

DOI: 10.11766/trxb202003290139

王凌霞, 李忠武, 王丹阳, 陈佳, 胡晓倩, 宁珂. 红壤低山丘陵区水土流失防治分区方法与措施配置——以宁都县小洋小流域为例[J]. 土壤学报, 2021, 58 (5): 1169–1178.

WANG Lingxia, LI Zhongwu†, WANG Danyang, CHEN Jia, HU Xiaoqian, NING Ke. Methods and Measures for Soil and Water Conservation in Hilly Red Soil Regions in South China: A Case Study of Xiaoyang Watershed in Ningdu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (5): 1169–1178.

红壤低山丘陵区水土流失防治分区方法与措施配置* ——以宁都县小洋小流域为例

王凌霞¹, 李忠武^{1, 2†}, 王丹阳¹, 陈佳³, 胡晓倩¹, 宁珂¹

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 水土保持区划历经 70 年发展日趋成熟, 明确了水土保持工作的发展方向, 但却难以直接指导水土保持措施布设, 故本研究提出在小流域 (50 km²) 尺度划分水土流失防治分区。基于压力-状态-响应模型构建包含水土流失敏感性、土壤侵蚀态势、生态系统服务三个维度的指标体系。并且针对目前应用于分区的方法众多, 其分区效果有待评价的问题。以江西省宁都县小洋小流域为例, 使用三种聚类评价指标对三种常用聚类算法所得水土流失防治分区方案进行评价。结果表明, k-means 算法最适用于小洋小流域水土流失防治分区。水土流失防治分区探讨了复杂环境特点和社会发展需求, 并在此基础上提出了水土保持措施布设意见, 为小流域合理配置水土保持措施提供科学依据, 提高综合治理效益。

关键词: 水土保持; 防治分区; 分类算法; 小流域; 措施配置

中图分类号: S157.2 文献标志码: A

Methods and Measures for Soil and Water Conservation in Hilly Red Soil Regions in South China: A Case Study of Xiaoyang Watershed in Ningdu

WANG Lingxia¹, LI Zhongwu^{1, 2†}, WANG Danyang¹, CHEN Jia³, HU Xiaoqian¹, NING Ke¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 After nearly 70 years' development, the strategy of zoning for soil and water conservation has gradually got matured with natural environment, socio-economic situation, type of soil erosion, and other factors in the region taken into account, thus becoming an effective tool for strategic planning. However, local management agencies now require more

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0505401)和湖南省水利科技项目(湘水科计[2017]230-40)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505401), and the Water Resources Science and Technology Project of Hunan Province (Xiangshuikaji No. [2017]230-40)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lizw@hnu.edu.cn

作者简介: 王凌霞 (1996—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与碳循环研究。E-mail:wanglingxia@hnu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-29; 收到修改稿日期: 2020-06-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-12-10

locale-specific schemes to guide soil management practices, and zoning of small watersheds for soil and water conservation is an effective method, very helpful for comprehensive control of soil erosion. Moreover, zoning uses an evaluation- and cluster-based approach to sort and organize spatial units according to their similarity from a technical perspective. There are many kinds of clustering algorithms applied to zoning, and each has its own characteristics that may be desirable in some applications, but undesirable in others. Therefore, it is significant to evaluate the schemes of zoning for soil and water conservation designed with different clustering algorithms. 【Method】 In this study, the Pressure-State-Response (PSR) model was used as a framework for establishing a tri-mensional indicator system that included soil erosion sensitivity, the soil erosion status, and ecosystem services. The Xiaoyang watershed is a small watershed typical of the hill red soil regions in South China, suffering severe soil erosion. Taking the Xiaoyang watershed as an example, evaluation and comparison was made of the schemes of zoning for soil and water conservation designed with the 3 commonly-used clustering algorithms, i.e., k-means clustering algorithm (k-means), Self-organizing Maps (SOM) and Iterative Self-organizing Data Analysis (ISODATA), in dispersion, diversity and practicability, in light with the 3 evaluation indices, i.e., Silhouette Coefficient (SC), Shannon's Diversity Index (SHDI) and Perimeter-Area Fractal Dimension Index (PAFRAC). 【Result】 Results show that the k-means algorithm was the most reasonable for the zoning. The final schemes were adjusted through filtering, trend-surface analyses and comparison with other schemes to ensure continuity and integrity of the zoning and in the end 5 kinds of zoning were screened out. 【Conclusion】 Zoning for soil and water conservation should take into account characteristics of a region so as to make a suitable arrangement for vegetation rehabilitation in terms of the surface landscape. This study provides a framework within which region-specific soil erosion measures can be planned, and it has also laid down a scientific basis for local management agencies to implement region-specific erosion control measures and improve their integrative management benefits.

Key words: Soil and water conservation; Zoning for erosion control; Classification algorithms; Small watershed; Deployment of measures

水土保持区划是根据水土流失特征和自然社会现状进行的水土保持区域划分或合并的研究。自 20 世纪 50 年代以来, 诸多学者就省域、市域、县域^[1-3]等大尺度区域上提出了水土保持区划方案, 水利部也于 2011 年组织制定了全国水土保持三级区划方案, 分别从国家、区域、项目角度指导水土保持工作的开展^[4]。这些方案以行政区为基本单元, 分析了自然环境、社会经济、水土流失类型等因素, 为水土保持重点项目的布局与规划, 防治目标与技术体系的确定奠定了基础。但其同一空间单元内自然因素、社会经济条件、水土流失特征仍存在明显的差异, 难以因地制宜地指导具体水土保持措施布设。

