水土流失综合治理优先小流域识别的空间尺度效应

符素华[1,2]，堪卓岚[1]，张志兰[3]，魏 欣[1]，蒋光毅[3]，赵 辉[4]，丁 琳[1]

(1.北京师范大学 地理科学学部，北京 100875；2.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；
3.重庆市水土保持监测总站，重庆 401147；4.水利部水土保持监测中心，北京 100053)

摘 要：[目的] 探讨水土流失综合治理优先小流域识别的空间尺度效应，为小流域水土流失综合治理规划与实施提供科学依据。[方法] 以重庆市合川区为例，利用小流域水土流失面积比例，不同土地利用类型比例和流域平均坡度计算了综合指标，用以识别 5 种流域空间尺度〔Ⅰ(流域面积范围 50～300 km^2)，Ⅱ(10～50 km^2)，Ⅲ(1～10 km^2)，Ⅳ(0.1～1 km^2)和Ⅴ级(0.01～0.1 km^2)〕的水土流失综合治理优先小流域。[结果] 流域空间尺度对优先小流域的识别有显著影响。基于Ⅳ和Ⅴ级流域确定的优先小流域在空间分布上与基于栅格土壤侵蚀强度图得到的区域水土流失面积空间分布更为吻合。[结论] 综合考虑优先小流域的条数，基于Ⅳ级流域得到的优先小流域条数更少，更便于进行水土保持综合治理规划和管理，是识别优先小流域的最优流域尺度。

关键词：水土流失综合治理；优先小流域；空间尺度效应；土壤侵蚀

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2020)02-0148-06 **中图分类号**：S157.1

文献参数：符素华，堪卓岚，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. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.021；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.

Scale Effect on Identifying Priority Watershed for Comprehensive Control of Soil and Water Loss

Fu Suhua[1,2], Shen Zhuolan[1], Zhang Zhilan[3], Wei Xin[1], Jiang Guangyi[3], Zhao Hui[4], Ding Lin[1]

(1. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;
2. *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, *China*;
3. *Chongqing Central Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing* 401147, *China*;
4. *Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing* 100053, *China*)

Abstract: [Objective] Identifying priority watershed for soil and water conservation is a premise for the watershed planning. The purpose of this study was to determine the scale effect of identifying the priority watershed. [Methods] Taking Hechuan District, Chongqing Ciyt as an example, the comprehensive indexes was calculated by using the proportion of soil and water loss area, the proportion of land use and the average slope of the basin for identifying the priority watershed. The scale changes from level Ⅰ (with watershed area ranged from 50 to 300 km^2), level Ⅱ (10～50 km^2), level Ⅲ (1～10 km^2), level Ⅳ (0.1～1 km^2) and level Ⅴ (0.01～0.1 km^2). [Results] The watershed scale had obvious effect on the identification of priority watershed. The distribution of priority watershed derived from level Ⅳ and Ⅴ was more similar to that of soil erosion area derived from soil erosion map in the Hechuan District. The average percentage area of soil loss, the mean proportion of cropland and mining land, and average slope gradient of the priority watersheds

收稿日期：2019-09-20 **修回日期**：2019-12-18
资助项目：中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目“流域土壤侵蚀过程模型”
第一作者：符素华(1973—)，女(汉族)，四川省岳池县人，博士，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀机理与模型研究。Email：suhua@bnu.edu.cn。

from the level Ⅳ and Ⅴ were clearly greater than those from the other levels. [Conclusion] The number of the priority watershed from the level Ⅳ was less than that from the level Ⅴ. The level Ⅳ was the best watershed scale for identifying the priority watersheds. It will aid in the management and planning of the priority watershed based on the level Ⅳ watershed.

