

三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法

符素华^{1,4}, 张志兰³, 蒋光毅³, 湛卓岚¹, 赵辉², 丁琳¹

(1.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2.水利部水土保持监测中心, 北京 100053; 3.重庆市水土保持监测总站, 重庆 401147; 4.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: 三峡库区水土流失严重, 开展水土流失综合治理是减少入库泥沙和提高三峡工程综合效益的关键, 而如何高效识别优先小流域, 则是提高治理资金效益和科学决策的基础。以重庆市合川区为例, 在区域土壤侵蚀评价的基础上, 提出了水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法 3 种优先小流域识别方法, 并对其进行了比较分析。结果表明, 坡度—水土流失面积法识别的优先小流域水土流失面积占比接近于水土流失面积法, 同时又将坡度较大以及耕地、园地和采矿用地面积占比较大的小流域识别出来, 纳入优先小流域中, 是 3 种方法中最优的识别方法。研究结果可为三峡库区或同类型地区小流域水土流失治理规划与实施顺序决策提供借鉴和参考。

关键词: 水土流失综合治理; 优先小流域; 土壤侵蚀; 三峡库区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0079-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.013

Priority Watershed Determination Methods for Comprehensive Control of Soil and Water Conservation in Three Gorges Reservoir Area

FU Suhua^{1,4}, ZHANG Zhilan³, JIANG Guangyi³, SHEN Zhuolan¹, ZHAO Hui², DING Lin¹

(1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2.Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053; 3.Chongqing Central Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 401147; 4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Serious soil erosion exists in the Three Gorges Reservoir area. The comprehensive control of soil and water conservation is the key measure for decreasing the sediment which flow into the Three Gorges Reservoir and improving the comprehensive benefit of the Three Gorges project. Effective identification of the small watershed (priority watershed) with serious soil erosion is the basis for improving the efficiency of fund utilization and scientific decision-making. In this study, Hechuan district in Chongqing was selected as a test area. The regional soil erosion was assessed. The priority watershed was then identified by soil loss area method, landuse-soil loss area method, and slope-soil loss area method. The parameters including the average soil loss area percentage, the percentage of different landuse and average slope degree were used to assess the priority watershed. The results showed that the average soil loss area percentage of priority watershed from slope-soil loss area method was close to those from soil loss area method. However, the priority watersheds with high slope gradient, greater area percentage of crop land, orchard land and mining land were also identified in the slope-soil loss area method. It indicates that the slope-soil loss area method was the best method for identifying priority watershed. The results could serve as the comprehensive soil and water conservation of small watersheds.

Keywords: soil erosion comprehensive control; priority small watershed; soil erosion; Three Gorges Reservoir area

小流域是产沙、输沙以及水土流失治理的基本单元^[1]。中国从 1944 年开始在甘肃天水大柳树沟进行小流域综合治理^[2]。1980 年, 水利部出台了《水土

保持小流域治理办法(草案)》^[3], 明确指出小流域要实行综合治理、集中治理和连续治理, 对治理任务大、劳力少的流域, 可以支沟、毛沟为单位分期分阶段治

收稿日期: 2019-09-19

资助项目: 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目

第一作者: 符素华(1973—), 女, 四川岳池人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

通信作者: 赵辉(1971—), 男, 湖南衡山人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持监测技术研究。E-mail: 7166zhaohui@163.com