20 世纪 80 年代初, 水利部借鉴美国水土保持工作经验, 结合中国自身地形地貌及土地利用特点, 确定了以面积 $<50 \text{ km}^2$ 的小流域为基本单元的水土流失综合治理模式。相较于大尺度水土保持区划宏观布局的目标, 在小流域尺度制定水土流失防治分区以防治水土流失, 改善生态环境为出发点, 可以因地制宜地指导水土保持措施布设, 对地方机构土壤管理实践进行指导^[5]。因此, 以像元为空间单元,

在小流域尺度开展水土流失防治分区是指导水土保持综合治理的有效途径。

分区方法是影响分区结果的重要环节, 相同指标体系下采用不同分区方法可能导致分区结果的巨大差异。随着卫星成像技术和数理统计的发展, 传统分区方法逐渐由定性向定量转变^[6]。从技术角度来看, 分区是一种根据空间单元的相似性来组织空间单元评价结果的方法, 其中最常用的定量方法是聚类算法, 现有聚类算法种类繁多、体系复杂, 需要依据分区原则制定评价方案, 对不同分区方法所得结果进行对比。鉴于此, 本研究选择小洋小流域为例, 基于“压力-状态-响应”模型从水土流失敏感性、土壤侵蚀态势、生态系统服务三个维度构建水土流失防治分区指标体系, 分别运用 k 均值聚类算法 (k-means clustering algorithm, k-means)、自组织映射算法 (Self-organizing Maps, SOM)、迭代自组织数据分析算法 (Iterative Self-organizing Data Analysis, ISODATA) 划分水土流失防治分区, 按照分区结果的轮廓系数 (Silhouette Coefficient, SC)、香农多样性指数 (Shannon's Diversity Index, SHDI)、

周长 - 面积分维指数 (Perimeter-Area Fractal Dimension Index, PAFRAC) 对三种分区方案进行优选, 并以所得最优的分区方案为基础布设水土保持措施, 以期对小流域水土保持综合治理工作提供科学指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

宁都县位于南方红壤低山丘陵区水土流失最为严重的赣南地区。自 20 世纪 80 年代起, 宁都县相继被列入三项全国水土保持工程, 共治理 72 条小流域, 取得了显著的治理成果。小洋小流域于 2017 年计划开展国家水土保持重点治理工程, 在此之前只有群众自发的、小规模零星治理。以 2015 年小洋小流域为例, 可以代表南方红壤低山丘陵区未治理小流域的自然状态。小流域地处固厚乡、固村镇、长胜镇交界处, 总面积 47.60 km², 水土流失面积 25.17 km², 占土地总面积的 53.72%。土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主, 属于全国水土保持区划中的赣南山地土壤保持三级区 (V-4-8t)。成土母质以花岗岩类风化物为主, 土壤类型主要有红壤和水稻土, 具有砂砾含量高, 自然肥力较低的特点, 一旦植被遭到破坏, 极易造成严重的水土流失。流域气候类型属亚热带季风气候, 多年平均气温为 18.9℃, 雨量充沛且年内分配不均, 多年平均降水量为 1 551 mm, 主要集中在 4—6 月。小流域地貌类型以低山、丘陵为主, 局部为河滩地, 林草覆盖率约为 74.9%。

据统计, 2015 年底流域总人口 7 680 人, 人口密度为 164 人·km⁻², 农村居民人均可支配收入 7 248 元。流域内农业生产占主导地位, 农民收入以种植业为主, 严重的水土流失导致农民生产生活受到较大影响。同时流域内农业产业结构不尽合理, 粮食作物占较大优势, 经济作物、林果产值比重较小, 经济结构单调, 当地群众发展经济果木林的愿望强烈。

1.2 小流域水土流失防治分区指标体系

水土流失防治分区是在区域水土流失成因、驱动力及特点的基础上, 全面评价水土流失对社会经济发展和生态环境质量的影响, 为水土保持措施的布设乃至生产发展方向布局提供科学依据。因此, 可以构建基于“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR) 模型的水土流失防治分区指

标体系概念框架, 利用模型的三个维度分别反映生态系统对水土保持的需求、依据和适应。PSR 模型是由加拿大统计学家 David J.Rapport 和 Tony Friend 最早提出, 后由经济合作与发展组织 (OECD) 和联合国环境规划署 (UNEP) 推广发展的生态环境质量评价的常用模型。其中压力代表外界对生态环境的扰动, 状态指生态环境现状, 响应指生态系统对外界扰动的反馈^[7]。由于人类活动和自然因素的空间异质性使土壤承受不同程度压力 (P), 造成了现有水土流失空间分布情况 (S), 生态系统为适应水土流失现状, 其服务功能结构发生了改变 (R)。因此, 基于实效性、系统性和可操作性原则, 选择三个维度 5 项指标构建小流域水土流失防治分区指标体系 (表 1)。

表 1 小流域水土流失防治分区指标体系

Table 1 Index systems used for zoning		
维度 Dimension	要素 Factor	指标 Index
		坡度
压力 Pressure	水土流失敏感性	土地利用类型
		植被覆盖度
状态 Status	土壤侵蚀态势	土壤侵蚀强度
响应 Response	生态系统服务	生态系统服务价值

(1) 压力维度。压力维度采用水土流失敏感性要素评价, 小流域内部由于自然环境差异和人类活动影响, 不同区域发生土壤侵蚀的可能性有着明显差异。为了识别易形成土壤侵蚀的区域, 评价土壤侵蚀对人类活动的敏感程度, 本研究针对小流域自然环境特点及土壤侵蚀成因, 选择了坡度、植被覆盖度、土地利用类型三个指标。其中坡度指标采用 2015 年 DEM 数据 (<http://www.gscloud.cn/>) 计算得出。并根据中国土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007), 将其分为 6 级: <5°, 5°~8°, 8°~15°, 15°~25°, 25°~35°, >35°; 植被覆盖度采用来源于 2015 年中国 250 m 植被指数 16 天合成产品 (<http://www.gscloud.cn/>) 计算得到; 土地利用类型主要利用高分二号卫星影像数据 (<http://www.rscloudmart.com:8088/>), 采用人机交互式目视判读的方式, 依照中国科学院土地资源分类系统标准^[8], 获得了土地利用数据。利用 ArcGIS 空间分析功能, 将坡度、植被覆盖度、土地利用类型三项指标进行

