

基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀制图研究

李 骛^{1,2}, 顾治家³

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 3. 信阳师范学院 地理科学学院, 河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的] 开展水土流失调查, 提取和制作必需的数据、图件及相关资料, 实现水土流失调查对县域水土保持规划的全面支撑。[方法] 基于黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县小流域划分, 开展土壤侵蚀严重指数图、土壤侵蚀强度图和水土流失面积比例图的对比分析。[结果] 基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀图具有明显的比较优势: ①该图能够综合反映县域水土流失的面积、强度和分布, 并定量、精准地落实到水蚀单元——小流域上; ②基于该图, 能够直接生成规划必需的水土流失重点防治区分布图、水土流失防治格局图和重点项目分布图; ③基于该图, 结合小流域土壤侵蚀强度图, 可为小流域尺度上、治理模式层面的措施典型设计及其配置提供落实到地块的基础数据。[结论] 从开展水土流失调查, 划定水土流失重点预防区和重点治理区、全面支撑水土保持规划的全流程角度分析, 基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀制图具有更好的比较优势。

关键词: 县域; 小流域; 土壤侵蚀严重指数; 土壤侵蚀制图

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0196-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 李骛, 顾治家. 基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀制图研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 196-200. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200908.001; Li Ao, Gu Zhijia. Soil erosion mapping at county scale based on index of soil erosion severity of small watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 196-200.

Soil Erosion Mapping at County Scale Based on Index of Soil Erosion Severity of Small Watersheds

Li Ao^{1,2}, Gu Zhijia³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory for Synergistic Prevention of Water and Soil Environmental Pollution, School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang, He'nan 464000, China)

Abstract: [Objective] A soil and water loss survey was conducted. The necessary data, the maps, and other relevant data were obtained to provide comprehensive support for water and soil conservation plans at county scale. [Methods] Based on the small watershed division in Baiquan County, Qiqihar City, Heilongjiang Province, a comparative analysis was used for soil loss mapping using the indices of soil erosion severity, soil erosion intensity, and the proportions of soil and water loss areas. [Results] Mapping based on the index of the soil erosion severity of a small watershed had obvious comparative advantages. ① The map can comprehensively reflect the area, intensity, and distribution of soil and water loss in the county. These can be implemented quantitatively and accurately to the water erosion unit—the small watershed. ② Based on this map, the distribution map of key prevention and control areas of soil and water loss, soil and water loss prevention, and the control layout map and major projects distribution map can be created directly. ③ The

收稿日期: 2020-05-18

修回日期: 2020-07-01

资助项目: 国家重点研发计划项目“东北黑土区坡面水土流失综合治理技术”(2018YFC0507004)

第一作者: 李骛(1992—), 男(汉族), 陕西省杨陵区人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: 1023174810@qq.com。

通信作者: 顾治家(1987—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 讲师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: gu.ya.nan@163.com。

map, combined with the soil erosion intensity map of small watersheds, can provide necessary data for typical measure designs and configurations on a small watershed scale. Those data can be implemented to every plot. [Conclusion] From the perspective of carrying out a soil and water loss survey, delimitation of key prevention and control areas of soil and water loss, and comprehensively supporting the whole process of soil and water conservation planning, the county scale soil erosion mapping based on the index of the soil erosion severity of a small watershed has better comparative advantages.

Keywords: county scale; small watershed; index of soil erosion severity; soil erosion mapping

土壤侵蚀图是综合反映一定空间范围侵蚀强度、面积和分布的一种载体。良好的土壤侵蚀图能够直观清楚地表征区域侵蚀的属性及其特征,既突出显示侵蚀分布的整体性特征,又精确体现侵蚀强度的差异化特征,亦明确指示水土流失防治的总格局特征。