Keywords: soil and water conservation; priority watersheds; spatial scale; soil erosion

小流域是完整、独立的水文单元,具有完整的产沙输沙系统,是我国水土流失治理和水资源管理的基本单元。以小流域为单元的水土流失综合治理是我国水土保持工作的重要途径[1]。我国于 1980 年正式提出以小流域为单元进行水土保持综合治理[2]。30 a来,我国已对上万条小流域进行了综合治理,每年治理面积达 2.00×10^4 km^2[3]。长期的小流域综合治理实践积累了丰富的经验[4-5],并形成了一套小流域综合治理的相关法律、法规和技术规程体系,为小流域综合治理措施设计、审查、验收等环节提供了技术支持,使我国的小流域综合治理取得了明显生态效益、社会效益和经济效益[6-9]。2018 年,我国首次开展了国土面积全覆盖的水土流失动态监测,获取了以县级行政区为评价单元,10 或 30 m 分辨率的土壤侵蚀强度成果。如何有效利用水土流失动态监测成果为小流域综合治理服务,除了需要辨识各小流域的土壤侵蚀严重程度,确定出优先治理小流域外,合理确定开展水土流失综合防治的小流域空间尺度也是一个关键问题。但目前不同学者使用不同的流域尺度来评价优先流域。如 Silva 等[10]利用最小流域面积为 14 km^2 的流域评价了巴西 Tapacurá 流域内 14 个子流域的土壤侵蚀严重程度,识别了需要进行治理的优先小流域。Zhao 等[11]采用的最小流域面积为 50 km^2,评价了需要进行河岸缓冲修复的优先小流域。Shen 等[12]则利用三种不同的流域尺度(最小流域面积分别为 15,25 和 50 km^2)来确定面源污染源治理的优先小流域;Ahn 和 Kim[13]采用了最小流域面积约 150 km^2 的流域来评价需要考虑生态修复的优先小流域。这些研究现状表明,研究者往往根据情况自行确定优先小流域的面积,最小流域面积从几平方公里到几十平方公里不等。但具体什么尺度的小流域更能反映区域土壤侵蚀的状况,在哪种流域尺度进行水土保持综合治理,可以投入更少的人力、物力和财力,从而产生最大的经济、生态和社会效益,相关研究还较少。鉴于此,本研究以位于三峡库区腹地的重庆市合川区为例,探讨水土流失综合治理优先小流域识别的空间尺度效应,为小流域水土流失综合治理规划与实施提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　数据来源

本研究选择重庆市合川区为研究区域,其行政面积为 2 343 km^2。合川区位于长江上游地区,在重庆市西北部,处于丘陵和平行岭谷的交接地带。耕地占总面积的 47.27%,是最主要的土地利用类型。坡度集中在 8°～ 25°,占区行政面积的 43%。水土流失面积为 736 km^2,占区行政面积的 31%,是重庆市水土流失较为严重的行政区。基于重庆市 2018 年区域水土流失动态监测的成果,收集了研究区域 2018 年土壤侵蚀地块矢量数据(里面包含有土地利用数据)、10 m×10 m DEM 和土壤侵蚀强度栅格数据。为了探究不同流域空间尺度对水土流失综合治理优先小流域识别的影响,本研究选择的流域最大面积为 300 km^2。其选择依据如下:大部分水文站的流域控制面积在 300 km^2 以上[14]。这说明 300 km^2 以下的流域不是水文部门关心的主要区域,水土保持部门应该加强这些流域的管理与规划。因此可以探讨 300 km^2 以下的流域面积下,流域空间尺度对水土流失综合治理优先小流域识别的影响。结合《小流域划分及编码规范》[15]中小流域分级所用的控制面积,本研究考虑了 5 种空间尺度的流域,流域面积分别为 50～300 km^2(Ⅰ级流域),10～50 km^2(Ⅱ级流域),1～10 km^2(Ⅲ级流域),0.1～1 km^2(Ⅳ级流域)和 0.01～0.1 km^2(Ⅴ级流域)。考虑到本研究中的流域已包含了微流域和小流域等级别,为简化名称,所有级别的流域均统称为小流域。合川区Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ和Ⅴ级小流域的条数分别为 26,140,919,9 647 和 31 834 条。其中Ⅰ,Ⅱ级小流域直接采用重庆市小流域划分成果,Ⅲ,Ⅳ和Ⅴ级小流域采用符素华等[16]的坡面土壤侵蚀地形因子工具的子流域划分模块提取,数据基础是 10 m 分辨率 DEM。