重采样、叠加分析,并借鉴孙小涛等^[9]的研究,建立小流域水土流失敏感性评判等级表,生成水土流失敏感性空间分布图。

(2) 状态维度。状态维度对应土壤侵蚀态势,定量表征小流域内已发生的土壤侵蚀分布情况,对预防和治理土壤侵蚀,因地制宜地布设水土保持措施提供科学指导。本研究参考程琳等^[10]的研究,采用中国土壤流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀模数($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$),并根据土壤侵蚀分级分类标准(SL190-2007)将其分为6类:<500(微度)、500~2 500(轻度)、2 500~5 000(中度)、5 000~8 000(强烈)、8 000~15 000(极强烈)、>15 000(剧烈),得到土壤侵蚀强度以表征小流域土壤侵蚀态势。

(3) 响应维度。响应旨在确定生态系统对外界扰动的自适应能力,因而引入生态系统服务要素。小流域水土流失防治分区的目标就是治理水土流失,最终实现生态系统服务功能的恢复及价值的提升。过往水土保持区划方案中通常将土壤保持、水源涵养等与水土保持相关的生态系统服务纳入指标体系^[11],但是当区划目标过分强调土壤保持功能时,可能会损害到其他一种或多种服务的供给,导致预期之外的生态系统服务衰退^[12]。因而全面评估小流域生态系统服务价值对水土流失防治分区研究的意义重大。

生态系统服务价值作为生态系统服务的量化指标,有效地将同一生态系统所提供的不同生态系统服务进行综合,并可与其他生态系统进行分析对比。为了全面评价生态系统服务,本研究将其分为9类功能:粮食生产、原材料生产、气体调节、气候调节、废物处理、生物多样性维护、提供审美价值、土壤形成和保护以及水文调节。本研究采用基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值评估的方法^[13],该方法数据需求少,操作简单,方法统一,适合对小流域生态系统服务价值进行快速核算。最后利用熵权法计算各生态系统服务功能的权重,对小流域生态系统服务价值进行综合评价。

1.3 小流域水土流失防治分区方法

早期分区侧重专家商会、指标体系研究,其结果很容易被分析者的观点所影响。随着数据精度的不断提升,采用人工分区的难度也逐级增加,机器学习方法被引入分区工作中。自下而上的分区划定主要采用聚类算法,这其中又根据学习方式不同分

为监督分类和非监督分类。监督分类是按照一定规则(训练数据)为对象贴标签,并依照标签来区分归类^[14]。该方法分类结果很大程度上依赖于训练样本,因而很难对不同算法之间进行严格比较。而非监督分类则无需训练数据,将属性相近的基本单元以一定规则聚类起来,可以避免由于训练数据的选择造成方法主观性强的问题^[15],在各类区划中应用较为广泛。本研究选取自然分区中最常用的3种非监督分类算法:k-means算法、SOM算法、ISODATA算法进行对比,筛选出适于小流域水土流失防治分区方法。

k-means算法源于信号处理中一种向量量化的方法,现今作为一种聚类分析方法流行于数据挖掘领域。通过计算给定样本集中样本之间的距离大小,将样本划分为k个簇。尽量实现簇内样本联系紧密,簇间距离最大化。

SOM算法是一种可以将高维数据降维映射到低维空间中的聚类方法,它由输入层和竞争层两层网络结构组成,通过模拟生物神经元之间的兴奋、协调与抑制、竞争作用原理,在二维拓扑结构上通过自组织竞争对输入层进行聚类。

ISODATA算法是对k-means算法的进一步优化,通过在初始化时加入合并与分裂两个阈值,对相对标准偏差大于分裂阈值的分量进行拆分,对中心距离小于合并阈值的分量进行兼并,最终得到一个比较理想的分类结果。

本研究以2015年为基准,30 m×30 m栅格作为空间单元,计算每个空间单元的水土流失敏感性、土壤侵蚀态势、生态系统服务三项评价要素作为输入数据,将分区数目定为5类,利用ArcGIS空间分析功能和MATLAB共同实现三种聚类算法在小洋小流域中的分区过程。

1.4 分区方法评价

选择轮廓系数、香农多样性指数、周长-面积分维指数分别从聚散性、多样性和形状复杂性来评价分区结果。

(1) 轮廓系数。轮廓系数可以从分区结果的内聚度和分离度两方面评价水土流失防治分区方案的聚类效果,计算公式如下:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max[a(i), b(i)]}$$

式中, $a(i)$ 为 i 向量到同一簇内其他点不相似程度的平均值, $b(i)$ 为 i 向量到其他簇的平均不相似程度的最小值。为评价当前聚类的整体轮廓系数, 计算所有轮廓系数 $S(i)$ 的平均值, 即为平均轮廓系数 SC ;

$$SC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(i)$$

式中, n 为数据集中特征向量的总数。平均轮廓系数的区间为 $[-1, 1]$, 值越大表示聚类效果越好, 反之越差, 0 代表聚类重叠。

(2) 香农多样性指数。香农多样性指数常用于生态学中反映景观异质性, 在水土流失防治分区方案评价中可用于量化不同分区的非均衡分布情况, 计算公式如下:

$$SHDI = -\sum P \ln P$$

式中, P 为各基本单元类型构成不同分区的比例。香农多样性指数的范围为 $SHDI \geq 0$, $SHDI$ 增大, 说明各基本单元类型在不同分区中呈均衡化趋势分布。为了实现分区方案中组间差异最大化, 组内差异最小化的原则, 香农多样性指数越小表示分区结果越好。