对于区域土壤侵蚀制图,中国基于不同时期的调查方法,选择了针对性的方法。20世纪80和90年代的2次普查,分别基于MSS和TM遥感影像,结合地貌地形、岩性、植被覆盖和土地利用等确定侵蚀图斑、评价侵蚀强度,其基础地理底图比例尺分别为1:50万和1:10万,省级和全国的侵蚀图都是通过一系列复杂的制图综合后得到^[1-4];2011—2013年的第一次全国水利普查,基于分层不等概系统抽样方法确定的野外调查单元得到的侵蚀模数,以水土流失面积比例为指标、通过空间插值及叠加运算得到侵蚀图^[5];2018—2019年的全国水土流失年度动态监测,基于高分遥感影像的栅格和野外抽样调查验证,计算侵蚀模数,绘制土壤侵蚀图,并开展侵蚀强度评价^[6-7]。美国基于抽样调查及其统计学原理,利用USLE计算样点所在农耕地侵蚀量,编制州、大区和全国尺度的农地侵蚀量点图和超过土壤流失容许速率的农地侵蚀量点图^[8-10]。欧洲采用USLE计算侵蚀模数,采用因子分级打分法评价潜在危险性和实际危险性并进行制图^[11]。澳大利亚以USLE为基础,在全国范围内划分网格,完成片蚀、细沟侵蚀和沟蚀的调查与定量评价,进行土壤侵蚀风险制图^[12]。

上述的区域土壤侵蚀制图方法虽然适应了当时侵蚀调查方法,也部分地反应了侵蚀强度(或危险性、流失量级)的区域分布,但总存在难以满足水土保持规划的需要,如:限于图幅大小,难以在图面上准确表达重点预防区、治理区和重点项目分布。基于流失面积比例、通过空间插值制作的图件,难以反映侵蚀强度的区间差异,无法支撑重点项目格局图的制作。美国土壤侵蚀调查集中于农耕地,土壤侵蚀图体现土壤流失量及对农地的危害,无法把土壤侵蚀面积、强度等落实到小流域或地块等治理对象上。欧洲和澳大利亚的调查欠缺水土保持措施且因子不全,无法像野

外抽样调查一样获得林下植被盖度,影响侵蚀制图的准确性。为全面支撑和实现水土保持法关于开展水土流失调查、做好水土保持规划的要求,在黑龙江省拜泉县土壤侵蚀调查基础上,本文研究提出基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀制图及水土保持规划必需图件编制方法,为进一步推动区域土壤侵蚀调查与制图工作提供借鉴和参考。

1 研究区概况

拜泉县位于黑龙江省的中西部,总面积约3 597 km²,地理位置为125°30′—126°31′E,47°20′—47°55′N,地处小兴安岭余脉向松嫩平原过渡的地带,属于东北漫川漫岗区,浅山区、低丘陵比例很大。属于典型的中温带大陆性季风气候,多年平均气温1.2℃、年均降水490 mm。土壤主要包括黑土、黑钙土、草甸土、沼泽土和盐土等,黑土为主要的耕作土壤。原始植被早已破坏殆尽,整体上具有从森林和草甸草原或草原化草甸交错分布的特点。在各类土地利用中,耕地所比例最大,为72.8%,其次为林地,为13.9%,再次为居民点,为5.0%。全县水土保持工程措施主要包括水保林、梯田、地埂植物带、等高改垄,耕作措施主要是等高沟垄种植。拜泉县曾是黑龙江省水土流失最严重的县份之一,自上世纪80年代进行生态农业建设和水土保持治理以来,生态环境发生了根本性变化。

2 研究方法与资料

2.1 土壤侵蚀调查方法

2.1.1 土壤侵蚀模数计算方法 土壤侵蚀模数计算采用中国土壤流失方程CSLE(Chinese soil loss equation)^[13],其结构形式如下:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中:A为土壤水蚀模数[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和S为坡长和坡度因子,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。

2.1.2 土壤侵蚀调查与参数计算方法

(1) 降雨侵蚀力因子 $R^{[14]}$ 。搜集黑龙江省及其周边地区共 46 个气象站、1986—2015 年的逐日雨量资料,通过地统计插值得到分辨率为 30 m 的全省 24 个半月降雨侵蚀力比例栅格图和年降雨侵蚀力栅格图。在此基础上,用矢量图裁切得到拜泉县年降雨侵蚀力和 24 个半月降雨侵蚀力比例的栅格图。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。采用了第一次全国水利普查的 K 值成果。其值是根据土壤属性,分别采用 Wischmeier^[15] 和 Williams^[16] 的 K 值公式计算。

(3) 坡长因子 L 和坡度因子 S 。由 1:50000 地形图等高线转换得到全县 DEM,然后生成分辨率为 30 m 的栅格图。基于“土壤侵蚀模型地形因子计算工具”^[17] 求得坡长因子与坡度因子。