1.2　优先小流域识别方法

基于水土流失综合治理的优先小流域识别主要考虑了水土流失面积比例、土地利用结构和流域平均坡度 3 个指标。主要原因如下:①水土流失面积比例直接反映了各小流域水土流失的剧烈程度,这是决定小流域是否要进行综合治理的直接依据。②小流域

水土流失综合治理的对象主要是对人类活动所导致的加速侵蚀及其相应土地利用方式。为了识别优先小流域和非优先小流域土地利用结构上的差异，将土地利用类型简单分为易发生水土流失的农地（含园地）和在建生产建设活动用地，以及不易发生水土流失的林草地。这样可以更为突出人类活动对水土流失的影响。③坡度对土壤侵蚀和土地利用的分布都有重要影响，因此也将其作为优先小流域识别指标之一。

优先小流域识别步骤为：①基于 10 m 分辨率栅格的土壤侵蚀强度图汇总统计出整个合川区的水土流失面积及比例；②在土壤侵蚀强度、土地利用和坡度等数据的基础上，结合小流域矢量图，分别统计小流域水土流失面积及其比例，各土地利用在小流域的面积占比和流域平均坡度；③将这 3 个指标进行标准化处理，同一流域的 3 个标准化指标相加，得到优先小流域识别综合指标；④对该综合指标从大到小排序；⑤从综合指标最大值开始，累加相应的水土流失面积比例，当累计水土流失面积比例等于县域水土流失面积比例时，停止累加。面积被累加的小流域即为水土流失综合治理优先小流域。

2 结果与分析

2.1 优先小流域分布的空间效应

按Ⅰ—Ⅴ级 5 种空间尺度识别的优先小流域在县域内均呈离散分布（图 1），获得的优先小流域分别为 11，40，292，3 095 和 10 219 条。其中基于Ⅰ，Ⅱ和Ⅲ级小流域空间尺度得到的优先小流域相对比较集中，主要分布在合川区的东南及西北部；基于Ⅳ和Ⅴ级空间尺度得到的优先小流域分布差异不大，更符合基于栅格土壤侵蚀强度图得到的水土流失面积空间分布。

