

小流域水土流失治理优先度的评价与应用

程冬兵，赵元凌，孙宝洋，刘纪根，陈蝶，郑瑞维，丁文峰

(长江水利委员会长江科学院，武汉 430010)

摘要：中国水土流失防治任务仍然繁重，有计划分批次实施水土流失治理是现阶段条件下的必然选择，优先治理小流域识别是其首要解决的一项基础工作，然而目前相关成果较为缺乏，难以支撑小流域水土流失治理智能决策和精准施策。在当前大力推进智慧水土保持背景下，积极探索优先治理小流域识别方法非常迫切，对于科学、合理、高效促进水土流失治理工作具有重要意义。该研究立足于小流域自然禀赋条件，以中国水土流失重点区域——三峡库区秭归县为例，坚持科学性和可操作性相结合原则，以水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求为导向，综合水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度，提出小流域水土流失治理优先度定义及定量评价方法，为识别优先治理小流域提供科学依据和技术支撑。结果显示，秭归县2021年现状水土保持率为69.12%，远期（2050年）水土保持率为81.74%，总体提升12.62个百分点。秭归县2021年全域土壤侵蚀模数现状为 $758.50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，最小可能土壤侵蚀模数为 $408.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，总体下降比例达46%。秭归县大部分区域均具有较大的水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度，可完全治理和可降级的水土流失地块分布较为广泛，尤其在县域中西部的小流域存在较大的水土流失面积消减和土壤侵蚀强度降级空间。秭归县各小流域水土流失治理优先度的空间分布总体呈现中部高，东部和南部相对较低的分布格局，全县治理优先度大于0.6的小流域占总全县小流域的11.76%。通过典型县应用，该研究提出的小流域治理优先度涵盖了水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度，能更为全面满足小流域水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求，直观反映了水土流失面积消减空间和土壤侵蚀强度降级空间的目标和相对大小，对支撑小流域治理决策更加准确、科学，治理优先度评价方法不仅可行，且易操作。

关键词：流域；侵蚀；水土保持率；水土保持率提升潜力；土壤侵蚀控制度；治理优先度；三峡库区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306211

中图分类号：S157

文献标志码：A

文章编号：1002-6819(2023)-22-0104-08

程冬兵，赵元凌，孙宝洋，等. 小流域水土流失治理优先度的评价与应用[J]. 农业工程学报，2023，39(22): 104-111. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306211 <http://www.tcsae.org>

CHENG Dongbing, ZHAO Yuanling, SUN Baoyang, et al. Evaluation and application of the management priority of soil erosion in small watersheds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 104-111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306211 <http://www.tcsae.org>

0 前言

中国是世界上水土流失最严重的国家之一，中国政府高度重视水土保持工作，专项安排资金用于水土流失治理，经过多年治理，中国水土保持工作取得显著成效。根据2021年中国水土保持公报^[1]，全国水土流失面积267.42万km²，占国土面积的27.96%，水土流失面积强度持续“双下降”。然而中国水土流失防治任务仍然繁重，同时，由于经济社会发展水平有限，水土流失治理资金投入有限，至少短期内实现水土流失全面治理不符合中国当前的国情，为有效支撑生态文明建设、美丽中国等国家战略部署，以有限的资金投入在有限的时间内获得最大的效益，必须根据轻重缓急，采取突出重点、分步实施的原则，科学、合理、高效有计划地分批次实

施水土流失治理。

以小流域为单元，开展水土流失治理是中国多年探索实践的成功经验总结，具有显著的中国特色^[2]。然而，目前水土流失治理项目规划安排仍存在一定的主观性和随意性，影响了治理效益最大化，究其原因主要是缺乏小流域治理的规划安排决策的科学依据，因为不同小流域自然禀赋条件不同，水土流失面积大并不代表土壤侵蚀强度高，水土流失面积小也并不一定代表土壤侵蚀强度低，不是所有地块的水土流失面积都可以消减，也不是所有地块的土壤侵蚀强度都可以降低到容许土壤流失量，水土流失面积和土壤侵蚀强度并不一定直接关联，且二者均存在一定的阈值，以水土流失面积为代表的单一指标，或部分参考了土壤侵蚀强度等级要素，均无法客观深度反映小流域水土流失严重性和治理必要性。2021年底，水利部印发《水土保持“十四五”实施方案》，强调“加快数字化发展，推进智慧水保建设”，其中包括研发以“水土流失治理紧迫程度评估”为核心内容的水土流失综合治理智能管理模型。2023年伊始，中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于加强新时代水土保持工作的意见》，明确提出“加快推进水土流

收稿日期：2023-06-29 修订日期：2023-11-22

基金项目：国家自然科学基金项目“基于水沙碳耦合调控的长江上游坡耕地水土流失防治阈值及系统治理研究”（U2340215）；水利部重大科技项目“水土流失综合治理智能管理模型研发”（CKSD2022735/TB）

作者简介：程冬兵，博士，教授级高工，研究方向为水土保持。

Email: xiao2005zhu@163.com

失重点治理”。对标 2035 年实现美丽中国战略目标等国家需求, 势必倒逼水土保持管理要强化推进科学规划、智慧决策、精准治理, 优先治理小流域识别是其首要解决的一项基础工作, 积极探索小流域治理优先度评价方法非常迫切。