(3) 周长-面积分维指数。周长-面积分维指数反映了不同分区形状的复杂性, 计算公式如下:

$$PAFRAC = \frac{2 \ln(0.25p)}{\ln a}$$

式中, p 为斑块周长 (m), a 为斑块面积 (m^2)。周长-面积分维指数的区间为 $[1, 2]$, 指数越高, 斑块形状越复杂, 反之越简单。为尽可能简化分区结果, 方便水土保持措施布设与落实, 在评价水土流失防治分区时, 周长-面积分维指数越小分区结果越好。

2 结果与讨论

2.1 水土流失敏感性及土壤侵蚀态势空间分布格局

小洋小流域水土流失敏感性分布如图 1a 所示, 流域以微度敏感区为主, 占全区总面积的 79%; 轻度水土流失敏感区面积为 6.2 km^2 , 占全区总面积 13%; 中度水土流失敏感区面积为 2.4 km^2 , 占全区总面积 5%, 主要分散地分布在地势起伏较大的地区; 强烈与极强烈敏感区主要分布在流域东北部、中部建设用地以及西部流域农田区, 占全区总面积 3%。综上, 小洋小流域水土流失敏感性区域较小, 且敏感程度较低, 尤其以轻度和中度为主, 应以预防为主。

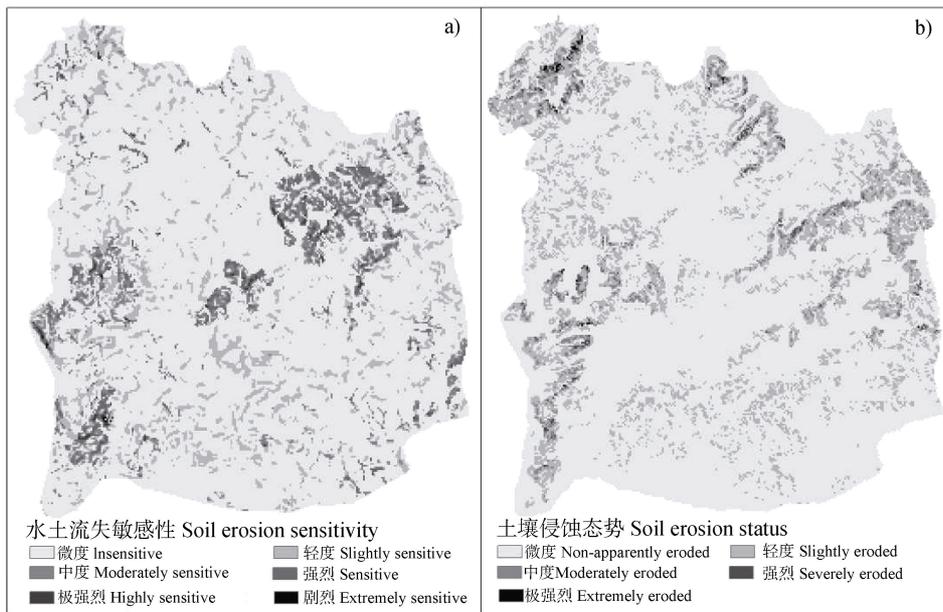


图 1 小洋小流域水土流失敏感性及土壤侵蚀态势空间分布

Fig. 1 Spatial patterns of soil erosion sensitivity and soil erosion status in the Xiaoyang watershed

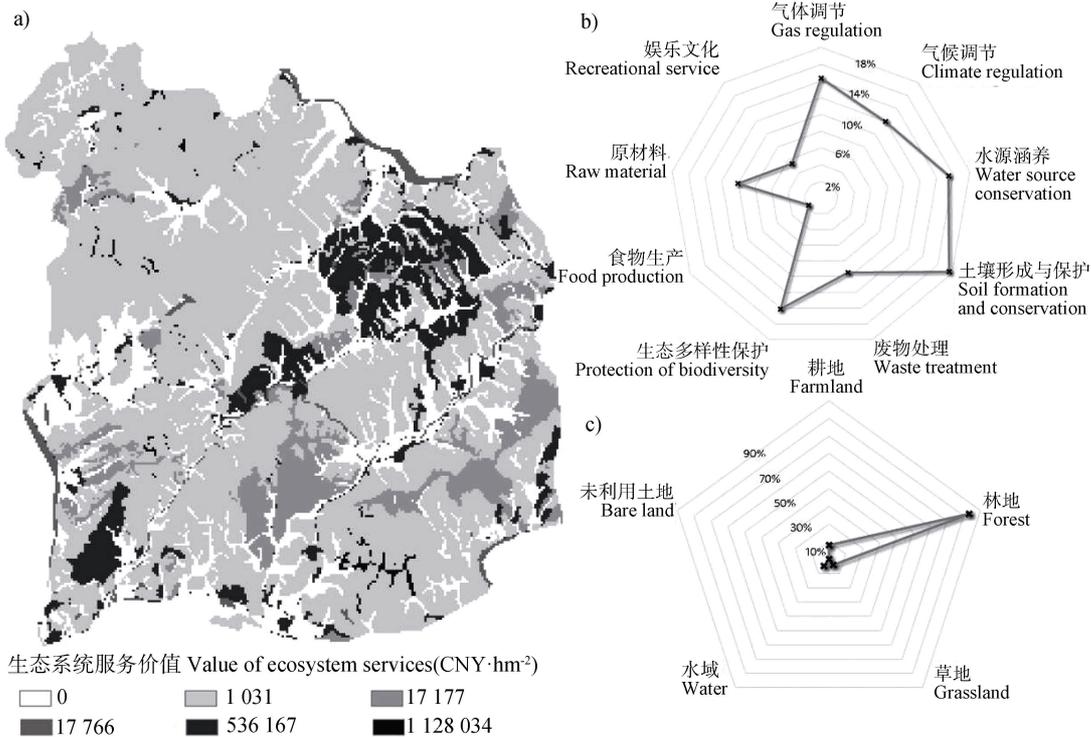
利用 CSLE 模型对小洋小流域土壤侵蚀强度进行评价,土壤侵蚀现状如图 1b 所示。小洋小流域以微度土壤侵蚀为主,占全区总面积 74%。而轻度及以上土壤侵蚀面积约为 9.8 km²,占全区总面积 26%。其中轻度侵蚀集中发生在流域的西北、西南及东部地区,且在其他坡度为 6°~15°的区域零散分布。而中度侵蚀区域以坡度为 8°~20°,植被覆盖度为 50%~60%为主,分散在的轻度侵蚀区域周围。流域西北、西南、东北等地存在少量强烈、极强烈侵蚀区,图斑破碎,主要以点状分布,极少呈面状分布特征,其坡度以>15° 为主,植被覆盖度<45%。