(4) 植被覆盖与生物措施因子 B 。利用 2015—2017 年的 MODIS 归一化植被指数产品和 TM 多光谱影像,采用融合计算方法,得到 24 个半月 30 m 分辨率的植被覆盖度图,结合 24 个半月降雨侵蚀力因子比例计算 B 因子^[5]。

(5) 工程措施因子 E 。基于 2016 年覆盖研究区域的资源三号卫星(ZY-3)影像解译及野外调查获得工程措施类型,借鉴《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》工程措施因子值表直接赋值。

(6) 耕作措施因子 T 。 T 值与 E 值类似,根据耕作措施类型查找耕作措施因子值表直接赋值。研究区水土保持耕作措施主要是等高沟垄种植,对应 T 值直接赋值为 0.251。

2.2 小流域划分方法

基于上述的 DEM,按照 SL 653-2013《小流域划分及编码规范》的规定和要求^[18],进行拜泉县小流域划分,得到 306 个小流域。面积最小的为 2.06 km²,最大的为 45.48 km²,平均值为 11.75 km²,中值为 9.16 km²。

2.3 土壤侵蚀严重指数计算

土壤侵蚀严重指数用区域各类各级侵蚀强度面积的加权平均数表示,计算方法如下^[19]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^6 (M_i \cdot A_i)}{A} \quad (2)$$

式中: I 为土壤侵蚀严重指数; M_i 为某级别土壤侵蚀强度的权重。微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈等强度等级的取值分别为 0,1.5,3,6,12,24; A_i 为第 i 级强度的土壤侵蚀面积; A 为各级侵蚀强度的总面积(区域总面积), $A = \sum A_i$; i 为土壤侵蚀强度等级,微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈等侵蚀强

度等级的取值分别为 1,2,3,4,5,6。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀强度及其分布图

对采集和计算所得侵蚀因子进行重采样,生成大小为 30 m 的栅格图。将各图层(因子值)按照栅格相乘得到覆盖全县的每个栅格的侵蚀模数,依据 SL 190-2007《土壤侵蚀分类分级标准》对每个栅格进行侵蚀强度分级,制图得到以 30×30 m 栅格为单元的土壤侵蚀强度图(见封 2,附图 8)。

全县土壤侵蚀微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈的侵蚀面积分别为 1 859.63,1 537.39,155.86,30.54,11.85,1.73 km²。可见,拜泉县水土流失面积(轻度及其以上强度的侵蚀面积之和)为 1 737.37 km²,占全县总土地面积的 48.30%。在水土流失面积中,轻度侵蚀为绝对多数,其次为中度侵蚀,强烈、极强烈和剧烈侵蚀都非常少。

附图 8 可基本上反映如上所述的各级侵蚀强度面积的总体比例,可较清楚地表达各级侵蚀强度的总体分布,如微度主要分布于西南、西北部平原区和靠近河流的低洼区,中度主要分布于西南和西北部、紧邻微度的区域,极强烈和剧烈主要分布于东南部丘陵台地区和西北及中部的漫岗丘陵区。

3.2 小流域水土流失面积比例图

基于全县 306 个小流域土壤侵蚀的强度和面积,计算每个小流域的水土流失面积比例(轻度及其以上强度的侵蚀面积之和占小流域面积的百分比),按 <20%,20%~30%,30%~40%,40%~50%,>50% 的 5 个级别对小流域进行分级,制图得到以小流域为单元的水土流失面积比例图(见图 1)^[20]。

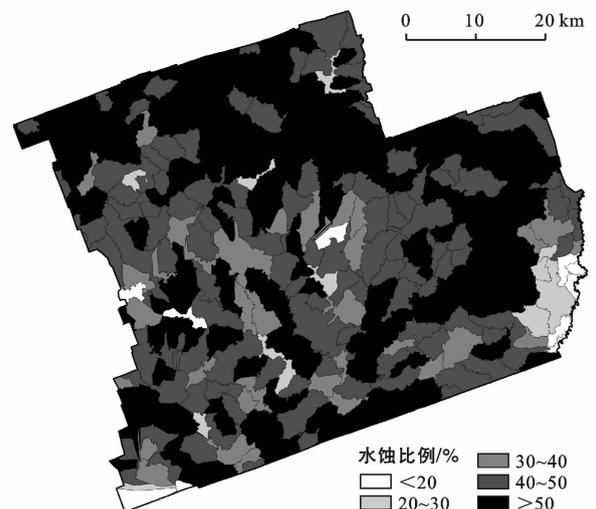


图 1 拜泉县水土流失面积比例

全县所有小流域的水土流失面积比例介于0%~74.26%之间,平均值为47.84%,<20%,20%~30%,30%~40%,40%~50%,>50%级别的小流域分别为10,10,33,110,143个,呈现偏向比例较大级别的分布态势。可见,在全部小流域中,以水土流失面积比例更高的为主,比例越高的越多。