优先度评价在景观管理^[3]、污染防治^[4]、山洪沟治理^[5]、土地整治^[6-7]、基础设施建设^[8-9]等领域均有广泛的应用^[10], 对支撑项目管理和决策发挥了重要作用。有部分学者针对水土流失治理优先小流域识别也尝试过一定的探索研究^[11-17], 普遍认为水土流失严重性及其可能治理效果应是优先治理小流域的判别依据, 主要体现在面积和强度两个方面, 但由于评价指标或考虑因素过于简单片面, 或考虑主观因素较多, 或评价方法复杂不具备可操作性等原因, 一直未能推广应用。因此, 科学可行的优先治理小流域识别方法仍然缺乏, 难以支撑小流域水土流失治理智能决策和精准施策。近年来国家提出了的“水土保持率”概念^[18-19], 丰富完善了水土保持目标管理, 其中“可完全治理水土流失面积”研判测算, 解决了小流域治理后水土流失面积可消减空间的定量评价, 但未涉及土壤侵蚀强度可降级空间研判。高海东等^[14-17]提出的土壤侵蚀控制度, 为解决小流域治理后土壤侵蚀强度可降级空间的定量评价提供了重要参考方法, 却缺乏水土流失面积可消减空间研究。本研究立足于小流域自然禀赋条件, 暂时排除主观因素, 以中国水土流失重点区域——三峡库区秭归县为例, 坚持科学性和可操作性相结合原则, 以水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求为导向, 借鉴水土保持率和土壤侵蚀控制度相关成果, 通过水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度评价小流域治理后水土流失面积消减目标效益和土壤侵蚀强度降级目标效益, 以此探索提出小流域水土流失治理优先度评价方法, 以期为识别优先治理小流域提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

三峡库区属于国家级水土流失重点治理区, 现有水土流失面积 1.85 万 km², 占区域土地总面积的 32.1%^[1], 水土流失形势仍十分严峻。

秭归县位于湖北省西部、三峡工程坝上库首, 国土面积 2 274 km²。地势西南高东北低, 属长江三峡山地地貌, 境内山脉为巫山余脉, 群山相峙, 多为南北走向, 形成起伏的山岗丘陵和纵横交错的河谷地带, 平地少, 素有“八山一水一分田”之称。该县属亚热带季风气候, 年均降水量 1 274 mm, 水资源较为丰富。该县属于水土保持区划中三级区——大巴山山地保土和生态维护区, 地形地貌、气候、植被、土壤等自然条件与三峡库区较为相似。

秭归县由于山高坡陡的自然地形, 易蚀的土壤, 丰富的降雨, 加之人为不合理开发利用, 造成了严重的水土流失。经过多年治理, 全县水土流失状况得到明显好转。根据 2021 年宜昌市水土保持公报^[20], 秭归县水土流

失面积为 702.11 km², 占该县土地面积的 30.88%, 但强烈及以上土壤侵蚀面积仍占全县水土流失面积的 18.78%, 水土流失依然严峻(表 1)。该县生产生活、土地利用及水土流失等情况与三峡库区也基本相近, 在三峡库区具有典型代表性。

表 1 秭归县水土流失现状

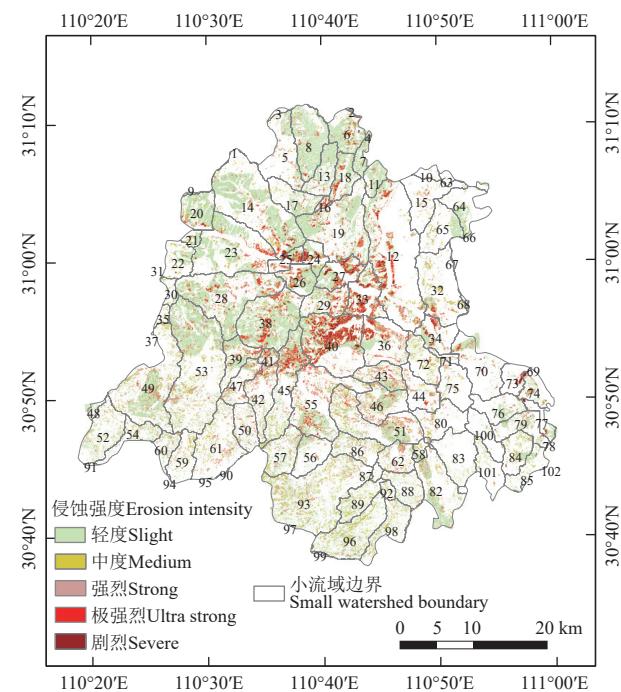
Table 1 Status of soil and water loss in Zigui County /km²

强度 Intensity	<i>S</i>	强度 Intensity	<i>S</i>
轻度 Slight	468.10	极强烈 Ultra strong	45.25
中度 Medium	102.14	剧烈 Severe	9.98
强烈 Strong	76.64	合计 Total	702.11

注: *S* 为土壤侵蚀面积。

Note: *S* is area of soil erosion.

按照《小流域划分及编码规范》^[21], 以数字高程模型(digital elevation model, DEM)和水系分布图为基础数据, 结合秭归县行政区划矢量图, 将秭归县域共划分为 102 条小流域, 小流域平均面积为 22.27 km²。为便于分析表述, 仅对小流域进行编号, 秭归县小流域土壤侵蚀强度空间分布如图 1 所示。图 1 显示, 全县水土流失现状总体呈现中部和北部较严重, 而东部轻微的分布态势。



注: 编号为小流域编号。

Note: The No. refers to the number of small watershed.