通过对小洋小流域水土流失敏感性与土壤侵蚀态势对比可知,土壤侵蚀强度为微度到中度的地区水土流失敏感性均以微度为主,但侵蚀强度越高的地区水土流失敏感度为轻度及以上的占比越大。土壤侵蚀强烈的地区存在轻度敏感性的占比最高,而侵蚀极强烈的地区,水土流失敏感性以强烈为主。在不考虑人为因素的情况下,土壤侵蚀强度与水土

流失敏感性强度应较为一致,但现实情况是,土壤侵蚀不显著的区域也可能存在强烈的水土流失风险,而土壤侵蚀严重的区域可能由于人为治理缓解了侵蚀强度继续加重的风险。因此在分区过程中分别评价土壤侵蚀的风险及现状极为重要。

2.2 生态系统服务空间分布格局

参考谢高地等^[16]提出的“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表”,估算了小洋小流域 2015 年生态系统服务价值量(图 2)。计算结果显示,小洋小流域生态系统的总服务价值量为 1.88 亿元。就生态系统服务类别而言,各生态服务功能的价值较为均衡。其中土壤形成与保护价值最高,为 3.30 千万元,水源涵养位列第二,为 2.91 千万元,两种服务功能价值分别占总价值的 17.58%和 15.47%,这表明小洋小流域有较强的水土流失自我修复的能力。其次是气体调节、生态多样性保护、气候调节、原材料生产,共占总服务价值的 50.41%;其他各项生态服务价值较低,共占总服务价值的 16.54%。



注: a) 生态系统服务价值空间分布图; b) 不同土地利用类型的生态系统服务价值占比; c) 不同生态服务类型的价值占比。
 Note: a) Spatial distribution of total value; b) Proportion of values for different land use types; c) Proportion of values for different ecological service types.

图 2 小洋小流域生态系统服务分布图
 Fig. 2 Distribution of ecosystem services within the Xiaoyang watershed

而就不同土地利用的服务价值而言，森林提供的服务价值最高，为 1.56 亿元，占总价值的 83.25%；其他土地利用类型提供的服务价值占总价值不到 20%；未利用土地提供的服务价值量最低，仅占总价值量的 0.01%。Costanza^[17]的研究结果指出建设用地的生态系统服务功能极小，基本可以被忽略，所以本研究中建设用地生态系统服务价值为 0。

2.3 小流域水土流失防治分区方法对比

计算小洋小流域采用三种分区方法所得的小流域水土流失防治分区方案（图 3），可以发现不同分区方法应用于相同小流域内所得结果不尽相同。本研究通过对比不同水土流失防治分区方案的轮廓系数、香农多样性指数、周长-面积分维指数三项指标（图 4），从技术角度评价分区方案的合理性。

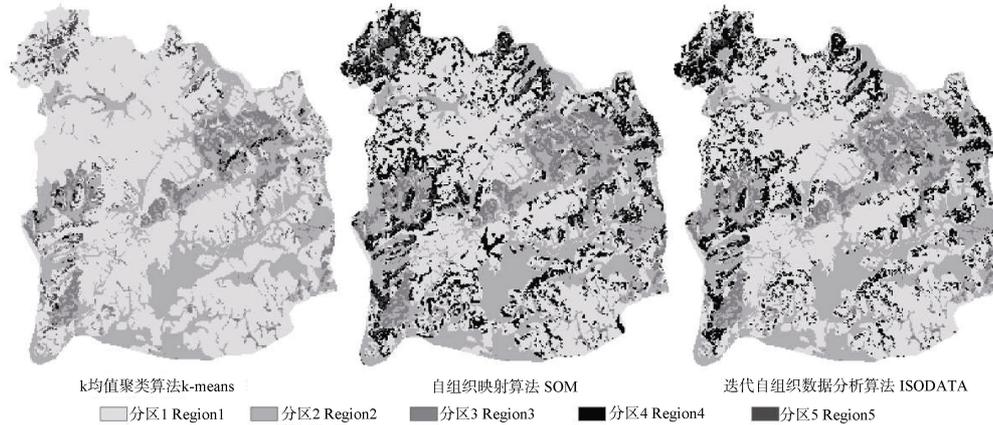


图 3 小洋小流域水土流失防治分区方案

Fig. 3 Schemes of zoning for soil and water conservation in the Xiaoyang watershed