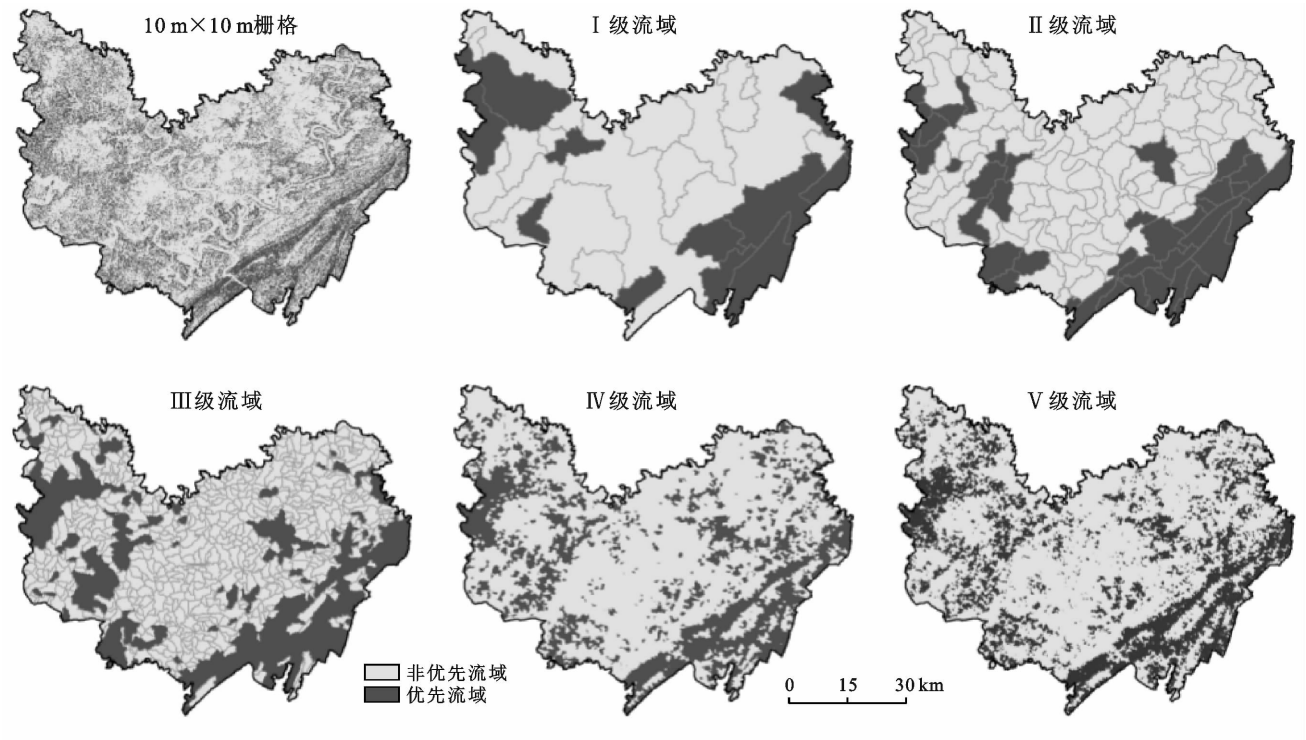


图 1 5 种空间尺度对应的优先小流域分布情况

Ⅰ—Ⅴ级优先小流域平均水土流失面积比例分别为 43%，47%，48%，53% 和 56%（图 2），相应的非优先小流域平均水土流失面积比例分别为 24%，24%，23%，21% 和 19%。这表明基于小流域水土流失面积比例、土地利用面积占比和流域平均坡度识别的优先小流域和非优先小流域平均水土流失面积比例存在显著差异。优先小流域平均水土流失面积比例明显高于非优先小流域。小流域级别越高，空间尺度（流域面积）越小，识别的优先小流域平均水土流失面积比例越大，非优先小流域的水土流失面积比例越小，且两者差异亦随小流域级别的增高而增大。这些结果表明级别越高，面积越小的小流域能更好地辨识优先小流域和非优先小流域，且辨识出的优先小流域存在严重的水土流失，更亟需进行水土保持治理。如由Ⅳ级小流域得到的优先小流域平均水土流失面积比例为 53%，远高于合川区的水土流失面积比例（31%），是亟需进行水土保持综合治理的小流域。而空间尺度（流域面积）越大，流域内非水土流失面积区域就越多，导致小流域平均水土流失面积比例减小，不适宜在此基础上进行治理规划。

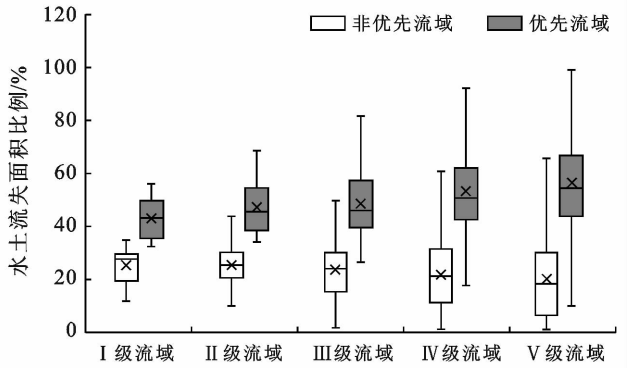


图 2　不同空间尺度下小流域的水土流失面积比例

2.2　优先小流域土地利用分布的空间效应

Ⅰ—Ⅴ级优先小流域中农地和在建生产建设活动用地面积占比均值分别为 0.45,0.43,0.45,0.47 和 0.47,非优先小流域中农地和在建生产建设活动用地面积占比均值分别为 0.60,0.56,0.57,0.56 和 0.54(图 3)。即由Ⅳ和Ⅴ级小流域得到的优先小流域农地和在建生产建设活动用地面积占比略高于其他 3 个级别的小流域;而非优先小流域则正好相反。另外值得注意的是非优先小流域中农地和在建生产建设活动用地面积占比明显高于优先小流域。这是因为非优先小流域主要位于坡度较小的区域,因此其在土地利用上农地和在建生产建设活动用地面积,尤其是农地的面积占比更大。

