



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

丹江口市土壤侵蚀敏感性时空变化特征

马方正, 于兴修, 胡砚霞, 李明蔚, 程思, 王星峰, 肖娟花

引用本文:

马方正, 于兴修, 胡砚霞, 等. 丹江口市土壤侵蚀敏感性时空变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 999-1009.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0564>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析

黄硕文, 李健, 张欣佳, 邓联文, 张金萍

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 232-240 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0258>

丹江口库区水土流失遥感监测应用研究——以商南县为例

张锦凰, 刘丹强, 姜小三, 卞新民

农业资源与环境学报. 2015(2): 162-168 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0344>

丹江口水库总氮、氨氮遥感反演及时空变化研究

刘轩, 赵同谦, 蔡太义, 肖春艳, 陈晓舒, 张文静

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 829-838 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0195>

旅游干扰下的天山北坡水蚀经济损失评估——以西白杨沟流域山地景区为例

桂海月, 王新军, 常梦迪, 闫立男, 马克, 李菊艳, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 512-522 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0267>

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静, 张慧, 赵显富

农业资源与环境学报. 2015(4): 343-353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马方正, 于兴修, 胡砚霞, 等. 丹江口市土壤侵蚀敏感性时空变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 999-1009.

MA F Z, YU X X, HU Y X, et al. Spatial and temporal variations in soil erosion sensitivity in Danjiangkou City[J]. *Journal of Agricultural*

Resources and Environment, 2021, 38(6): 999-1009.



开放科学 OSID

丹江口市土壤侵蚀敏感性时空变化特征

马方正, 于兴修*, 胡砚霞, 李明蔚, 程思, 王星峰, 肖娟花

(湖北大学资源环境学院/区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 武汉 430062)

摘要:土壤侵蚀是丹江口库区主要的生态问题之一,明确丹江口市土壤侵蚀敏感性的时空变化特征有助于深入认识丹江口库区的土壤侵蚀机理,也可为保护库区水环境提供依据。基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE),结合丹江口市多山、地形破碎的地形特征,选择降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度、植被覆盖度、沟壑密度5个因子构建土壤侵蚀敏感性评价体系,借助ArcGIS 10.2平台,综合评价2012—2017年丹江口市土壤侵蚀敏感性,并分析研究区在不同下垫面要素下土壤侵蚀敏感性的空间分布特征。结果表明:丹江口市土壤侵蚀敏感性整体呈现南北高、中间低的态势,主要表现为轻度敏感和中度敏感,高度及以上敏感区仅占研究区总面积的13.53%;5年间丹江口市中度敏感、轻度敏感、不敏感区面积呈增加趋势,高度敏感和极敏感区面积呈下降趋势;疏林地和未利用地是研究区高敏感性土地利用类型;研究区土壤侵蚀敏感性随坡度增大呈先升高后降低趋势。研究成果可为丹江口市土壤侵蚀机理研究和水土保持及生态环境建设提供参考。

关键词:丹江口市;通用土壤流失方程(RUSLE);土壤侵蚀敏感性;GIS

中图分类号:S157.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)06-0999-11

doi: 10.13254/j.jare.2020.0564

Spatial and temporal variations in soil erosion sensitivity in Danjiangkou City

MA Fangzheng, YU Xingxiu*, HU Yanxia, LI Mingwei, CHENG Si, WANG Xingfeng, XIAO Juanhua

(College of Resources and Environmental Science, Hubei University/Hubei Key Laboratory of Region Development and Environment Response, Wuhan 430062, China)

Abstract: Soil erosion is a major ecological problem in Danjiangkou reservoir area. Therefore, understanding the soil erosion mechanism of Danjiangkou reservoir area and conserving the water environment of the reservoir area is critical. Based on the revised universal soil loss equation (RUSLE) and the terrain characteristics of mountainous and broken terrain in Danjiangkou City, five factors, including rainfall erosivity, soil erodibility, topographic relief, vegetation coverage, and gully density were selected to develop a soil erosion sensitivity evaluation system. With the help of ArcGIS 10.2 platform, the soil erosion sensitivity of Danjiangkou City from 2012 to 2017 was comprehensively evaluated and the spatial distribution characteristics of soil erosion sensitivity in the study area under different underlying surface elements were analyzed. The results showed that the soil erosion sensitivity of Danjiangkou City was generally high in the northern and southern regions and low in the central region. Soil erosion sensitivity was characterized majorly as marginal and moderate sensitivity. Highly sensitive and extremely sensitive areas accounted for 13.53% of the total study area; during the five years, the moderately sensitive, marginally sensitive, and insensitive areas in Danjiangkou City showed an increasing trend, while the highly sensitive and extremely sensitive areas showed a downward trend; sparse woodland and unused land were highly sensitive land use types in the study area. The potential risk index of soil erosion in the study area increased initially and decreased later with the increase in slope. The research findings can serve as a reference for studying the soil erosion mechanism and developing strategies for the conservation of soil, water, and the overall ecosystem in Danjiangkou City.