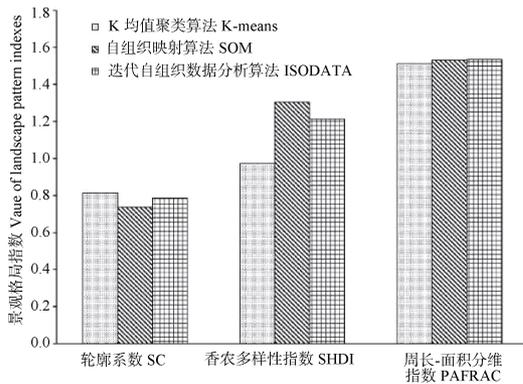


图 4 水土流失防治分区方案评价因子

Fig. 4 Indices for evaluation of schemes of zoning for soil and water conservation

平均轮廓系数用于表征分区方案的聚类效果，其数值越大，各分区的内聚度和分离度最优。小洋小流域采用 k-means 算法分区方案的聚类效果最佳，其次是采用 ISODATA，而采用 SOM 算法分区方案的聚类效果一般。香农多样性指数表征各分区之间各评价指标的一致性大小，其数值越小，区内相似性越大，区间差异性越小。小洋小流域中采用 k-means 算法得到香农多样性指数远小于其他算法所得结果，因此 k-means 算法分区结果更能满足区内相似性和区间差异性的分区原则。对于周长-面积

分维指数，三种聚类算法在该指数上的表现差异不大且偏高，表明利用聚类算法所得方案的分区边界复杂、形状破碎，不利于后期水土保持措施布设与落实。因而需要对分区结果进一步处理，平滑边界、去除碎屑图斑。综上，通过对三种分区方案的聚散性、多样性和形状复杂性进行分析，k-means 算法表现最佳。同时 k-means 算法相较其他两种算法运算时间短，且有较为成熟的软件支持计算，因而易于操作与推广。从技术角度来看，k-means 算法最适用于小洋小流域水土流失防治分区，但仍需要从实践角度出发对该方案进行验证。

2.4 基于水土流失防治分区的措施布设

在 k-means 算法聚类得到小流域水土流失防治分区结果的基础上，在 ArcMap 中转化为栅格图像，采用众数滤波、邻域分析等方法去除碎屑图斑、平滑区域边界，并利用其他两种分区方案进行补充调整，最后对结果进行可视化处理，输出小洋小流域水土流失防治分区图（图 5）。

小流域不仅是一个地理结构单元，同时也是水土流失综合治理的空间单元。小流域综合治理的主要目标是减少水土流失、改善生态环境和提高经济效益协同发展。因此，基于小流域水土流失防治分

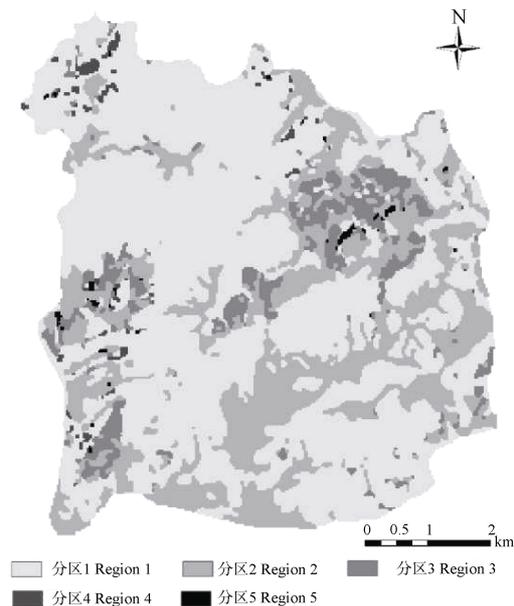


图 5 小洋小流域水土流失防治分区图

Fig. 5 Map of zoning for soil and water conservation in the Xiaoyang watershed

区结果中各分区特点的空间异质性, 提出具体有效的水土保持措施建议, 可以改善生态系统服务, 实现自然环境与社会经济效益的提升。由于水土保持措施中的工程措施是以点状措施形式配套生物措施使用的, 很难通过水土流失防治分区这一面状单元直接指导工程措施的布设, 因而本研究主要分析水土流失防治分区结果与生物措施配置之间的关系。

分区 1 没有明显的土壤侵蚀, 且水土流失敏感性极低, 因此没有设计水土保持措施。分区 2 以微度、轻度水土流失区域为主, 另包含少量中度及以上的水土流失区域。该区立地条件较好, 大部分区域的坡度小于 15° , 原土地利用类型以耕地为主, 有部分分散的果园林地。应根据地形条件, 以水土流失治理与坡地农业开发为目标, 优化坡地农业空间配置模式。在 $<5^\circ$ 的平地及浅丘以耕作措施为主治理水土流失, 通过合理密植、间作套作等方式提高土地利用效率。 $5^\circ \sim 15^\circ$ 缓坡地区适宜采取坡地水平梯田, 并辅以坡面工程优化配置^[18]。 $15^\circ \sim 25^\circ$ 以植物篱措施为主进行治理, 可选择黄花菜、麦冬、百喜草等适宜南方红壤区生长, 且具有一定经济价值的植物种类^[19]。

分区 3 水土流失敏感性较强, 区域生态系统服务价值较低, 但其土壤侵蚀以微度为主, 有部分轻度侵蚀。其主要原因是 2015 年小洋小流域正在大规模开发脐橙园, 有大面积刚刚建成梯田还未种植树木的