图 1 秭归县小流域土壤侵蚀强度空间分布

Fig.1 Spatial distribution of soil erosion intensity in small watershed of Zigui County

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

小流域水土流失治理优先度是指一定区域范围内, 在无法实现全面治理的情况下, 为突出重点、分步实施, 以小流域为单元, 通过评价小流域水土流失相对严重性及

其治理后效果，定量表征小流域水土流失治理优先程度。

鉴于水土流失面积和土壤侵蚀强度是水土流失严重性两个基本指标，反映了两个不同方面的属性，是两个独立的不同维度，相互间没有依存关系，所以从重要性或权重上是对等的。同时，为满足治理优先度评价和小流域筛选，需基于小流域水土流失预期与现状的比较，即水土流失面积消减效益和土壤侵蚀强度降级空间的效益，从而更加客观反映小流域水土流失治理相对优先程度和迫切程度。

本研究立足于小流域自然禀赋条件，以水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求为导向，基于水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度，采取水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度，分别评价小流域水土流失面积消减空间和土壤侵蚀强度降级空间，综合确定小流域水土流失治理优先度，其定量表达式为

$$P = Z + r \quad (1)$$

式中 P 为小流域水土流失治理优先度，归一化后，无量纲，介于 0~1 之间，值越大，表明小流域治理客观需求越紧迫； Z 为水土保持率提升潜力， r 为土壤侵蚀控制度，二者归一化后，均无量纲，介于 0~1 之间。

其中 Z 是指水土保持率阈值与现状水土保持率之差，反映了小流域水土保持率提升空间，值越大，可完全治理现状水土流失面积存量越大，水土流失面积可消减空

间越大，治理必要性亦大，治理后水土保持率提高效果越明显。其表达式定义为

$$Z = Z_f - Z_p \quad (2)$$

式中 Z_f 为远期水土保持率（2050 年），也称水土保持率阈值，无量纲； Z_p 为现状水土保持率，无量纲。现状水土保持率 Z_p 和水土保持率阈值 Z_f 的测算根据《水土保持率目标确定方法指南》和笔者承担湖北省水土保持率测算的规则方法^[22]。

土壤侵蚀控制度 r 是指现状土壤侵蚀模数与最小可能土壤侵蚀模数之比，反映了小流域土壤侵蚀强度降级空间，值越大，可降级的现状土壤侵蚀强度越大，土壤侵蚀强度可降级空间越大，治理必要性亦大，治理后土壤侵蚀控制效果越明显。其表达式定义为

$$r = A_s / A_0 \quad (3)$$

式中 A_s 为现状土壤侵蚀模数， $t/(km^2·a)$ ； A_0 为最小可能土壤侵蚀模数，也称水土保持措施容量下的土壤侵蚀模数阈值， $t/(km^2·a)$ 。土壤侵蚀模数采用中国水土流失方程 CLSE^[23-24] 计算。水土保持措施容量借鉴高海东等^[14-17]的思路，根据三峡库区及秭归县水土流失特点，结合该区域多年水土保持经验^[25-28]，针对小流域不同水土流失地块的坡度、植被覆盖度等下垫面条件，逐一分析其理想治理措施和最佳治理效果，以此作为水土保持措施容量设计方案（表 2）。

表 2 水土保持措施容量设计

Table 2 Capacity design of soil and water conservation measures

序号 No.	水土流失地块 Land type of soil erosion	下垫面条件 Underlying surface condition	治理措施 Management measures	最小可能土壤侵蚀模数 Minimum possible soil erosion modulus	备注 Remark
1	无需治理	海拔 ≥ 1800 m	封禁	保持原大小	水土保持率研判规则
2	林草地	-	补植补种+抚育	$500 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	控制在容许土壤流失量范围内
3	耕地	$0^\circ \sim 25^\circ$	梯田+截排蓄工程	采用 CLSE 计算	-
4	耕地	$> 25^\circ$	退耕还林还草	$500 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	控制在容许土壤流失量范围内
5	园地	$0^\circ \sim 25^\circ$	水平台地+截排蓄工程	采用 CLSE 计算	-
6	园地	$25^\circ \sim 35^\circ$	水平阶+截排蓄工程	采用 CLSE 计算	-
7	园地	$> 35^\circ$	植物篱	采用 CLSE 计算	-
8	人为水土流失	-	综合治理措施	$500 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$	控制在容许土壤流失量范围内

2.2 数据来源

降雨侵蚀力、土壤可蚀性、土地利用、植被覆盖与生物措施、工程措施、耕作措施、水力侵蚀模数等数据均来源于 2021 年水土流失动态监测专题数据库。

3 结果与分析

3.1 水土保持率提升潜力

3.1.1 水土保持率现状与阈值

2021 年秭归县水土保持率现状为 69.12%，与三峡库区（67.90%）基本相当。各小流域现状水土保持率存在较大差异，介于 30.94%~100%。通过图 2a 可以直观展示秭归县小流域现状水土保持率空间分布，水土保持率高值主要分布在县域东部，低值主要分布在县域中部和北部。按水土保持率从低到高排序，排前 10 的小流域编号分别为：4、7、38、8、20、11、6、16、26、41，均集中分布在县域中部和北部，也就是