理。近年来,水利部开展了生态清洁小流域建设^[4-6]。到目前为止,我国已开展了大量以小流域为单元的水土流失综合治理工作^[7-9],取得了显著成效。

三峡库区生态环境脆弱,水土流失严重。根据全国水土流失动态监测成果,2018 年三峡库区涉及的湖北、重庆 2 省(市)26 个县共计 5.77 万 km²的土地面积中水土流失面积有 1.92 万 km²,占比 33.34%。开展水土流失综合治理,是减少入库泥沙、改善生态环境、长久发挥水库综合效益的关键。周萍等^[10]从建立农—沼—畜、水—沼—畜—农等复合生态系统、多层分级生态防护系统等方面开展流域治理和维护研究;毛华平等^[11]提出要从加强重点生态专项工程建设、合理有序转移人口、促进农民增收、建设清洁小流域等方面,建设三峡水库库周生态屏障。重庆市地处三峡库区腹地,水土流失综合治理虽然每年可减少土壤流失量约 1 亿 t,但治理任务依然艰巨^[12]。多年来受投入资金严重不足等因素限制,如何遴选优先治理的小流域尤其重要。郭宏忠等^[13]依据地形地貌、经济社会指标、水土流失特点以及水土流失对入库泥沙与水质影响等,将三峡库区水土流失防治区划分为 3 个一级区和 9 个二级区。在小流域优先顺序识别方面,曾肇京等^[14]从服务于水规划管理、流域面积、总人口、水能资源、多年平均径流量等方面,对流域进行了等级划分;Sheng 等^[15]考虑坡度、土壤可蚀性、雨量、植被覆盖度等因子,确定流域保护的优先级别;Silva 等^[16]基于土壤侵蚀模数,识别土壤侵蚀严重的子流域。

2018 年,中国首次开展了国土面积全覆盖的水土流失动态监测,获取了每个县域的水土流失面积、强度和分布情况。如何有效利用动态监测成果,编制小流域水土流失综合治理规划,确定治理小流域优先顺序,提高治理资金效益,是科学决策的基础。目前国内外这方面的研究成果鲜见报道。Silva 等^[16]用土壤侵蚀模数识别侵蚀严重的子流域,但未考虑土壤侵蚀影响因素及其综合防治的复杂性。生产实际中多根据专家经验确定治理优先小流域。本文以重庆市合川区为例,提出一套三峡库区水土流失综合治理优先小流域的识别方法,旨在为类似地区开展小流域水土流失规划与治理提供科学依据。

1 研究区概况

重庆市合川区位于东经 105°58′—106°40′,北纬 29°50′—30°23′,行政面积为 2 343 km²,位于重庆市西北部(图 1),以平行岭谷和丘陵为主,处于亚热带季风区,降雨主要集中在夏季。土地利用以耕地为主,占县域行政面积的 47.24%,其次是林地,占 28.04%。草地、园地、建设用地、交通运输用地、水域及水利设施

用地和其他土地的面积比例分别为 6.85%,4.45%,5.04%,2.17%,6.10%,0.11%(图 2)。县域内坡度主要集中在<5°以及 8°~25°的范围内,分别占行政面积的 29.3%和 43.7%。