Keywords: Danjiangkou City; revised universal soil loss equation (RUSLE); soil erosion sensitivity; GIS

收稿日期:2020-09-30 录用日期:2021-01-14

作者简介:马方正(1995—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事资源利用与环境效应研究。E-mail:2054211659@qq.com

*通信作者:于兴修 E-mail:xyx2000@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41471227)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471227)

土壤侵蚀引发土壤肥力下降、江河淤积、旱涝灾害加剧,已成为全球重大生态环境问题之一^[1]。土壤侵蚀敏感性反映的是在自然条件下发生土壤侵蚀的潜在可能性及其程度^[2],开展土壤侵蚀敏感性评价对深化土壤侵蚀机理研究及水土流失治理和生态建设均具有重要意义。在土壤侵蚀敏感性研究中,国外多侧重于探讨环境因子对土壤侵蚀敏感性的影响,如BORRELLI等^[3]研究了意大利亚平宁山区林地伐木后土壤侵蚀敏感性现状;MISRA等^[4]探讨了地中海地区土地利用类型和耕作方式变化对土壤侵蚀敏感性的影响。国内对土壤侵蚀敏感性的研究多以区域为单元,探讨土壤侵蚀敏感性的空间分布和形成机制,目前已经取得许多研究成果。国内学者对土壤侵蚀敏感性的研究大多基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE)^[5]、几何平均数模型^[6]、加权叠加模型^[7]及土壤侵蚀潜在危险度指数模型^[8]等方法在土壤侵蚀敏感性研究中也得到一些应用。近年来,随着3S技术的应用,土壤侵蚀敏感性已实现了动态研究^[9]。评价指标体系构建、主要敏感因子识别及侵蚀因子权重确定等^[10-11]是开展土壤侵蚀敏感性评价研究的前提和基础,所用的统计方法主要有叠加排序法^[12]、空间自相关分析法^[13]、层次分析法^[14]、专家打分法^[15]等,其中,

专家打分法在土壤侵蚀关键因子识别及不同扰动因子权重研究中应用较为广泛。

丹江口水库是我国南水北调中线工程的水源地,库区土壤侵蚀状况对流域生态环境具有重要影响^[16]。丹江口市地处国家级水土流失重点防治区和南水北调中线工程丹江口水源区核心范围,境内地形地貌复杂,沟壑密布,地形坡度大,夏季多暴雨,容易引发水土流失,目前相关研究主要集中在小流域水土流失监测^[17]、养分流失^[18]、土壤侵蚀对土地利用的响应^[19]等方面,土壤侵蚀敏感性时空变化方面的研究比较缺乏。本研究以丹江口市为研究区,以30 m×30 m的栅格作为评价单元,借鉴国内外土壤侵蚀敏感性研究成果,以RUSLE和GIS、RS技术为基础,结合研究区自然地理特征,选取研究区土壤侵蚀的主要影响因子,以2013年丹江口大坝加高工程项目完工为时间节点,研究该区土壤侵蚀的空间分布差异及时空变化特征,以为该区土壤侵蚀机理研究和水土保持及生态环境建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丹江口市位于湖北省西北部(图1),鄂、豫两省