图1可基本上反映如上所述的各级水土流失比例小流域的总体比例,可清晰表达全县水土流失比例小流域的总体分布。其分布特征主要为:水土流失面积比例呈现由西南向东北不断增加的态势;水土流失面积比例<20%和20%~30%的小流域集中分布在西南部的平原区和东南角的沿岸低洼易涝区,比例30%~40%的小流域主要分布在前两者的周边和中部的漫岗丘陵区,40%~50%和>50%的集中分布在东南部丘陵台地区和西北部的漫川漫岗区。

3.3 小流域土壤侵蚀严重指数及其分布图

基于全县306个小流域的土壤侵蚀强度和面积,计算每个小流域的土壤侵蚀严重指数,并按0~0.5,0.5~1,1~1.5,1.5~2和2~2.5的5个级别对小流域进行分级,制图得到以小流域为单元的土壤侵蚀严重指数图(见封2,附图9)。

全县所有小流域的土壤侵蚀严重指数介于0~2.45之间,平均值为0.86,中值为0.82,无明显、不严重、稍严重、较严重、极严重级别的小流域分别为25,206,65,7,3个,呈现偏向不严重级别的正态分布态势。可见,在全部小流域中,不严重的比例最多,无明显和稍严重的次之,较严重和极严重的最少。

附图9可清晰地反映如上所述的各个土壤侵蚀严重级别小流域的比例,可清晰表达全县水土流失严重程度及其分布。其分布特征主要为:各水土流失严重级别的小流域都相对集中,尤其是稍严重、较严重的2个级别;水土流失不严重的小流域集中分布在西南部的平原区和东南角的沿岸低洼易涝区;较为严重的小流域主要分布在东南部丘陵台地区和西北部的漫岗丘陵区。

3.4 小流域土壤侵蚀严重指数图优越性分析

《中华人民共和国水土保持法》及SL 335-2014《水土保持规划编制规范》要求^[21]:县级水土保持规划的土壤侵蚀图应以县域为整体,表征侵蚀的面积、分布和强度,反映侵蚀特征与重点预防区、重点治理区、水土流失防治格局、重点项目分布的对应关系。

3.4.1 严重指数图可综合反映土壤侵蚀面积、强度和分布 基于上述对土壤侵蚀强度制图、水土流失面积比例制图和土壤侵蚀严重指数制图方法及结果的分析,进一步对比图1和附图8—9可知:①附图8

图面过于细碎、零散,难以体现侵蚀分布的总体特征,对水土保持规划必需的重点预防区、重点治理区与其他区域的空间分布指向不清晰,也难以基于该图通过转化得到规划必需的图件;②图1强烈地凸显出水土流失很多、很严重,这既与全县水土流失的实际情况不相符,也与规划必需的重点预防区、重点治理区划分不能对应,难以基于该图通过转化得到规划必需的图件;③附图9既可清晰地反映全域侵蚀的严重程度及其分布,又可区别地反映不同级别严重程度的数量及其比例,且与实际情况相吻合。基于全县306个小流域的土壤侵蚀严重指数图,可方便生成水土流失重点预防区和重点治理区,可直接以小流域为单元设置重点项目,得到规划必需的图件。

3.4.2 基于小流域土壤侵蚀严重指数图可直接制作规划必需图件 以小流域为单元,通过土壤侵蚀严重指数的聚类计算和小流域空间关系分析,由严重指数图可直接生成水土保持规划必需的图件,如水土流失重点预防区和重点治理区分布图、水土流失防治格局图、重点项目分布图。

(1) 水土流失重点预防区和重点治理区分布图。通过合并较严重和极严重、选择无明显的小流域,分别得到典型的治理小流域、典型的预防小流域2类区域,并将被这些典型小流域夹挤的和与这些典型小流域紧连、严重指数极其接近的小流域并入这2类区域,就可得到重点预防区和重点治理区,所得结果如(见封2,附图10)所示。