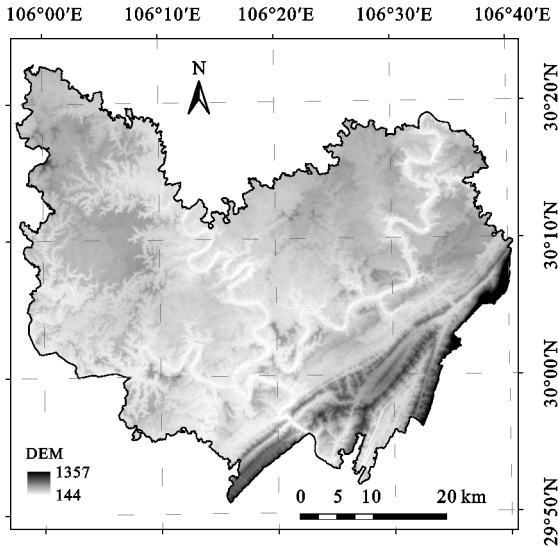


图 1 重庆市合川区 DEM 图

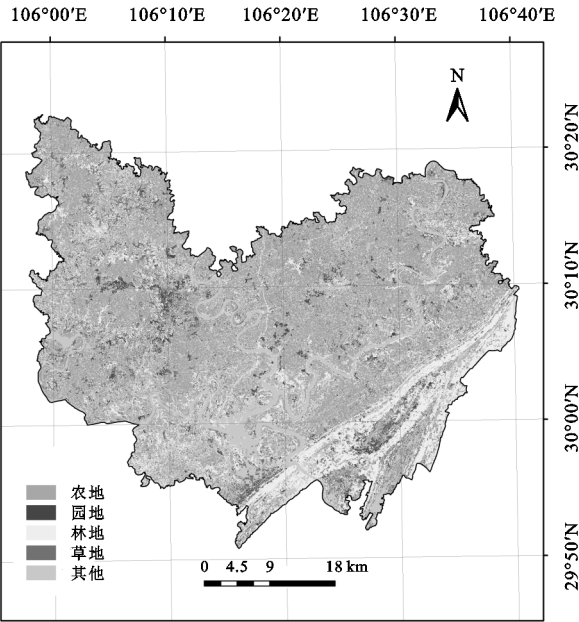


图 2 重庆市合川区土地利用图

2 材料与方法

2.1 数据来源

收集了研究区的土地利用、水土保持措施、降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖度以及 DEM 数据。土地利用和水土保持措施矢量数据基于 2018 年度优于 2 m 分辨率的遥感影像提取;10 m 分辨率降雨侵蚀力数据采用全国水土流失动态监测 1986—2015 年多年平均降雨侵蚀力成果;10 m 分辨率土壤可蚀性因子栅格来源于第一次全国水利普查水土保持情况普查数据;植被覆盖度利用 250 m 分辨率 MODIS 归一化植被指数(NDVI)计算,并经 30 m TM 植被覆盖

度数据修订,然后再插值生成 10 m 分辨率数据;10 m×10 m DEM 数据基于 1:1 万地形图插值生成。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤侵蚀强度评价方法 采用中国水土流失方程 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)计算土壤侵蚀模数^[17]。

$$A=RKLSBET \tag{1}$$

式中:A 为土壤侵蚀模数(t/(hm²·a));R 为降雨侵蚀力因子(MJ·mm/(hm²·h·a));K 为土壤可蚀性因子((t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm));L 为坡长因子(无量纲);S 为坡度因子(无量纲);B 为植被覆盖与生物措施因子(无量纲);E 为工程措施因子(无量纲);T 为耕作措施因子(无量纲)。

根据计算得到的土壤侵蚀模数 A,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[18]将土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀 6 个等级。轻度及以上侵蚀强度面积为水土流失面积,在此基础上,统计县域的水土流失面积 P_i(为 726 km²)。

2.2.2 优先小流域识别方法 采用土壤侵蚀模型地形因子计算工具^[19]中的小流域划分工具,基于 10 m DEM 得到面积为 0.01~0.1 km²的小流域,共有 31 834 条。在此基础上,结合县域土壤侵蚀强度图,统计各小流域的水土流失面积比例。根据小流域水土流失面积比例的大小、土地利用面积占比和小流域平均坡度等,综合确定小流域土壤侵蚀的敏感程度,确定其需要治理的迫切程度,识别出优先小流域和非优先小流域。同时认为优先小流域就是将要进行治理的面积,这样一个县域的优先小流域面积之和至少要等于县域的水土流失面积。基于此,本文采用 3 种方法研究确定小流域土壤侵蚀敏感性,识别优先小流域。

(1)水土流失面积法(方法 1)。将所有小流域按水土流失面积比例从大到小进行排序,并从水土流失面积比例最大的小流域开始进行流域面积累加,得到累计小流域面积 P₁。以 P₁-P_i绝对值最小为控制目标。当满足 P₁-P_i绝对值最小的条件时,累加停止。将参与面积累加的小流域识别为优先小流域。

(2)土地利用—水土流失面积法(方法 2)。该方法考虑小流域水土流失面积比例和容易发生水土流失的土地利用类型面积占比。为了分析比较优先小流域与非优先小流域土地利用分布差异,将耕地、园地和采矿用地等对水土流失影响较大的土地利用类型归为一类,简称耕地,是需要重点治理土地利用类型;将林地和草地等对水土流失影响较小的土地利用类型归为一类,简称林草地。分别统计耕地和林草地的面积占比。利用公式(2)分别标准化各小流域水土流失面积比例和耕地面积占比。

$$Z_i=\frac{x_i-m}{\delta} \tag{2}$$

式中:Z_i为标准化后的值;x_i为需要进行标准化的数值(如小流域水土流失面积比例);m 为所有小流域计算变量 x 的平均值;δ 为所有小流域计算变量 x 的标准差;i 为小流域序号。将标准化后的小流域水土流失面积比例和耕地面积占比相加得到综合判别指标。对该综合指标从大到小排序,然后从综合指标最大值开始进行相应小流域面积累加,得到累计小流域面积 P₂,当满足 P₂-P_i绝对值最小的条件时,停止累加。面积被累加的小流域即为优先小流域。