说该 10 条小流域水土流失现状在面积维度上相对较为严重。

秭归县远期水土保持率为 81.74%，各小流域远期水土保持率存在较大差异，介于 42.72%~100%。通过图 2b 同样可以直观展示秭归县小流域远期水土保持率空间分布，水土保持率高值主要分布在县域东部，低值也主要分布在县域中部和北部。按水土保持率从低到高排序，排前 10 的小流域编号分别为：26、24、20、8、4、25、2、27、40、11，也就是说该 10 条小流域水土流失未来远期在面积维度上仍相对较为严重。

相对现状水土保持率，远期水土保持率虽然空间分布总体较为相似，但部分区域及数值均有较大变化，全县水土保持率总体提升 12.62 个百分点，各小流域水土保持率提升 0~44.60%。

3.1.2 水土保持率提升潜力

图 2c 显示，秭归县大部分区域均具有较大的水土保

持率提升潜力, 说明可完全治理水土流失面积分布较为广泛, 从南到北均有分布, 尤其在县域中西部的小流域水土流失面积存在较大的消减空间。按水土保持率提升潜力从大到小排序, 排前10的小流域编号分别为: 7、41、66、38、39、21、16、4、89、29, 集中分布在县域中西部。也就是说, 从面积维度上, 该10条小流域水土流失治理最为必要和迫切。

另外, 对比现状水土保持率排序前10的小流域, 其

中有5条小流域重复, 5条小流域不重复, 说明尽管小流域水土流失面积大, 但并不代表都可以消减, 因为有些小流域可能存在一些无需治理和不可完全治理的水土流失面积。这也进一步论证了现状和远期水土保持率仅能片面反映某阶段小流域水土流失面积严重性, 无法体现可能治理前后的差异和效果, 而水土保持率提升潜力却能直观反映小流域治理前后的水土流失面积消减目标和效益。

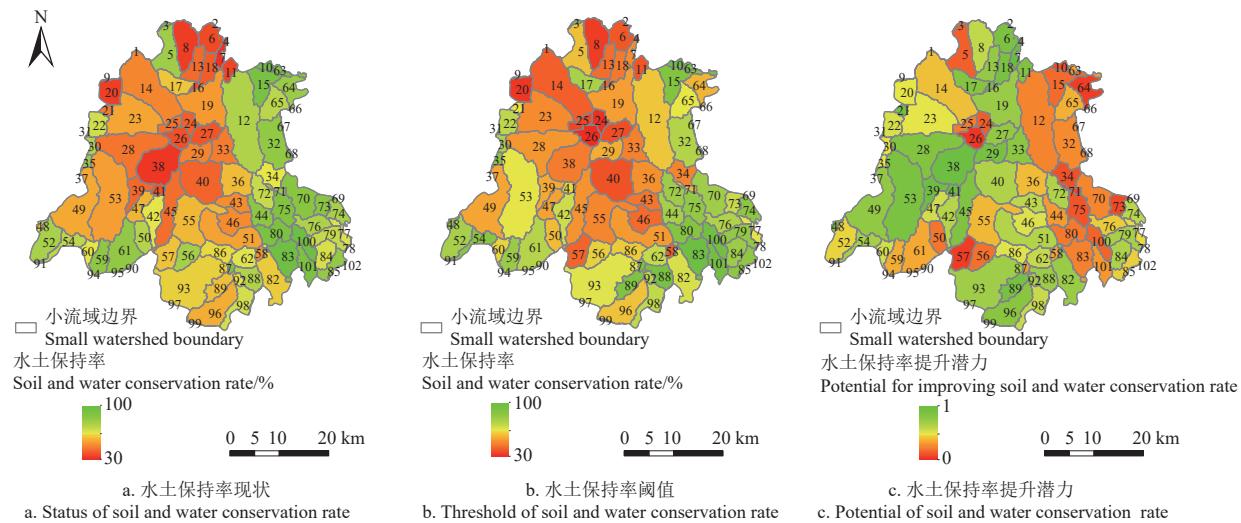


图2 秧归县小流域水土保持率及其提升潜力空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil and water conservation rate and its potential in small watershed of Zigui County

3.2 土壤侵蚀控制度

3.2.1 土壤侵蚀模数现状与阈值

2021年秧归县全域土壤侵蚀模数现状为 $758.50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 各小流域现状土壤侵蚀模数存在较大差异, 介于 $0 \sim 2423.90 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。通过图3a可以直观展示秧归县小流域土壤侵蚀模数现状空间分布, 土壤侵蚀模

数高值主要分布在县域中部和东南角, 大部分区域土壤侵蚀模数相对较低。按土壤侵蚀模数从高到低排序, 排前10的小流域编号分别为: 73、16、74、33、40、19、79、22、18、77, 集中分布在县域中部和东南角, 也就是说该10条小流域水土流失现状在强度维度上相对较为严重。