与附图9对比,重点预防区是在严重级别为“无明显”小流域集中的6个片区的基础上,舍弃分散的5个“无明显”小流域、并入7个小流域所得。重点治理区是在严重级别为“较严重”“极严重”小流域集中的3个片区的基础上,并入2个小流域所得。

在6个重点预防区中,27个小流域的严重指数介于0.00~1.09,平均值为0.48,中值为0.47,标准差为0.25;轻度和微度的侵蚀面积为267.43 km²,占总面积的98.42%,符合SL 717-2015《水土流失重点防治区划分导则》的要求。

在3个重点治理区中,12个小流域的水土流失严重指数介于1.23~2.45,平均值为1.73,中值为1.70,标准差为0.33;水土流失面积为72.41 km²,占总面积的51.60%,中度以上侵蚀面积占总面积的21.43%,符合SL 717-2015《水土流失重点防治区划分导则》的要求。

(2) 水土流失防治格局图。基于全县306个小流域严重指数,可直接通过重点预防区和重点治理区的分布,确定全县预防和治理的总体格局、形成防治

格局图,构建 6 片重点预防、3 片重点治理、大面积保护区(主要是由侵蚀严重指数为“不严重”和“稍严重”的小流域组成)的总体格局(见封 2,附图 10)。重点预防片的主导功能为生态维护、土壤保持和蓄水保土,重点治理片的主导功能为农田保护、土壤保持和蓄水保土,大面积保护片区的主导功能为土壤保持、蓄水保土。

(3) 重点项目分布图。基于水土流失重点预防区和重点治理区,以小流域为单元分别安排预防和治理的重点项目。预防重点项目主要安排在“无明显”的小流域;若是发生土地利用结构调整,可接续地对个别“不严重”小流域实施生态保护。重点治理项目主要按照在“极严重”“较严重”小流域,先“极严重”再“较严重”;若是经费允许,可选择部分“稍严重”的小流域接续实施重点治理。

4 结论与讨论

基于小流域土壤侵蚀严重指数的县域土壤侵蚀图,不仅能够以水蚀发生发展和防治的基本单元——小流域来定量、精准、清晰地反映全县侵蚀严重程度及其分布,而且能够定量、综合、清晰地表征全县侵蚀强度面积及其分布,并且能够通过严重指数聚类计算和空间关系分析得到水土保持规划必需的图件,为重点预防和重点治理项目布局提供定量化、拓扑性的数据支撑,是一种具有良好优越性的制图方法。

对于县域范围的土壤侵蚀制图,在综合反映土壤侵蚀的面积、强度和分布方面,土壤侵蚀强度图、流失面积比例图和严重指数图都具有各自的优势和特征。从开展水土流失调查、全面支撑水土保持规划的角度,基于小流域土壤侵蚀严重指数制图具有更好的比较优势。

(1) 对县域而言,基于 30 m×30 m 栅格的侵蚀强度评价和小流域侵蚀严重指数计算,既能够定量化、综合性地 将侵蚀面积、强度和分布等落实到小流域,为在县域尺度上、整体布局层面的规划及其相关图件制作提供技术方法;又能够定量化、精确性地 将侵蚀模数及其因子值等落实到地块,为在小流域尺度上、治理模式层面的措施配置及其典型设计提供相关要素的数据。其中的操作技术、方法及其相关标准,可全面支撑县域水土流失调查和水土保持规划。

(2) 基于小流域土壤侵蚀严重指数的聚类计算和空间关系分析得到水土流失重点预防区和重点治理区的过程中,舍弃了个别分散的小流域,并入了夹挤在同一分级当中或与同级小流域紧连、严重指数极其接近的小流域。究竟舍弃几个? 并入多少? 应以

严重指数无实质性差异、舍弃或并入的面积不改变重点区域特性为根本,结合县域面积、土地利用结构调整可行性及水土流失防治投入等合理确定。

(3) 在县域尺度,如何根据土壤侵蚀严重指数对小流域进行分级,应把分级界限和级数联系起来,结合区域水土流失实际和预期的防治规模,进行联试联调,按照正态分布或者偏正态分布的总体方向,择优确定分级方法及其结果。

(4) 基于土壤侵蚀严重指数制作区域土壤侵蚀图的方法,也可以应用到更大的范围,如一个省、一个中等流域。应用时,需要研究确定严重指数计算的单元——小流域、县域、网格系统或者其他形式的对象,再按本文提出的技术和方法进行调查和制图。

