右(以 30 天记) 来计算的劳动生产率作为分级指标中间值, 其他依据实际需要等差划分分级。流域内人口密度 C_{10} 根据我国人口大省都超过 500 人/km², 西北地区有的省在 50 人/km² 左右这两个数字作为两极端数字进行分级界限界定。年径流系数 C_{13} 根据长江流域平均径流系数为 0.49, 一般在 0.3~0.6 之间作相应调整确定分级界限。平均有效土层厚度 C_{16} 以水土保持监测技术指标体系中低山丘陵区发育的有效土层厚度为 50~70 cm, 结合实地调查确定分级界限。林下枯枝落叶层厚度 C_{19} 根据韩冰等^[17]实践证明: 山杨林下枯枝落叶层厚积累大于 1 cm、油松林积累到 2 cm 时没有溅蚀发生, 起到了保持水土的作用, 森林采伐作业规程(LY/T 1646-2005) 中指出单层纯林尤其是单一针叶树纯林, 林下枯枝落叶厚度小于 0.5 cm 为低效防护林, 以此为参考划分分级界限。

以往由于一些指标难以确定参照值, 标准化比较困难, 有的甚至舍弃了一些难以标准化的重要指标, 这种方法避免了这种情况, 而且易于实现指标的标准

化, 所有指标均用一种标准化方法, 也便于比较。

1.7 小流域治理度得分值计算

①分别计算出各自对应的准则层 B 的权重 W_{Bi} 与指标层 C 的权重 W_{Cj} 计算出组合权重 W_j (表 5); ②根据表 6 将所得各指标值进行标准化处理后得 C_j ; ③计算出目标层 P (即小流域治理度) 的得分值 P ($P = \sum_{j=1}^n C_j \times w_j$), 其中 $n = 1, 2, \dots, 18, 19$ 。

2 案例分析

2.1 研究背景与指标值获取

塘背小流域是南方小流域综合治理试点之一, 位于江西省兴国县 (26°03'N ~ 26°42'N, 115°01'E ~ 115°51'E) 境内, 小流域面积为 16.38 km², 该小流域属山地丘陵区, 土壤为风化花岗岩侵蚀土, 处于花岗岩风化水蚀区, 治理前水土流失严重, 其岩性、流失类型和流失程度在兴国县具有一定的代表性^[18]。小流域内气候属亚热带季风气候区, 多年平均气温为 19°C, 平均降水量为 1 371.9 mm, 降水量年内分配不均, 3—6 月占年降水总量的 58.8%, 7—9 月占年降水总量的 23.3% (318.9 mm), 而同期蒸发量为 406.0 mm, 常发生伏秋旱, 9 月至次年 2 月仅占 17.9%^[19]。长江流域规划办公室与省、地、县共同商定, 把塘背小流域确定为治理试点, 并于 1980 年底制订出综合治理规划, 经过多年治理和恢复, 现塘背小流域水土流失治理率达 100%, 林草措施系数由 1981 年的 0.124 提高到了 0.679, 年输沙模数减少了 76.4%, 各业产值结构也有明显的改善, 粮食总产量为原来的 2 倍多, 农民人均纯收入是原来的 4 倍多, 92% 左右的人口已脱离了贫困。

利用上述获取指标值的方法, 实地调查得到小流域 2007 年度 3 大类 19 个指标值(表 7), 询问年长的水保工作人员及当地居民得到 1981 年治理初期各指标数据查询统计年鉴和部分当年存档数据。

2.2 决定小流域治理度的因素变化

表 8 中, 塘背小流域水土保持状态治理前为 0.101, 治理后为 0.418, 提高了 0.317, 增加了 3.14 倍; 社会经济指数的治理前为 0.048, 治理后为 0.093, 提高了 0.045, 增加了 0.94 倍; 生态功能指数治理前为 0.103, 治理后为 0.172, 提高了 0.069, 增加了 0.67 倍。水土保持状态中的水土流失治理率虽然已达 100%, 但是各单项措施效用发挥有待进一步改进, 林草措施系数可进一步提高, 土地利用结构还可作进一