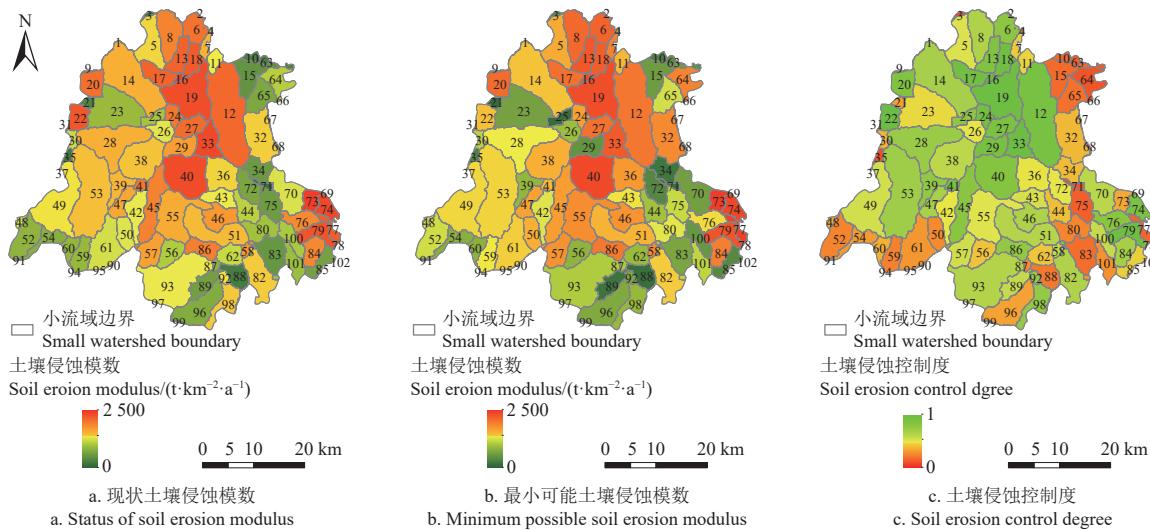


图3 秧归县小流域土壤侵蚀模数及土壤侵蚀控制度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil erosion modulus and soil erosion control degree in small watershed of Zigui county

秧归县全域最小可能土壤侵蚀模数为 $408.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 各小流域最小可能土壤侵蚀模数存在较大差异, 介于

$0 \sim 1619.13 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。通过图3b同样可以直观展示秧归县小流域最小可能土壤侵蚀模数空间分布, 土壤侵蚀模

数高值仍主要分布在县域中部和东南角，大部分区域土壤侵蚀模数相对较低。按土壤侵蚀模数从高到低排序，排前 10 的小流域编号分别为：73、77、74、40、16、19、79、13、33、18，也就是说该 10 条小流域水土流失未来远期在强度维度上仍相对较为严重。

相对现状土壤侵蚀模数，最小可能土壤侵蚀模数虽然空间分布总体较为相似，但部分区域及数值均有较大变化，全县土壤侵蚀模数总体降低 349.79 t/(km²·a)，下降比例达 46%。各小流域土壤侵蚀模数降低 0~1 375.84 t/(km²·a)，下降比例 0~71%。

3.2.2 小流域土壤侵蚀控制度

图 3c 显示，秭归县大部分区域均具有较明显的土壤侵蚀控制度，说明很多小流域通过治理土壤侵蚀强度有效降低，尤其在县域中部的小流域土壤侵蚀强度存在较大的降级空间。按土壤侵蚀控制度从大到小排序，排前 10 的小流域编号分别为：16、22、33、19、79、18、17、24、41、29，主要分布在县域中部。也就是说，从强度维度上，该 10 条小流域水土流失治理最为必要和迫切。

同理，对比现状土壤侵蚀模数排序前 10 的小流域，其中有 6 条小流域重复，4 条小流域不重复，说明尽管小流域现状土壤侵蚀强度高，但并不代表都可以降级，有些小流域可能存在一些无需治理和治理后土壤侵蚀强度仍较高的地块。这也进一步论证了现状和最小可能土壤侵蚀模数仅能片面反映某阶段小流域土壤侵蚀强度严重性，无法体现小流域可能治理前后的差异和效果，而土壤侵蚀控制度却能直观反映小流域治理前后土壤侵蚀强度降级目标和效益。

3.3 小流域治理优先度

综合小流域水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度，可得秭归县各小流域水土流失治理优先度。图 4 直观展

示了秭归县各小流域水土流失治理优先度的空间分布及优先程度，总体呈现中部高，东部和南部相对较低的分布格局。表 3 定量化列举了秭归县所有 102 条小流域水土流失治理优先度大小和排序信息，其中治理优先度介于 0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1 的小流域分别是 34、33、23、9 和 3 条，小流域治理优先度普遍较低，治理优先度相对较高的小流域较少，大于 0.6 的小流域占总全县小流域的 11.76%，更加凸显了优先治理少数小流域必要性和重要性。按治理优先度从大到小排序，排前 10 的小流域编号分别为 16、41、33、22、7、19、18、38、79、39，主要分布县域中部，说明该 10 条小流域治理客观需求最为迫切。

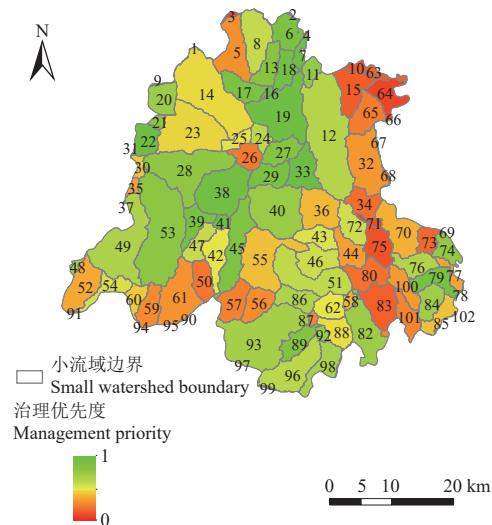


图 4 秭归县小流域水土流失治理优先度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of management priority of soil erosion control in small watershed of Zigui County