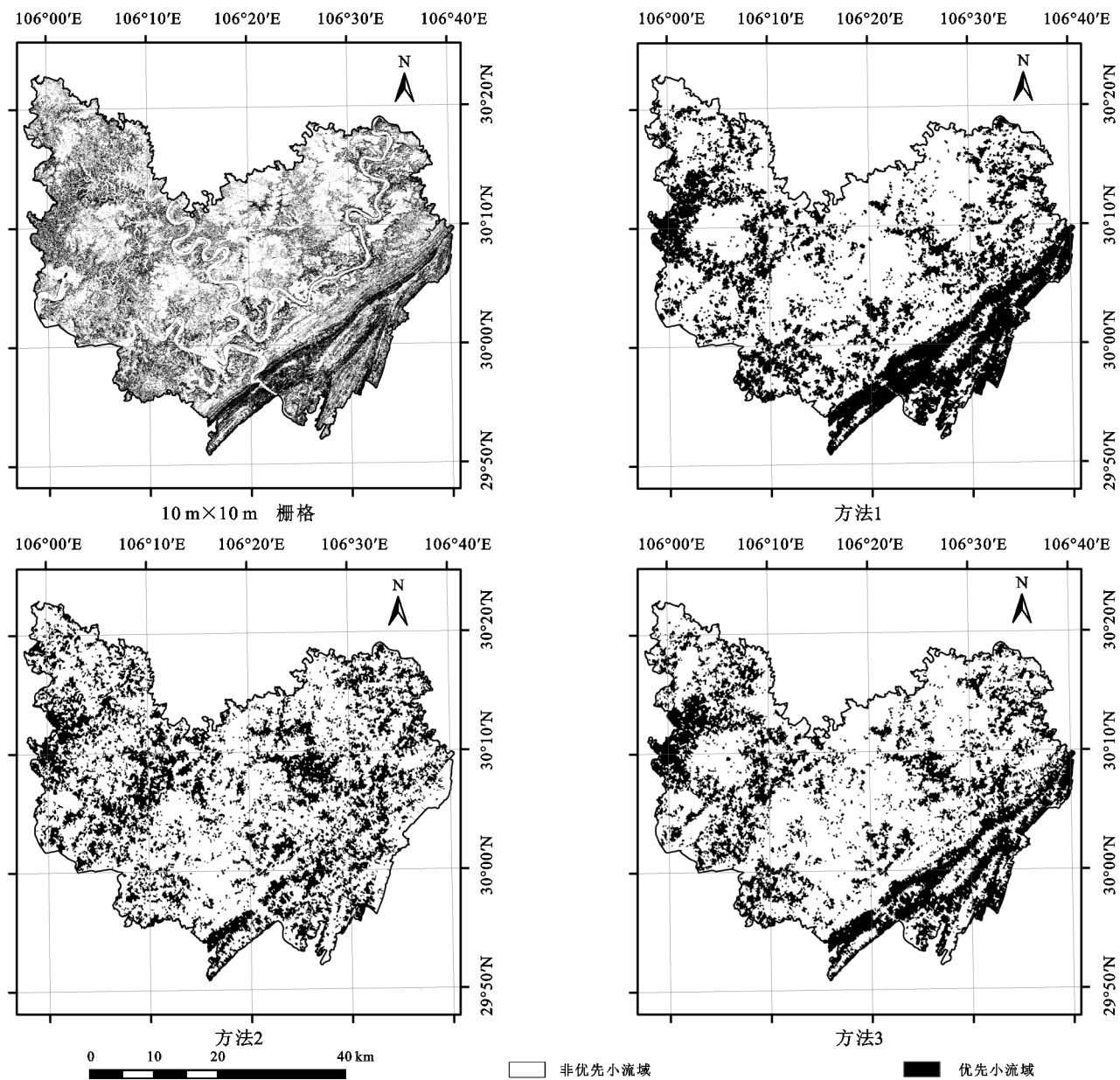
(3)坡度—水土流失面积法(方法 3)。在方法 2 综合指标的基础上,考虑小流域平均坡度对土壤侵蚀的影响。将各小流域利用公式(2)标准化后的平均坡度、水土流失面积比例和耕地面积占比相加,得到新的综合指标。对该综合指标从大到小排序,从综合指标最大值开始,累加相应的小流域面积,得到累计小流域面积 P₃,当满足 P₃-P_i绝对值最小的条件时,停止累加。面积被累加的小流域即为优先小流域。