表7 塘背小流域治理度单项指标值

Table 7 Single indicator values in Tangbei watershed management and recovery degree

指标	权重	1981年			2007年		
		现状值	标准化值	状态值	现状值	标准化值	状态值
C_1	0.139	1.50%	0.015	0.002	100%	1.000	0.139
C_2	0.070	22.72	0.564	0.039	4.61	0.885	0.062
C_3	0.138	7.93	0.347	0.048	18.80	0.704	0.097
C_4	0.070	0.124	0.165	0.012	0.679	0.705	0.049
C_5	0.076	0.00	0.000	0.000	0.933	0.933	0.071
C_6	0.024	263.99 kg/人	0.364	0.009	404.64 kg/人	0.505	0.012
C_7	0.050	695 元/人	0.092	0.005	2 781 元/人	0.328	0.016
C_8	0.047	65.2%	0.174	0.008	40.8%	0.584	0.027
C_9	0.050	15.5 kg/劳动日	0.255	0.013	41.3 kg/劳动日	0.513	0.026
C_{10}	0.025	195 人/km ²	0.505	0.013	263 人/km ²	0.473	0.012
C_{11}	0.026	0.58	0.420	0.011	0.58	0.420	0.011
C_{12}	0.033	4 341 t/(km ² ·a)	0.416	0.014	1 026 t/(km ² ·a)	0.747	0.025
C_{13}	0.047	0.60	0.300	0.014	0.37	0.531	0.025
C_{14}	0.023	83.73	0.837	0.019	95.29	0.953	0.022
C_{15}	0.031	32%	0.460	0.014	32%	0.460	0.014
C_{16}	0.024	16 cm	0.260	0.006	25 cm	0.350	0.008
C_{17}	0.047	9.1 g/kg	0.182	0.009	18.5 g/kg	0.370	0.017
C_{18}	0.047	0.78	0.312	0.015	2.46	0.692	0.033
C_{19}	0.033	0.1 cm	0.040	0.001	1.6 cm	0.520	0.017

表8 塘背小流域治理度

Table 8 Tangbei watershed management and recovery degree value

指标	1981年	2007年	提高指数	增加倍数
水土保持状态 B_1	0.101	0.418	0.317	3.14
社会经济指数 B_2	0.048	0.093	0.045	0.94
生态功能指数 B_3	0.103	0.172	0.069	0.67
治理度 P	0.252	0.683	0.431	1.71

步调整, 工程措施需要加强维护, 但总体看来塘背小流域水土保持措施的配置是科学合理的, 小流域生态经济系统结构及功能逐步完善, 整个系统已由低级水平的恶性循环转变为良性运转, 该流域综合治理的经验与模式, 取得了很好的成效, 对其他流域的综合治理具有借鉴作用。

2.3 塘背小流域治理度变化

利用层次分析法, 计算了塘背小流域治理前后的治理度(表8), 治理前(1981年)塘背小流域治理度为0.252, 治理后(2007年)为0.683, 其治理度提高了0.431, 增加了1.71倍。其中, 权重较大的土壤侵蚀综合指数、林草措施系数和恩格尔系数, 变化的幅度有所不同, 土壤侵蚀综合指数从22.7降到4.6;

林草措施系数从0.124提高到0.679, 恩格尔系数从65.2%下降到40.8%。恩格尔系数的重要性说明该地区小流域治理成效与当地人民生活水平密切相关, 小流域土壤侵蚀综合指数和林草措施系数与小流域治理具体成效相关度较高。塘背小流域治理度增加的幅度大, 是因为塘背小流域1980年被列入长江流域规划办公室试点小流域之后, 对其进行了全面规划, 综合治理。塘背小流域从1982年开始治理, 属于国家级示范小流域, 其治理时间为9年, 治理投入为2 663.5万元(按CPI折算的2007年人民币值, 含劳动力替代资金), 治理标准严格, 所以成效较好。