裸土地。经果林作为重要的水土资源开发性治理措施之一, 具有保水保肥能力强, 生态效益明显等特点。同时其也具有经营周期短, 经济效益高等优势, 可以有效增加水土流失区群众收入。但值得注意的是, 地表覆被单一可能会增加生态环境与社会经济风险, 难以控制水土流失, 仍需其他措施综合治理^[20]。张杰等^[21]对红壤坡地柑橘园不同水土保持措施组合评估, 结果表明在经果林下全面覆盖种植百喜草、狗牙根等植物可以使减流减沙、土壤含水率提高等综合水土保持效益最优。此外, 在果园开发初期应尽快增加地表植被覆盖, 减少土壤裸露面积, 可以有效控制水土流失, 降低水土流失敏感性^[22]。

分区 4 以中度水土流失为主, 但区域内水土流失敏感性不高, 且 4 区的土壤形成与保护功能在 5 个分区中最高, 具有较强的自然恢复能力。该区土地利用类型以林地为主, 区内平均植被覆盖度为 43.7%。应实行封禁治理消除人为干扰, 同时在林木稀疏或不均匀的地块进行补植, 加强林草植被保护, 依靠生态系统的自我恢复能力, 促进营养物质循环, 恢复植被, 提高涵养水源的功能^[23-24]。

分区 5 水土流失严重且具有较高继续发生的风险, 主要分布在山丘顶部地区。因此, 为了尽快恢复地表植被覆盖度, 应因地制宜地选择相应树种和混交类型布设水土保持林。在水土保持林建设过程中, 还需考虑南方红壤低山丘陵区较为常见的马尾松林地的林下水土流失问题。由于人为扰动与林下植被的缺失, 马尾松林地土壤侵蚀严重^[25-26]。因此, 有必要开展林下补植, 微地形改造等工程, 提高水土保持的防治效益。

第五期国家水土保持重点建设工程 (2013—2017) 规划范围包括小洋小流域, 并于 2017 年正式实施。通过对比小洋水土流失防治分区图与小洋小流域核心示范区水土保持措施图 (图 6) 发现, 现有梯田措施中分区 1 占比 81.24%, 经果林措施中分区 3 占比 60.64%, 分区方案及措施设计与现有小流域综合治理配置较为吻合, 所得结果治理需求明确, 可以直接指导水土保持措施设计, 从实践角度验证了以 k-means 算法为基础的小流域水土流失防治分区方案的合理性。其中分区 2、3、5 形成的配置模式与南方红壤区较为成熟的“顶林-腰果-谷农”^[27] 的三层立体治理模式一致, 且通过分析生态系统对水土保持的需求、依据和适应特征得到的分区结果,

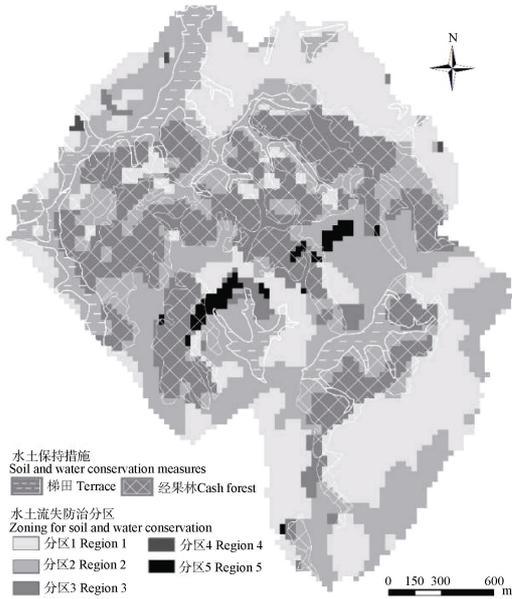


图6 小洋小流域核心示范区水土流失防治分区与水土保持措施

Fig. 6 Zoning for soil and water conservation and erosion control measures for the key demonstration area of the Xiaoyang small watershed

相比于简单识别分布位置与坡度大小所划分的三层结构更具针对性。此外，该分区方案中加入了对生态系统服务功能的全面评估，进一步将人工治理与生态自我修复有机结合，为南方红壤低山丘陵区小流域水土保持措施设计提供了科学实用的方案。

3 结论

研究得到的小洋小流域水土流失防治分区方案，可以全面清晰地刻画出小流域尺度内不同分区水土流失趋势、现状及治理需求的空间分异特征，并在此基础上对水土保持措施布设提出了相应的建议，为小流域水土保持综合治理提供决策依据，具有重要的理论与实践价值。值得注意的是，本研究旨在从常用分区聚类算法中筛选出最适用于南方红壤低山丘陵区小流域水土流失防治分区的算法，在研究过程中的数据精度、评价模型、参数设计尽可能满足方法对比需求。在未来分区方案制定过程中，应在此基础上进一步完善：（1）本研究中为了便于比较不同聚类算法的效果，依据实践经验将分区数目定为5个。在之后研究中，应设计不同分类数的区划方案进行对比，在评价区划方案的基础上结合实际需求，选择分区结果最理想的分类数；（2）基于CSLE模型计算

出的土壤侵蚀量尚存在争议，如何基于径流小区数据校正估算模型，更准确地测定南方红壤低山丘陵区的土壤侵蚀量，仍有待更深入地探讨；（3）利用非监督聚类方法划定小流域水土流失防治分区可以避免因权重设置等问题造成的主观影响，但在聚类方法参数设计与网络构建等方面仍具有主观性，如何改进聚类方法避免主观影响，应成为下一步的工作重点。

参考文献 (References)