3 结果与分析

3.1 优先小流域水土流失面积空间分布特征

采用水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法得到的研究区优先小流域个数分别为 10 179,10 609,10 219 个(图 3),分别占全县小流域总条数的 32%,33%,32%,水土流失面积比例分别为 18.5%,15.0%,17.6%。与县域 10 m 分辨率水土流失空间分布图相比,水土流失面积法和坡度—水土流失面积法识别的优先小流域,主要分布在西部和东南部,其中水土流失面积法识别的优先小流域在东南部更为集中。土地利用—水土流失面积法识别的优先小流域较为均匀地分布在除中部外的大部分区域,坡度—水土流失面积法识别的优先小流域与基于栅格的水土流失空间分布图更为接近。

3 种方法得到的优先小流域与非优先小流域平均水土流失面积比例明显不同(图 4)。水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法得到的优先小流域平均水土流失面积比例分别为 59%,48%,56%;而非优先小流域的平均水土流失面积占比分别为 18%,23%,19%。水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法得到的优先小流域水土流失面积比例的变差系数也不同,分别为 0.22,0.44,0.30。3 种识别方法中,水土流失面积法得到的优先小流域平均水土流失面积比例最高,非优先小流域平均水土流失面积比例则最低。土地利用—水土流失面积法得到的优先小流域平均水土流失面积比例最低,而非优先小流域平均水土流失面积比例最高。



注：方法 1,2,3 分别代表水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法。下同。

图 3 优先小流域与非优先小流域空间分布

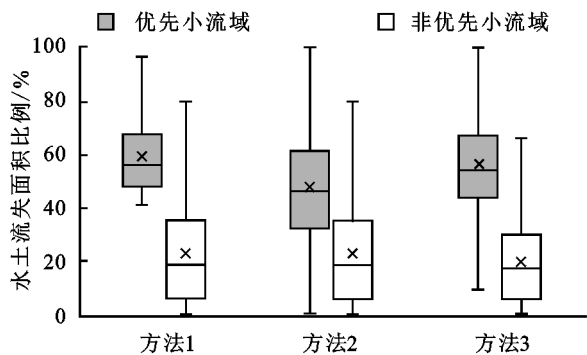


图 4 不同识别方法优先和非优先小流域水土流失面积占比

3.2 优先小流域土地利用分布特征

从图 5 可以看出,水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法识别的优先小流域耕地面积占比平均值分别为 0.36,0.61,0.47;而非优先小流域的耕地面积占比平均值分别为

0.59,0.47,0.54。可见,土地利用—水土流失面积法得到的优先小流域耕地面积占比最高,而非优先小流域耕地面积占比最低。由图 6 可知,水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法识别的优先小流域的林草地面积占比平均值分别为 0.55,0.34,0.48;非优先小流域的林草地面积占比平均值分别为 0.25,0.35,0.28。可见,土地利用—水土流失面积法识别的优先小流域林草地面积占比最低,而非优先小流域林草地面积占比最高。

3.3 优先小流域坡度分布特征

不同识别方法得到的优先小流域平均坡度明显高于非优先小流域(图 7)。水土流失面积法、土地利用—水土流失面积法和坡度—水土流失面积法识别的优先小流域平均坡度分别为 21.3°,19.5°,21.9°,非优先小流域的平均坡度为 9.4°,10.9°,9.4°。优先小流域的坡度变差

系数明显低于非优先小流域。水土流失面积法、土地利用一水土流失面积法和坡度一水土流失面积法识别的优先小流域平均坡度变差系数分别为 0.25,0.35,0.26,非优先小流域平均坡度变差系数为 0.55,0.63,0.55。