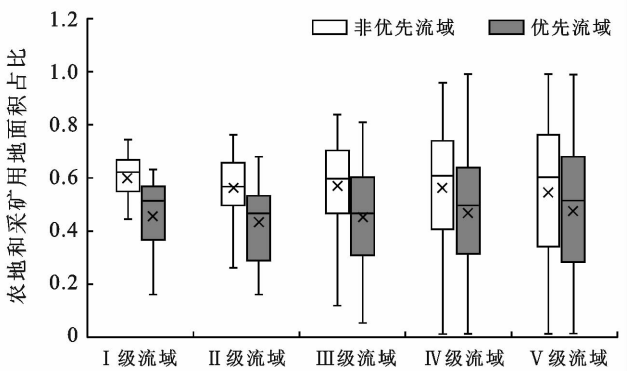


图 3　不同空间尺度下小流域中农地和在建生产建设活动用地面积占比

Ⅰ—Ⅴ级优先小流域中林草地面积占比均值分别为 0.47,0.49,0.49,0.48 和 0.48,非优先小流域中林草地面积占比均值分别为 0.28,0.27,0.27,0.28 和 0.28(图 4)。不同级别空间尺度识别到的优先小流域中林草地面积占比差异不大。

2.3　优先小流域坡度分布的空间效应

坡度是影响土壤侵蚀和土地利用空间分布的一个重要因素。坡度越大,水土流失的面积、强度都可能更大。按Ⅰ—Ⅴ级 5 种空间尺度识别的优先小流域的平均坡度分别为 16.7°,17.5°,18.0°,18.9°和 19.3°;而非优先小流域的平均坡度分别为 10.6°,10.4°,10.0°,9.7°和 9.4°(图 5)。优先小流域的平均坡度随流域级别增加(流域面积减小)呈现出增大趋势,而非优先小流域的平均坡度随流域级别增加(流域面积减小)呈现出减小趋势。在流域级别相同的情况下,优先小流域的平均坡度均明显大于非优先小流域。流域级别越高,优先小流域与非优先小流域之间的平均坡度差异越大。如Ⅰ和Ⅴ级小流域识别的优先小流域与非优先小流域平均坡度分别相差 6.1°和 9.9°。由此可见,相对于Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ级小流域,Ⅳ和Ⅴ级小流域空间尺度更好地区分了易发生和不易发生水土流失的区域,更适合用于优先小流域的确定。