- [1] Pan F, Zhang L C, Zhang B H, et al. Study on the regionalization of soil and water conservation in Jiangxi Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016 (6): 17—19. [潘峰, 张利超, 张北红, 等. 江西省水土保持区划研究[J]. *中国水土保持*, 2016(6): 17—19.]
- [2] Lan X C, Cheng L. Study on the regionalization of soil and water conservation in Ningbo City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15 (1): 141—147. [蓝雪春, 程岚. 宁波市水土保持区划研究[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15 (1): 141—147.]
- [3] Wang D Y, Li Z W, Chen J, et al. Problems and improvements of methods of regionalization for soil and water conservation at a County-scale[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 475—486. [王丹阳, 李忠武, 陈佳, 等. 县域水土保持区划方法的问题与改进[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 475—486.]
- [4] Wang Z G, Zhang C, Ji Q, et al. Soil and water conservation regionalization and its application in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14 (6): 101—106. [王治国, 张超, 纪强, 等. 全国水土保持区划及其应用[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (6): 101—106.]
- [5] Zhang H J, Zhang C Y, Zhao Y J, et al. Issues and countermeasures in the comprehensive management of small watershed in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14 (1): 131—137. [张洪江, 张长印, 赵永军, 等. 我国小流域综合治理面临的问题与对策[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (1): 131—137.]
- [6] Wang D Y, Li Z W, Chen J, et al. Regionalization of soil and water conservation in China—Review, reflection and prospect[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (5): 8—17. [王丹阳, 李忠武, 陈佳, 等. 中国水土保持区划——回顾、思考与展望[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (5): 8—17.]
- [7] Peng J, Wu W H, Liu Y X, et al. Soil conservation service zoning in the Inner Mongolia Autonomous Region based on PSR framework[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (11): 3849—3861. [彭建, 武文欢, 刘焱序, 等. 基于PSR框架的内蒙自治区土壤保持服务分区[J]. *生态学报*, 2017, 37 (11): 3849—3861.]
- [8] Liu J Y. Study on national resources & environment survey and dynamic monitoring using remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 (3): 225—230. [刘

- 纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 225—230.]
- [9] Sun X T, Zhou Z F, Chen Q, et al. Sensitivity evaluation and the spatial distribution of soil erosion in key ecological function areas: A case of Leishan City of Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 73—78, 133. [孙小涛, 周忠发, 陈全, 等. 重点生态功能区水土流失敏感性评价与分布研究——以贵州省雷山县为例[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 73—78, 133.]
- [10] Cheng L, Yang Q K, Xie H X, et al. GIS and CSLE based quantitative assessment of soil erosion in Shaanxi, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 61—66. [程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于GIS和CSLE的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61—66.]
- [11] Zhao Y. Study on soil and water conservation regionalization and function orientation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [赵岩. 水土保持区划及功能定位研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [12] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(5): 1305—1312.
- [13] Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243—1254. [谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243—1254.]
- [14] Duque J C, Ramos R, Suriñach J. Supervised regionalization methods: A survey[J]. International Regional Science Review, 2007, 30(3): 195—220.
- [15] Praskievicz S, Luo C H. Unsupervised hydrologic classification of rivers: Watershed controls on natural and anthropogenic flow regimes, Alabama, USA[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(8): 1231—1244.
- [16] Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740—1746. [谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740—1746.]
- [17] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26: 152—158.
- [18] He J J, Cai Q G, Wang X Q. Study on optimized patterns of soil and water conservation measures on sloping fields in earth-rocky mountainous area of Northern China[J]. Geographical Research, 2010, 29(6): 1017—1026. [和继军, 蔡强国, 王学强. 北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J]. 地理研究, 2010, 29(6): 1017—1026.]
- [19] Zhang P. Study of the erosion control effect of contour hedgerow in red soil hilly region in Southern China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. [张沛. 南方红壤
- 丘陵区植物篱控制水土流失效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.]
- [20] Zhu L Q, Huang R Z, Li F, et al. Impact of economic fruit forest development on soil and water loss in hilly red soil region of Southern China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(5): 38—41, 69. [朱丽琴, 黄荣珍, 李凤, 等. 南方红壤丘陵区经果林开发对水土流失的影响——以江西省为例[J]. 中国水土保持, 2019(5): 38—41, 69.]
- [21] Zhang J, Chen X A, Tang C J, et al. Benefit evaluation on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 165—173. [张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 165—173.]
- [22] Zuo C Q, Ma L. Study on soil and water conservation effect under different tillages for orchards on red soil slopeland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 12—15. [左长清, 马良. 红壤坡地果园不同耕作措施的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 12—15.]
- [23] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, et al. Studies on the nutrient circulation and energy of the serious degraded community after closing of hillsides and management to facilitate afforestation[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(3): 325—330. [谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 封禁管理对严重退化群落养分循环与能量的影响[J]. 山地学报, 2002, 20(3): 325—330.]
- [24] Li D C, Liang Y, Zhao Y G, et al. Main methods and experiences on soil and water conservation of red soil region in south[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 54—56. [李德成, 梁音, 赵玉国, 等. 南方红壤区水土保持主要治理模式和经验[J]. 中国水土保持, 2008(12): 54—56.]
- [25] He S J, Xie J S, Yang Z J, et al. Status, causes and prevention of soil and water loss in *Pinus massoniana* woodland in hilly red soil region of Southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 65—70. [何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65—70.]
- [26] Yuan Z J, Ma D F, Nie X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 12—21. [袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 12—21.]
- [27] Mo M H, Xie S H, Nie X F, et al. Research on patterns of soil and water loss comprehensive harness in red soil region of Southern China—A case study in Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 207—213. [莫明浩, 谢颂华, 聂小飞, 等. 南方红壤区水土流失综合治理模式研究——以江西省为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 207—213.]

(责任编辑: 檀满枝)