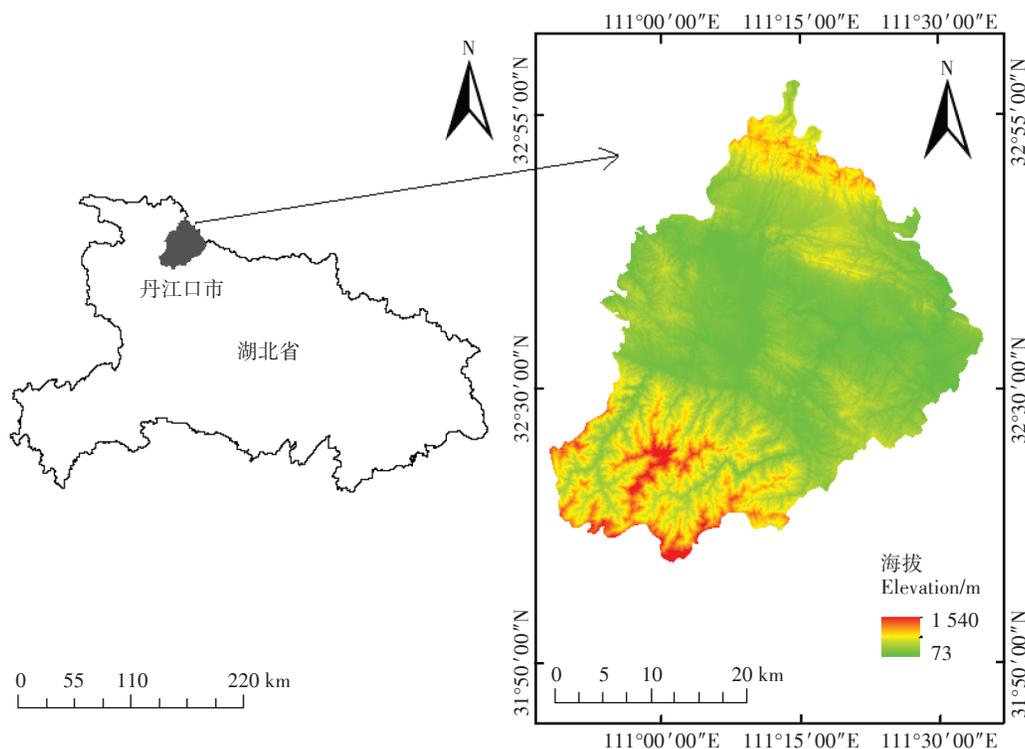


图1 丹江口市位置及地势起伏示意图

Figure 1 Schematic diagram of the location and topography of Danjiangkou City

交界处(110°48′~111°34′E,32°13′~32°58′N),总面积3 121 km²,是南水北调中线工程水源地,被誉为“亚洲天池”。丹江口市整体地势呈南北高、中间低的特点,汉水自西向东贯穿全境,最高海拔为武当山天柱峰1 612 m,最低海拔为东部三宫殿87 m,平均海拔192 m;丹江口市属北亚热带季风性湿润气候,多年平均降雨量850~900 mm,降雨季节差异大,夏季降水量占年降水量的30%~49%;主要土壤类型为黄棕壤、水稻土、灌淤土等;地带性植被为常绿阔叶林、针叶林及针阔混交林。

1.2 数据来源

本研究的基础地理数据包括:2012年9月30日、2017年11月8日两期Landsat EM、Landsat 8遥感影像,空间分辨率均为30 m;研究区降雨数据来源于欧洲气象局高分辨率网格数据集月降雨数据;地形数据来源于ASTER官网提供的30 m分辨率数字高程数据(DEM);土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 评价因子的选取

土壤侵蚀敏感性评价主要选取能够反映土壤侵蚀敏感性的自然因子,通过定量的土壤侵蚀模型,对区域土壤侵蚀敏感性进行综合研究。丹江口市位于我国亚热带地区,因此研究区主要考虑由水蚀所引发的土壤侵蚀状况。RUSLE是目前应用最为广泛的土壤水蚀模型,模型全面考虑了影响土壤侵蚀的自然和人为因素,其参数因子可以很好地反映土壤侵蚀的敏感性问题,因此本研究以该模型为基础,选取土壤侵蚀敏感性评价因子。RUSLE如下:

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

其中: A 为土壤侵蚀量; R 为降水侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

在已有研究得出土壤侵蚀敏感性主要受气候、土壤性质、地形和植被影响的基础上^[20],基于RUSLE模型,考虑数据资料的有效性并结合丹江口市地形破碎、沟壑纵横的地形特征,本研究选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度、植被覆盖度、沟壑密度5个因子作为土壤侵蚀敏感性评价指标,构建研究区土壤侵蚀敏感性评价体系。

1.3.2 土壤侵蚀敏感性因子量化

(1)降雨侵蚀力因子

降雨侵蚀力是指由降水引起土壤侵蚀的潜在势

能,雨滴溅蚀和降雨径流是引发土壤侵蚀的主要动力因素^[21]。年降雨量和降雨强度越大,土壤侵蚀越剧烈,二者呈正相关。由于降雨侵蚀力难以直接测定,本研究采用 R 值计算方法^[22]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792P_i) \quad (2)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力, $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; P_i 为研究区月均降雨量,mm。

基于研究区多年月均降雨量数据,采用普通Kriging内插法进行空间化处理,生成研究区 R 值栅格文件(图2)。依据表1进行分级赋值,空间分辨率为30 m×30 m。