3 小流域治理度级别

基于研究建立的指标体系、指标分级标准化及计算方法, 根据小流域治理度数值, 结合实际调查情况, 将小流域治理度P分为5级(表9)。

治理前塘背小流域治理度值为0.252, 处于IV级的脆弱状态, 经过多年的治理恢复, 其治理度增加到0.683, 达到了II级的良性循环状态, 在无人为干扰的情况下, 小流域内水土流失区可自然修复, 这和塘背小流域的实际情况是相符的。

表 9 小流域治理度评价分级

Table 9 Assessment classification of watershed management and recovery degree

级别	治理度	表征状态	描述
V	<0.2	恶性循环	为低级的流域水土保持系统, 即综合治理系统建设未达标, 小流域内水土流失严重, 无水土保持措施或水土保持措施未发挥有效作用, 社会经济发展差, 流域生态功能很脆弱, 不能维持自然功能, 系统处于恶性循环中, 水土流失治理区不能自然修复, 生态系统结构简单。
IV	0.2~0.4	脆弱	为初级的流域水土保持系统, 即综合治理系统建设达初级标准, 小流域内水土流失较严重, 水土保持措施初建其效果还未显现, 社会经济发展一般, 流域生态功能较脆弱, 系统处于初级循环中, 水土流失治理区不能自然修复, 生态系统结构较简单。
III	0.4~0.6	相对稳定	为中级的流域水土保持系统, 即综合治理系统建设达中级标准, 小流域内水土流失得到控制, 水土保持措施发挥一定作用, 社会经济发展较好, 流域生态功能得到改善, 系统处于中级循环中, 水土流失治理区不能自然修复, 生态系统结构趋于复杂。
II	0.6~0.8	良性循环	为高级的流域水土保持系统, 即综合治理系统建设达高级标准, 小流域内水土流失得到有效控制, 水土保持措施保存良好, 发挥一定作用, 社会经济发展好, 流域生态功能较好, 系统处于良性循环中, 水土流失治理区在无人为干扰下可自然恢复, 生态系统结构较复杂。
I	>0.8	可持续发展	为高级的流域水土保持系统, 即综合治理系统建设达高级标准, 小流域内水土流失得到全面控制, 社会经济发展势头好, 流域生态功能好, 系统处于持续稳定协调发展中, 水土流失治理区可自然修复, 生态系统结构复杂。

4 结论

(1) 制定了小流域治理度的概念, 建立了评价的指标体系和方法, 所构建的 19 个评价指标获取较容易, 涵盖了水土保持、社会经济和生态功能等的多个方面, 研究表明这些指标能够反映小流域综合治理状态。采用的综合定量评价方法科学实用, 获取的结果与实际情况基本一致。该指标体系具有较强的客观性和适用性, 可供红壤区其他小流域治理评价使用。

(2) 小流域治理度的评价方法, 不仅在于能够从总体上客观反映小流域综合治理情况, 而且还可揭示同一区域不同流域综合治理差异及其产生的根源, 这对指导今后的水土保持工作具有重要的现实意义。如塘背小流域社会经济方面相对滞后, 需在各个方面都要加大投入, 特别要重视对小流域经济发展起推动作用的治理措施, 有利于发展稳定持久的生态经济系统。

(3) 基于研究建立的指标体系、指标分级标准化及计算方法, 根据小流域治理度数值, 结合实际调查情况, 将小流域治理度 P 分为 5 级, 分别代表恶性循环、脆弱、相对稳定、良性循环和可持续发展状态。塘背治理后小流域治理度值在 0.6~0.8 之间。这和塘背小流域治理成效较好, 生态环境明显得到改善, 其水土保持、社会经济、生态功能已基本达到持续、稳定和协调发展的状态, 生态经济系统进入了初步的良性循环的实际情况是相符的。