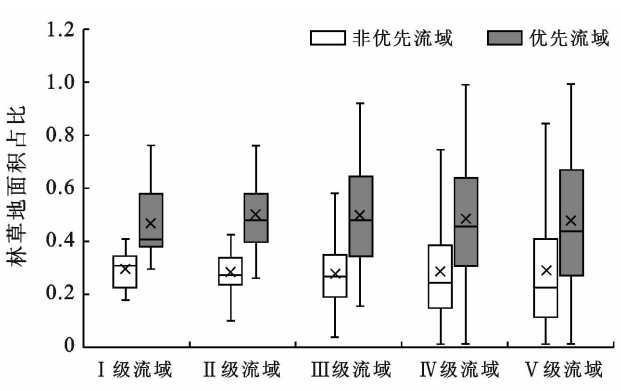


图 4　不同空间尺度下小流域中林草地面积占比

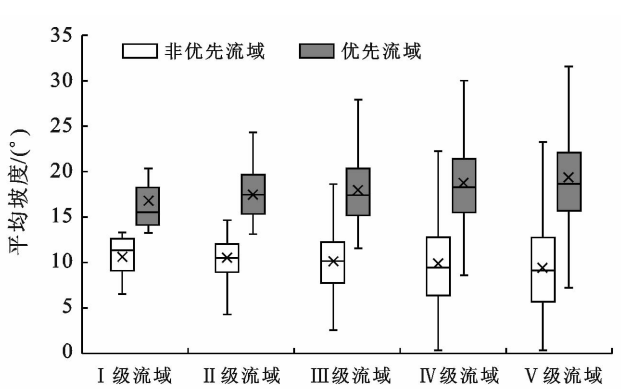


图 5　不同空间尺度下小流域的平均坡度

2.4　最优空间尺度确定

在Ⅰ—Ⅴ级 5 种空间尺度下识别出的优先小流域平均水土流失面积比例、土地利用面积占比以及平均坡度在空间分布上显现出尺度效应。其中,Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ级空间尺度下识别出的优先小流域分布较为集中,与基于栅格土壤侵蚀强度图确定的区域水土流失面积空间分布差异较大。Ⅳ和Ⅴ级空间尺度下识别出的优先小流域在空间分布上差异不大,与基于栅格

土壤侵蚀强度图确定的区域水土流失面积空间分布较吻合。尽管Ⅴ级较Ⅳ级优先小流域的平均水土流失面积比例、农地和在建生产建设活动用地面积占比以及平均坡度略高，但基于Ⅴ级流域得到的优先小流域条数(10 219条)是基于Ⅳ级流域得到的优先小流域条数(3 095条)的3倍，不便于水土保持规划和小流域管理。因此在Ⅳ级空间尺度下确定优先小流域更为合理。确定出的优先小流域具有比非优先小流域更容易发生水土流失的条件(流域平均坡度更大)，水土流失更严重(水土流失面积比例高)，是水土保持综合治理需要优先考虑的小流域。

为了更进一步确定优先小流域治理的先后顺序，可以根据综合指标值的大小来决定。将综合指标值从大到小进行排序，即可确定优先小流域治理的优先等级(表1)。表1中列出了基于Ⅳ级小流域计算的综合指标值排名前10的小流域排序结果。序号为1号的小流域综合指标值为6.14，明显高于其他流域，且该流域水土流失面积占比高达92%，流域内农地和在建生产建设活动用地面积占比很高(85%)，且平均坡度大(29°)，是应最先实施综合治理的小流域。

表1 优先小流域等级排序

优先小流域优先等级排序	流域面积/km^2	综合指标值	小流域水土流失面积比例/%	农地和在建生产建设活动用地面积占比/%	小流域平均坡度/(°)
1	5.78	6.14	91.9	84.8	28.7
2	2.60	5.87	86.5	95.7	25.7
3	4.60	5.82	82.6	95.5	26.6
4	4.78	5.71	89.7	75.3	28.8
5	2.90	5.42	91.7	82.4	24.2
6	3.16	5.40	81.1	96.8	23.7
7	6.63	5.29	84.8	85.5	24.8
8	7.65	5.22	83.4	86.8	24.4
9	4.31	5.18	93.5	42.4	32.4
10	4.35	5.17	88.2	57.6	30.1

此外，本研究采用综合指标值来确定小流域水土流失综合治理的优先顺序，具有一定的科学性和合理性。如序号为6号的小流域水土流失面积比例最小，为81.1%；序号为9号的小流域水土流失面积比例最大，为93.5%。单从该指标来看，9号小流域的水土保持治理优先级应大于6号小流域。但由于6号小流域的农地和在建生产建设活动用地面积占比(96.8%)远高于9号小流域(42.4%)，进而提高了6号小流域的治理优先级。6号小流域的综合指标值为5.40，大于9号小流域(5.18)，应优先治理6号小流域。由此可见，综合指标值因综合考虑了小流域水土流失面积比例、土地利用类型和平均坡度，不失为一个较好的优先小流域的判别标准。