表 3 秭归县小流域水土流失治理优先度 P 信息表

Table 3 Information table of management priority (P) of soil erosion control in small watershed of Zigui County											
排序 Sort	P	编号 No.	排序 Sort	P	编号 No.	排序 Sort	P	编号 No.	排序 Sort	P	编号 No.
1	1.00	16	18	0.53	13	35	0.40	86	52	0.30	88
2	0.91	41	19	0.52	81	36	0.39	76	53	0.30	14
3	0.84	33	20	0.52	21	37	0.38	12	54	0.30	23
4	0.76	22	21	0.52	53	38	0.37	96	55	0.30	9
5	0.75	7	22	0.51	28	39	0.36	24	56	0.29	60
6	0.72	19	23	0.47	74	40	0.36	51	57	0.27	30
7	0.71	18	24	0.46	4	41	0.36	8	58	0.27	85
8	0.68	38	25	0.46	11	42	0.35	47	59	0.26	55
9	0.67	79	26	0.46	40	43	0.34	46	60	0.26	36
10	0.66	39	27	0.44	92	44	0.34	72	61	0.26	58
11	0.66	29	28	0.44	20	45	0.34	99	62	0.24	70
12	0.64	17	29	0.42	82	46	0.33	54	63	0.24	78
13	0.58	6	30	0.41	84	47	0.33	43	64	0.24	52
14	0.58	45	31	0.40	93	48	0.33	97	65	0.20	77
15	0.57	66	32	0.40	48	49	0.33	42	66	0.20	35
16	0.55	89	33	0.40	98	50	0.31	62	67	0.20	44
17	0.55	27	34	0.40	49	51	0.30	25	68	0.20	100
									69	0.19	32
									70	0.19	61
									71	0.19	5
									72	0.18	56
									73	0.18	59
									74	0.18	87
									75	0.18	101
									76	0.17	57
									77	0.17	65
									78	0.16	26
									79	0.15	50
									80	0.15	80
									81	0.15	34
									82	0.14	102
									83	0.14	73
									84	0.13	63
									85	0.12	83
									86	0.10	15
									87	0.08	10
									88	0.08	75
									89	0.08	2
									90	0.07	31
									91	0.07	71
									92	0.07	64
									93	0.06	3
									94	0.04	68
									95	0.02	67
									96	0.00	91
									97	0.00	95
									98	0.00	1
									99	0.00	94
									100	0.00	90
									101	0.00	37
									102	0.00	69

水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度排序前 10 的小流域对比，他们之间仅有 3 条小流域重合，进一步论证了小流域的水土流失面积和土壤侵蚀强度没有直接关系。同时，将治理优先度排序前 10 的小流域与水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度排序前 10 的小流域分别对

比，结果显示，三者排序前 10 条小流域均包含在 17 条小流域中，其中治理优先度与水土保持率提升潜力重合 5 条，与土壤侵蚀控制度重合 7 条，但三者均重合仅有 2 条，说明单一采取水土保持率提升潜力或土壤侵蚀控制度，均有很大可能造成对某条小流域在水土流失面积

或土壤侵蚀强度的治理后目标和效益认知不足, 从而影响最佳决策和最大效益。而治理优先度能更为全面满足水土流失“减量和降级”双重目标和效益最大化需求, 涵盖了水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度, 且直观反映了水土流失面积消减空间和土壤侵蚀强度降级空间的目标和相对大小, 对于支撑小流域治理决策更加准确、科学。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究立足于小流域自然禀赋条件, 以三峡库区秭归县为研究区, 提出了小流域水土流失治理优先度评价方法, 并检验了其适宜性。结果显示, 治理优先度涵盖了水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度, 能更为全面满足小流域水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求, 直观反映了水土流失面积消减空间和土壤侵蚀强度降级空间的目标和相对大小, 对于支撑小流域治理决策更加准确、科学, 治理优先度评价方法不仅可行, 且易操作。

本研究成果是基于小流域水土流失等自然客观条件评价而得出的优先治理小流域排序, 仅为管理部门提供一定的决策参考, 并不代表治理小流域实际规划安排。因为在实际工作中, 优先治理小流域是多种因素综合研判的结果, 如国家政策和战略需求、区域经济社会发展水平、治理投入规模、集中连片、产业发展、当地居地的意愿、以及属地水行政主管部门的主观能动性等多方面的因素。但不论因素再复杂多样, 小流域水土流失现状客观评价是基础。

本研究提出的水土保持措施容量, 只选取了部分主要水土流失地块, 采取的治理措施也是基于笔者多年水土保持经验总结, 仅作为研究案例, 对于三峡库区类似自然条件区域具有一定的借鉴参考价值。但实际水土保持工作中, 针对不同区域不同小流域, 该水土保持措施容量设计方案不一定是最理想的治理措施, 如作为实际管理决策支撑, 可进一步开展专题论证。

4.2 结论

1) 针对优先治理小流域识别需求, 本研究界定了小流域水土流失治理优先度定义, 并提出该评价方法, 即指小流域水土流失治理优先程度的定量表征, 以水土流失“减量和降级”双重目标和治理效益最大化需求为导向, 通过水土流失面积和土壤侵蚀强度两个维度综合评价小流域治理的优先程度, 为识别优先治理小流域提供了科学依据和技术支撑。