[参 考 文 献]

- [1] 水电部遥感中心. 应用遥感技术调查全国土壤侵蚀现状与编制全国土壤侵蚀图技术工作细则[Z]. 1986年4月.
- [2] 长办规划处. 应用遥感技术调查土壤侵蚀[J]. 中国水土保持, 1985(10): 25-26.
- [3] 李智广, 曾大林. 浅谈基于 GIS 的区域土壤侵蚀遥感快速调查技术[J]. 中国水土保持, 1999(10): 38-39.
- [4] 曾大林, 李智广. 第二次全国土壤侵蚀遥感调查工作的做法与思考[J]. 中国水土保持, 2000(1): 28-31.
- [5] 郭索彦. 土壤侵蚀调查与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [6] 水利部办公厅关于印发区域水土流失动态监测技术规范(试行)的通知: 办水保(2018)189号[Z]. 2018年8月13日.
- [7] 林祚顶, 李智广. 2018年度全国水土流失动态监测成果及其启示[J]. 中国水土保持, 2019(12): 1-4.
- [8] USDA-NRCS. Streamlining the National Resources Inventory Process [Z]. Washington, DC: USDA, 1989.
- [9] USDA-NRCS, Iowa State University. Summary Report: 2007 National Resources Inventory [Z]. Washington, DC: USDA, 2009.
- [10] Fuller W A, Dodd K W, Wang Junyuan. Estimation for the 1997 National resources inventory [Z]. working paper (<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/technical/nra/nri/>), 1998.
- [11] van der Knijff J M, Jones R J A, Montanarella L. Soil Erosion Risk Assessment in Europe [M]. European Commission, European Soil Bureau, 2000.
- [12] Lu Hua, Gallant J, Prosser I P, et al. Prediction of sheet and rill erosion over the Australian continent, incorporating monthly soil loss distribution [R]. Land and Water Technical Report. CSIRO, Canberra, Australia, 2001.

- [16] Zhang Kai, Gong Wen, Lv J, et al. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges dam [J]. *Environmental Pollution*, 2015,204:117-123.
- [17] 赵世焯. 中国部分河口微塑料的赋存特征及海洋雪中微塑料分析方法研究[D]. 上海:华东师范大学,2017.
- [18] 周倩. 典型滨海潮滩及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2016.
- [19] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 161-169.
- [20] Wang Wenfeng, Ndungu A W, Li Zhen, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1369-1374.
- [21] 余厚平, 廖远鑫, 简敏菲, 等. 鄱阳湖五河流域入湖口沉积物中微塑料的赋存特征[J]. *环境化学*, 2019, 38(8): 1842-1849.
- [22] 龙邹霞. 厦门湾海洋塑料垃圾和微塑料时空分布及对人类活动响应研究[D]. 武汉:中国地质大学,2019.
- [23] Tang Guowen, Liu Mengyang, Zhou Qian, et al. Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas; Implications for anthropogenic impacts [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 634:811-820.
- [24] Mason S A, Garneau D, Sutton R, et al. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:1045-1054.
- [25] 刘治君, 杨凌肖, 王琼, 等. 微塑料在陆地水环境中的迁移转化与环境效应[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(4): 59-65.
- [26] Imhof H K, Laforsch C, Wiesheu A C, et al. Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes [J]. *Water Research*, 2016, 98:64-74.
- [27] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21):9175-9179.
- [28] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1):1-25.
- [29] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, et al. How well is microlitter purified from wastewater? A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2017, 109:164-172.
- [30] Michielssen M R, Michielssen E R, Ni J, et al. Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2016, 2(6):1064-1073.
- [31] Andrady A L. The plastic in microplastics: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1):12-22.

(上接第 200 页)

- [13] Liu, Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings process of soil erosion and its environment effect (vol II)*: 12th international soil conservation organization conference. Tsinghua University Press. Beijing, China, 2002-02: 21-25.
- [14] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 45-50.
- [15] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1):131-137.
- [16] Sharpley A N, Williams J R, Jones C A, et al. EPIC: Erosion productivity impact calculator [M]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李智广, 罗志东. 县域土壤侵蚀严重性评价方法初探: 土壤侵蚀严重指数的定义与应用[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4):41-43.
- [20] 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.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水土保持规划编制规范: SL 335-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:3-21, 32-38.