3 讨论与结论

本研究提出了确定优先小流域的最优空间尺度。结果表明，流域空间尺度对优先小流域的识别有显著影响。基于Ⅰ级流域(50～300 km^2)、Ⅱ级流域(10～50 km^2)和Ⅲ级流域(1～10 km^2)确定的优先小流域在空间分布上与基于栅格土壤侵蚀强度图得到的区域水土流失面积空间分布差异较大，得到的小流域平均水土流失面积比例，农地和在建生产建设活动用地面积占比以及平均坡度都更低；而基于Ⅳ级流域(0.1～1 km^2)和Ⅴ级流域(0.01～0.1 km^2)确定的优先小流域在空间分布上与基于栅格土壤侵蚀强度图得到的区域水土流失面积空间分布更为吻合，小流域水土流失更为严重(平均水土流失面积比例更大)，需要重点治理的土地利用类型(耕地、园地和在建生产建设活动用地)面积占比更多，平均坡度更大。但综合考虑优先小流域的条数，基于Ⅳ级流域得到的优先小流域条数更少，更便于进行水土保持综合治理规划和管理，是识别优先小流域的最优流域尺度。本研究结果可为小流域水土流失综合治理规划与实施提供科学依据，对全国水土流失动态监测成果的推广与应用提供了技术基础。

需要注意的是本文提出的优先小流域确定方法具有普适性，但本文选择的研究区域是平均坡度较大的丘陵和平行岭谷的交接地带，因此本研究结果在其他地区如高山峡谷以及漫岗丘陵等地区的适用性需进一步探讨。

[参 考 文 献]

[1] 钱正英.把小流域治理引向商品经济大道[J].中国水土

保持,1992(12):5-9,67.

[2] 张新玉,杨元辉.我国水土保持小流域综合治理模式研究[J].中国水利,2011(12):58-61.

[3] 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.

[4] 刘震.坚持成功经验 不断开拓创新 努力提高小流域综合治理水平[J].中国水土保持,2008(4):1-3,10.

[5] 段巧甫,郭廷辅.从西北五省区水土保持经验看西部生态环境建设[J].中国水土保持,2002(1):6-8,45.

[6] 董仁才,余丽军.小流域综合治理效益评价的新思路[J].中国水土保持,2008(11):22-24.

[7] 梁会民,赵军.小流域综合治理的生态经济效益评估研究[J].生态经济,2001(8):12-14.

[8] 阎文哲,赵光耀,马国力.黄河流域水土保持综合效益分析[J].人民黄河,1996(5):7-11,39,61-62.

[9] 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.

[10] Silva R M D, Montenegro S M G L, Santos C A G E. 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.

[11] Zhao P, Xia B, Hu Y, et al. A spatial multi-criteria planning scheme for evaluating riparian buffer restoration priorities [J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 155-164.

[12] 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.

[13] Ahn S R, Kim S J. Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration priorities [J]. Environmental Modelling & Software, 2017,22:1-19.

[14] 中华人民共和国水利部. SL34-92 水文站网规划技术导则[S].北京:水利电力出版社,1992.

[15] 中华人民共和国水利部. SL653-2013 小流域划分及编码规范[S].北京:中国水利水电出版社,2013.

[16] 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 147 页)

[21] Wang Miaomiao, Chen Hongsong, Zhang Wei, et al. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, Southwest China [J]. The Science of the Total Environment, 2018,619-620.

[22] 杜宁宁,邱莉萍,张兴昌,等.半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):73-78.

[23] 李欣雨,夏建国,鄢广奎,等.名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):224-230,238.

[24] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.

[25] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1881-1891.

[26] 马芊红,张光辉,耿韧,等.黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].水土保持研究,2018,25(4):30-35,42.

[27] 李慧,王百田,刘涛.晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化[J].林业科学研究,2016,29(4):587-595.

[28] 李海强,郭成久,蔡楚雄,等.水土保持措施对坡耕地土壤养分时空变异影响[J].土壤通报,2017,48(3):707-714.

[29] 王霖娇,汪攀,盛茂银.西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(18):6580-6593.

[30] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(3):80-92.

[31] 许宇星,王志超,竹万宽,杜阿朋.雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征[J].云南农业大学学报(自然科学版),2019,34(3):486-493.

[32] 杨巧云,赵允格,包天莉,等.黄土丘陵区不同类型生物结皮下的土壤生态化学计量特征[J].应用生态学报,2019,30(8):2699-2706.

[33] 杜映妮,李天阳,何丙辉.长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C,N,P 和 K 化学计量特征[J/OL].环境科学:1-12[2019-09-19]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201907098.