2) 秭归县 2021 年现状水土保持率为 69.12%, 各小流域间存在较大差异, 介于 30.94%~100%, 水土保持率高值主要分布在县域东部, 低值主要分布在县域中部和北部。秭归县远期水土保持率为 81.74%, 各小流域间同样存在较大差异, 介于 42.72%~100%。相对现状水土保持率, 远期水土保持率虽然空间分布总体较为相似, 但部分区域及数值均有较大变化, 全县水土保持率总体

提升 12.62 个百分点。

3) 秭归县 2021 年全域现状土壤侵蚀模数为 758.50 t/(km²·a), 各小流域间存在较大差异, 土壤侵蚀模数高值主要分布在县域中部和东南角, 大部分区域土壤侵蚀模数相对较低。秭归县全域最小可能土壤侵蚀模数为 408.71 t/(km²·a), 各小流域间同样存在较大差异, 介于 0~1 619.13 t/(km²·a)。相对现状土壤侵蚀模数, 最小可能土壤侵蚀模数虽然空间分布总体较为相似, 但部分区域及数值均有较大变化, 全县土壤侵蚀模数总体下降比例达 46%。

4) 秭归县大部分区域均具有较大的水土保持率提升潜力和土壤侵蚀控制度, 可完全治理和可降级的水土流失地块分布较为广泛, 尤其在县域中西部的小流域存在较大的水土流失面积消减和土壤侵蚀强度降级空间。

5) 秭归县各小流域水土流失治理优先度的空间分布总体呈现中部高, 东部和南部相对较低的分布格局。全县小流域治理优先度普遍较低, 治理优先度相对较高的小流域较少, 大于 0.6 的小流域占总全县小流域的 11.76%。

[参 考 文 献]

- [1] 《中国水土保持公报(2021年)》[R/OL]. 中华人民共和国水利部. [2023-05-11].
- [2] 刘震. 我国水土保持小流域综合治理的回顾与展望[J]. 中国水利, 2005(22): 18-21.
- [3] 胡志斌, 何兴元, 李月辉, 等. 岷江上游农林复合景观管理优先度评价[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 63-69.
HU Zhibin, HE Xingyuan, LI Yuehui, et al. Priority evluation of the agroforest landscape management of the upper reaches of Min River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [4] SHEN Z, Zhong Y, HUANG Q, et al. Identifying non-point source priority management areas in watersheds with multiple functional zones[J]. Water Research, 2015, 68: 563-571.
- [5] 周智文. 重庆山洪沟治理优先度评价及防治措施体系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
ZHOU Zhiwen. Studies on Mountain Torrent Ditch Governance Priority Evaluation and Control Measures System in Chongqing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵海乐, 徐艳, 张国梁, 等. 基于限制因子改良与耕地质量潜力耦合的耕地整治分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 272-282.
ZHAO Haile, XU Yan, ZHANG Guoliang, et al. Farmland consolidation zoning based on coupling of improved limiting factors and farmland quality potential[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 272-282. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘春艳, 张继飞. 基于生态位模型的岷江上游典型县域乡村聚落用地适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14):

- 266-273.
- LIU Chunyan, ZHANG Jifei. Land suitability evaluation using niche model for rural settlements in typical county in the upper reaches of Minjiang River[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(14): 266-273. (in Chinese with English abstract)
- [8] 魏新星, 陈一欣, 黄静, 等. 城市低效用地更新为绿色基础设施优先度评价[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6565-6578.
- WEI Xinxing, CHEN Yixin, HUANG Jing, et al. Priority evaluation of urban inefficient land renewal to green infrastructure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6565-6578. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张金鑫, 耿艺伟, 银超慧, 等. 基于“潜力约束-概率抉择”的确权宅基地整治模拟[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 264-273.
- ZHANG Jinxin, GENG Yiwei, YIN Chao hui, et al. Simulation of confirmed homestead consolidation using “ potential constraint-probability choice ” [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 264-273. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡星路, 熊杰, 张超艳, 等. 基于层次分析法-熵权法的污染地块异味污染物优先度评价方法——以农药类污染地块为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1923-1936.
- HU Xinglu, XIONG Jie, ZHANG Chaoyan, et al. Priority evaluation method of odor pollutants in contaminated sites based on analytic hierarchy process and entropy weight method: A case study of pesticide contaminated sites[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(6): 1923-1936. (in Chinese with English abstract)
- [11] DA SILVA R M, MONTENEGRO S M G L, SANTOS C A G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: A case study of Tapacura catchment[J]. *Natural Hazards*, 2012, 62: 953-970.
- [12] 符素华, 张志兰, 蒋光毅, 等. 三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 79-83, 197.
- FU Suhua, ZHANG Zhilan, JIANG Guangyi, et al. Priority watershed determination methods for comprehensive control of soil and water conservation in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 79-83, 197. (in Chinese with English abstract)
- [13] 符素华, 楚卓岚, 张志兰, 等. 水土流失综合治理优先小流域识别的空间尺度效应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 148-153.
- FU Suhua, SHEN Zhuolan, ZHANG Zhilan, et al. Scale effect on identifying priority watershed for comprehensive control of soil and water loss[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 148-153. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503-1515.
- GAO Haidong, LI Zhanbin, LI Peng, et al. The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1503-1515. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 流域侵蚀控制度的概念与计算方法——以王茂沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 17-24.
- GAO Haidong, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Concept and calculation methods of erosion control degree: A case study of the Wangmaogou Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [16] GAO H, LI Z, JIA L, et al. Capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(4): 457-472.
- [17] WANG L, YAN H, WANG X, WANG Z, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China[J]. *Catena*, 2020, 194: 1-11.
- [18] 蒲朝勇. 科学做好水土保持率目标确定和应用[J]. 中国水土保持, 2021(3): 1-3.
- [19] 曹文洪, 宁堆虎, 秦伟. 水土保持率远期目标确定的技术方法[J]. 中国水土保持, 2021(4): 5-8, 21.
- CAO Wenhong, NING Duihu, QIN Wei. Technical method for determining long-term goal of soil and water conservation rate[J]. *Soil and water Conservation in China*, 2021 (4): 5-8, 21.
- [20] 《2021年宜昌市水土保持公报》[R/OL]. 宜昌市水利和湖泊局, 2022.
- [21] 中华人民共和国水利部. 小流域划分及编码规范: SL 653-2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [22] 程冬兵, 赵元凌, 李璐, 等. 湖北省水土保持四级区不同分区水土保持率目标研究与探索[J]. 中国水土保持, 2023(3): 11-14, 38.
- CHENG Dongbing, ZHAO Yuanling, LI Lu, et al. Research and exploration on the goal of soil and water conservation rate in different partitions of four-level soil and water conservation area in Hubei Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(3): 11-14, 38. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 26-34.
- [24] 水利部办公厅. 关于印发区域水土流失动态监测技术规定(试行)的通知: 办水保[2018]189号[R]. 北京: 水利部办公厅, 2018.
- [25] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区坡地林草植被阻止降雨径流侵蚀[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 70-76.
- HUANG Ru, HUANG Lin, HE Binghui, et al. Effects of slope forest and grass vegetation on reducing rainfall-runoff erosivity in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(9): 70-76. (in Chinese with English abstract)