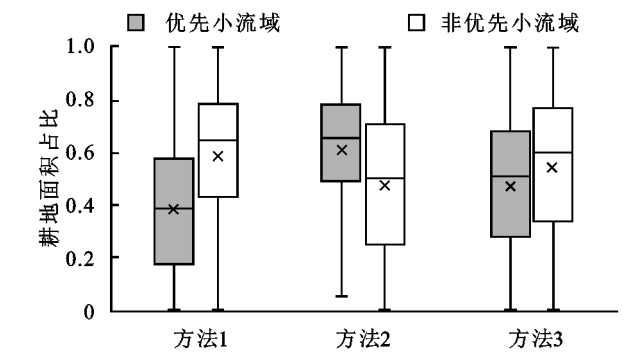


图5 不同识别方法优先小流域和非优先小流域耕地面积占比

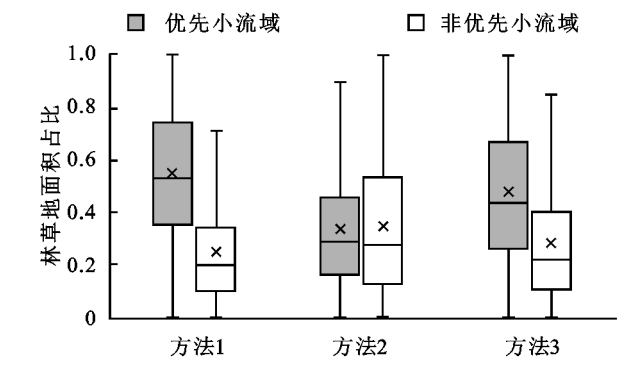


图6 不同识别方法优先和非优先小流域林草地面积占比

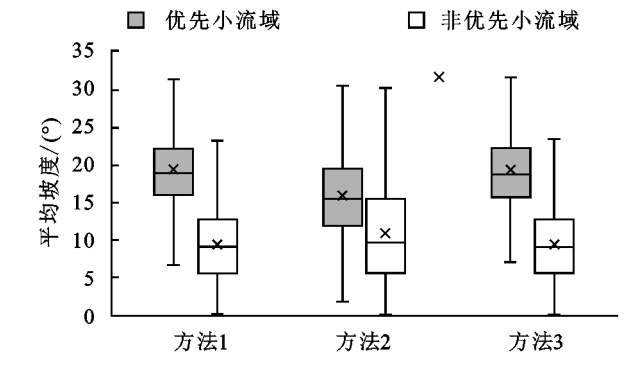


图7 不同识别方法优先小流域和非优先小流域平均坡度对比

4 结论与讨论

本研究以三峡库区重庆市合川区为例,从水土流失治理的角度,提出了水土流失面积法、土地利用一水土流失面积法和坡度一水土流失面积法 3 种优先小流域识别方法。识别结果表明,水土流失面积法仅考虑水土流失面积比例,得到的优先小流域平均水土流失面积占比最大(59%),但耕地、园地和采矿用地等人为活动影响大的土地利用类型面积占比最小(38%),而林草地面积较大。发生水土流失的林草地主要在陡坡和低覆盖度区域。这类土地的水土流失治理主要以封禁自然修复为主,不需要大量的资金投入。土地利用一水土流失面积法识别的优先小流域水土流失面积占比和平均坡度最小,耕地、园地和采

矿用地面积占比最大。坡度一水土流失面积法,综合考虑了水土流失面积占比、土地利用类型和坡度,避免了前 2 种方法的缺点,识别的优先小流域平均水土流失面积比例接近于仅考虑水土流失面积的识别方法,同时又将坡度较大以及耕地、园地和采矿用地面积占比较大的小流域识别出来,纳入优先小流域中,是 3 种方法中最优的识别方法。本研究结果可为三峡库区或同类型地区小流域水土流失治理规划与实施顺序决策等提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 王伟,王玲玲,范东明.黄土丘陵沟壑区典型治理小流域水沙输移的尺度效应[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):108-112.

[2] 赵秦丹.略论西北黄土高原的水土保持工作[J].黄河建设,1957(5):9-13.

[3] 水利部.水土保持小流域治理办法(草案)[J].山西水土保持科技,1980(1):17-20.

[4] 刘震.扎实推进水土保持生态清洁小流域建设[J].中国水土保持,2010(1):5-6,13.

[5] 柳林夏.新常态下生态清洁小流域建设思考[J].中国水土保持,2016(3):28-31.

[6] 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.

[7] 康贵良.天水市水土保持生态建设成效显著[J].中国水土保持,2016(1):33.

[8] 齐斐,胡续礼,刘霞,等.基于小流域划分的沂源县水土保持规划布局及措施配置[J].中国水土保持科学,2018,16(5):129-135,144.

[9] 姚孝友,袁利,吴迪,等.土地流转后农业经营模式转变下的小流域综合治理[J].中国水土保持,2015(9):15-17.