致谢: 本研究在资料获取、评价指标体系构建和评价指标权重确定等过程中得到了江西省水利厅、兴国县水保局等有关领导和工作人员以及国内有关专家和教授的大力支持和帮助, 谨此一并致谢。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004: 397
- [2] Sutherland RA. A critical assessment of the research conducted at the hydraulics and erosion control laboratory — A focus on rolled erosion control systems applied to hillslopes. Geotextiles and Geomembranes, 1998, 16(2): 87–118
- [3] Jayanath A, Gamini H. Soil erosion in developing countries: A socio-economic appraisal. Journal of Environmental Management, 2003, 68(4): 343–353
- [4] Ferko B, Wim S, Jasper H. Ex-post evaluation of erosion control measures in southern Mali. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1): 27–37
- [5] 王礼先. 关于我国水土保持科学的内涵与研究领域问题. 中国水土保持科学, 2003, 1(2): 108–110
- [6] 水利部水土保持监测中心. 水土保持监测技术指标体系. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 28–86
- [7] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀. 西安: 陕西人民出版社, 1997: 17–18
- [8] 陈渠昌, 张如生. 水土保持综合效益定量分析方法及指标体系研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 95–104
- [9] 梁音, 杨轩, 苏春丽, 孙波, 潘贤章. 基于 EI 的南方红壤区土

- 壤侵蚀县域差异与趋势分析. 土壤学报, 2009, 49(3): 287-293
- [10] 王占礼, 邵明安, 刘文兆, 梁一民. 纸坊沟流域土壤侵蚀与产沙初步研究. 天津师大报(自然科学版), 1999, 19(1): 45-50
- [11] Ni JR, Li YK. Approach to soil erosion assessment in terms of land use structure changes. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(3): 158-169
- [12] 王念奎. 香樟群落生物多样性研究. 林业勘察设计, 2009(1): 76-80
- [13] 梁音, 潘贤章, 孙波. 42年来兴国县土壤侵蚀时空变化规律研究. 水土保持通报, 2006, 26(6): 24-27
- [14] 韦红波, 任红玉, 杨勤科. 中国多年平均输沙模数的研究. 泥沙研究, 2003(1): 39-44
- [15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴, 2008. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2008/indexch.htm>
- [16] 苏明钟. 我国水稻新品种创世界水稻高产新纪录. 新疆农垦科技, 2004(4): 64
- [17] 韩冰, 吴钦孝, 刘向东, 汪有科, 赵鸿雁. 林地枯枝落叶层对溅蚀影响的研究. 防护林科技, 1994(2): 7-10
- [18] 兴国县塘背小流域治理委员会. 塘背小流域综合治理试点小结. 中国水土保持, 1984(3): 15-17
- [19] 何长高, 姚毅臣. 应用灰色系统理论预测塘背河小流域水土保持经济效益. 江西水利科技, 1994, 20(1): 48-52

Concept and Evaluation Methodology of Watershed Management and Recovery Degree in Red Soil Region

SU Chun-li^{1,2}, LIANG Yin¹, LI De-cheng¹, SUN Xin³

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Forestry Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The concept of watershed management and recovery degree (WMRD) was defined from three aspects, i.e., soil and water conservation, socio-economic development and ecological service function. An evaluation index system and method for assessing WMRD was established focusing on the purpose of watershed comprehensive management on the bases of expert advices and references. Tangbei watershed in Xingguo country was selected as the study case. The results showed that the selected 19 indicators for assessing WMRD could reflect the real situation of watershed management. The analytic hierarchy process was simple and practical. WMRD of Tangbei watershed increased from 0.252 in 1980s to 0.683 in 2007 after long-term management.

Key words: Watershed management and recovery degree, Analytic hierarchy process (AHP), Tangbei watershed