- [26] 郑江坤, 李静苑, 秦伟, 等. 川北紫色土小流域植被建设的水土保持效应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 141-147.
ZHENG Jiangkun, LI Jingyuan, QIN Wei, et al. Effects of vegetation construction on soil and water conservation in small watershed of purplish soil region, northern Sichuan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(2): 141-147.
(in Chinese with English abstract)
- [27] 郭萍, 夏振尧, 高峰, 等. 香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 105-112.
GUO Ping, XIA Zhenyao, GAO Feng, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 105-112.
(in Chinese with English abstract)
- [28] 程冬兵, 张平仓. 南方坡耕地水土流失过程与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2023.

Evaluation and application of the management priority of soil erosion in small watersheds

CHENG Dongbing, ZHAO Yuanling, SUN Baoyang, LIU Jigen, CHEN Die, ZHENG Ruiwei, DING Wenfeng

(Soil and Water Conservation Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Soil erosion has caused a heavy threat to agriculture production in China at the present stage. The accurate identification of priority small watersheds is one of the most important tasks for implementing control and prevention in batches. However, it is still lacking in the intelligent decision-making and implementation of soil loss control at present. Among them, the severity of soil erosion is an important indicator of priority small watersheds. Previous studies have been focused on the simple and single indicator during evaluation and consideration. Many subjective factors have also made the evaluation complex and less accessible. Therefore, it is very urgent to identify the management priority for the scientific, reasonable, and efficient application of soil loss control for better conservation. This study aims to evaluate the management priority of soil erosion control in small watersheds. The key area of soil erosion was selected at Zigui County in the Three Gorges Reservoir Area. The double goals were taken as the 'reduction and degradation' of soil and water loss. Two dimensions were also integrated with the soil and water loss area and soil erosion intensity. The results show that the current soil and water conservation rate in 2021 was 69.12%, and the long-term (in 2050) soil and water conservation rate was 81.74%, with an overall increase of 12.62 percentage point. The soil erosion modulus in 2021 was $758.50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ at present, where the minimum modulus of soil erosion was $408.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ with an overall decline ratio of 46%. However there were great differences among the soil and water conservation rates under current and long-term situations, as well as the current and the minimum soil erosion modulus in each small watershed. The long-term soil and water conservation rate and the minimum soil erosion modulus were generally similar to the spatial distribution, compared with the current. But there were great changes in some areas and values. Most areas shared a large potential for the soil and water conservation rate, as well as the soil erosion control degree. Erosion plots were widely distributed to be completely managed and downgraded, especially in the small watersheds in the central and western parts of the county. Large areas were found for the soil erosion area abatement and soil erosion intensity downgrading. The spatial distribution pattern was observed in the priority of soil erosion control in each small watershed: high in the central part, while relatively low in the eastern and southern parts. The number of small watersheds with a management priority greater than 0.6 accounted for 11.76% of the total. The management priority can be expected to cover both soil erosion area and soil erosion intensity. The goals and the relative size were determined for their reduction space. An accurate and rapid detection can also be achieved for the decision-making on the small watershed. The finding can provide technical support to identify the priority of soil corrosion in small watersheds.

Keywords: watershed; erosion; soil and water conservation rate; potential for improving soil and water conservation rate; soil erosion control degree; management priority; the Three Gorges Reservoir Area