[10] 周萍,文安邦,贺秀斌,等.三峡库区循环农业及流域水土保持综合治理模式研究[J].中国水土保持,2010(10):5-7,71.

[11] 毛华平,杨兰蓉,许人骥,等.三峡水库库周生态屏障建设对策研究[J].水土保持学报,2014,28(1):63-68,72.

[12] 罗凤,郭宏忠.重庆市水土保持成效和新时代发展战略思考[J].中国水土保持,2018(12):42-45.

[13] 郭宏忠,冯明汉,赵健,等.三峡库区水土流失防治分区及防治对策[J].西南农业大学学报(社会科学版),2010,8(3):25-27.

[14] 曾肇京,王俊英.关于流域等级划分的探讨[J].水利规划,1996(1):1-5.

[15] Sheng T C, Barrett R E, Mitchell T R. Using geographic information systems for watershed classification and rating in developing countries [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1997,52(2):83-89.

- Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 212-220.
- [3] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J].*农业机械学报*, 2015, 46(7):146-153.
- [4] 周建斌.作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J].*植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1686-1693.
- [5] 付丽军,张爱敏,王向东,等.生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J].*中国土壤与肥料*, 2017(3):1-5.
- [6] 张迎春,顾建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(4):196-205.
- [7] 马征,董晓霞,张柏松.不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2018(5): 122-128.
- [8] 李庆国,张晓文.保水剂施用方式对杨树苗根系特性和生长及土壤酶活性的影响[J].*中国农学通报*, 2018, 35(14):1-5.
- [9] 李荣,夏雷,王艳丽,等.滴灌下施用保水剂对土壤水肥及玉米收益的影响[J].*排灌机械工程学学报*, 2018, 36(12):1338-1343.
- [10] 魏贤,李鹏飞,陈瑞环,等.环境友好型保水剂的合成、性能及应用[J].*水土保持通报*, 2018, 38(5):293-299.
- [11] Moghadam H R T. Super absorbent polymer mitigates deleterious effects of arsenic in wheat[J].*Rhizosphere*, 2017(3):40-43.
- [12] Fernando T N, Ariadurai S A, Disanayaka C K, et al. Development of radiation grafted super absorbent polymers for agricultural applications [J].*Energy Procedia*, 2017, 127:163-177.
- [13] 邢旭光,张盼,马孝义.掺混菜籽油渣减少土壤入渗改善持水特性[J].*农业工程学报*, 2017, 33(2):102-108.
- [14] 谭帅,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J].*土壤学报*, 2014, 51(2):263-269.
- [15] 张春强,冯浩.PAM 和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J].*水土保持学报*, 2013, 27(4):109-113,135.
- [16] Kim M, Song I, Kim M, et al. Effect of Polyacrylamide application on water and nutrient movements in soils[J].*Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 2015, 4(3):76-81.
- [17] 文利军,史文娟,庞琳娜.γ-聚谷氨酸对土壤水分入渗和水盐运移的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(3):76-80,87.
- [18] 史文娟,梁嘉平,陶汪海,等.添加 γ-聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J].*农业工程学报*, 2015, 31(23):94-100.
- [19] 刘乐,费良军,陈琳,等.γ-聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(1):277-282,287.
- [20] 王传海,何都良,郑有飞,等.保水剂新材料 γ-聚谷氨酸的吸水性能和生物学效应的初步研究[J].*中国农业气象*, 2004(2):20-23.
- [21] Xu Z, Wan C, Xu X, et al. Effect of poly (γ-glutamic acid) on wheat productivity, nitrogen use efficiency and soil microbes[J].*Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(3):744-755.
- [22] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].*土壤学报*, 2019, 56(1):227-241.
- [23] 曾健,费良军,陈琳,等.添加 γ-聚谷氨酸对土壤结构及持水特性的影响[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1): 217-224.
- [24] 脱云飞,王克勤,张丽娟,等.灌水定额对玉米膜孔灌土壤水氮运移转化试验研究[J].*水土保持学报*, 2015, 29(1):107-110.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国水利部水土保持司.土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [19] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].*中国水土保持科学*, 2015, 13(5):105-110.

(上接第 83 页)

[16] Silva R M D, 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 Tapacurá catchment [J]. *Natural Hazards*, 2012, 62(3):953-970.