(2)土壤可蚀性因子

土壤可蚀性是土壤对降雨击溅侵蚀或地表径流等侵蚀介质剥蚀、搬运的敏感程度^[23],反映了土壤自

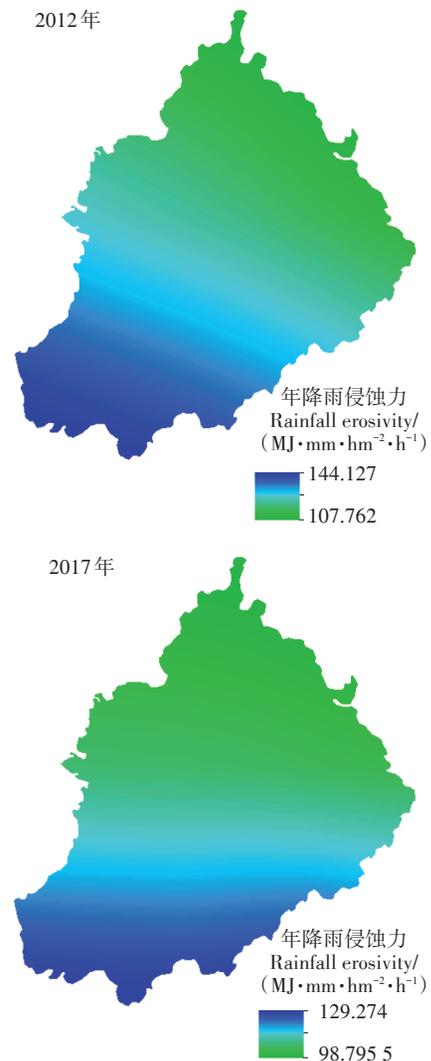


图2 2012、2017年降雨侵蚀力空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of rainfall erosivity in 2012 and 2017

表1 土壤侵蚀敏感性评价指标及分级赋值

Table 1 Evaluation index and classification standard of soil erosion sensitivity

指标 Index	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slightly sensitive	中度敏感 Moderately sensitive	高度敏感 Highly sensitive	极敏感 Extremely sensitive	权重 Weights
降雨侵蚀力	<100	100~150	150~200	200~250	>250	0.25
土壤可蚀性	<0.2	0.2~0.25	0.25~0.3	0.3~0.4	>0.4	0.1
地形起伏度	<20	20~50	50~100	100~300	>300	0.25
植被覆盖	水体、滩涂、沼泽、水田、建设用地	有林地、草地	灌木林地	旱地、园地	裸土地、稀疏植被	0.3
沟壑密度	<0.06	0.06~0.2	0.2~0.23	0.23~0.3	>0.3	0.1
分级赋值	1	3	5	7	9	—

身理化性质对土壤侵蚀的抵抗能力,是影响土壤流失量的内在因素。本研究选取土壤侵蚀和生产力影响估算模型(EPIC)^[24],计算研究区不同土壤类型K值,公式如下:

$$K=0.2+0.3\exp[-0.0256\rho_{SAN}(1-\frac{\rho_{SIL}}{100})]\times(\frac{\rho_{SIL}}{\rho_{CLA}+\rho_{SIL}})^{0.3}\times[1-\frac{0.25\rho_C}{\rho_C+\exp(3.72-2.95\rho_C)}]\times[1-\frac{0.7\rho_{SNI}}{\rho_{SNI}+\exp(-5.51+22.9\rho_{SNI})}] \quad (3)$$

式中: ρ_{SAN} 、 ρ_{SIL} 、 ρ_{CLA} 分别表示砂粒、粉粒、黏粒含量,%; ρ_C 为有机碳含量,%; $\rho_{SNI}=1-\rho_{SAN}/100$ 。

根据公式(3)计算研究区各土壤类型的K值,赋值于土壤类型图,进行数据转换,得到30 m栅格大小的Grid格式空间数据,分级赋值得到土壤可蚀性因子敏感性空间分布图(图3)。

(3)地形起伏度

地形起伏是引发土壤侵蚀最直接的因素,宏观尺度通常选取地形起伏度来反映坡度、坡长等地形因子

对土壤侵蚀的敏感性^[25]。本文以ASTER GDEM为数据源,运用邻域分析法提取丹江口市地形起伏度。利用均值变点分析法得出丹江口市地形起伏度最佳统计单元是7×7窗口,通过ArcGIS软件Neighborhood statistics工具,绘制研究区地形起伏度分级赋值图(图4)。

(4)植被覆盖度因子

植被覆盖是影响土壤侵蚀最敏感的因素,植被覆盖对土壤侵蚀的防治作用主要表现为对降雨能量的削减作用、保水作用和抗侵蚀作用^[26]。依照现行的土地利用分类系统,以研究区2012、2017年两期遥感影像为基础数据源,通过目视解译得到土地利用类型图,依据《生态功能区划暂行规程》^[27]对植被覆盖因子敏感程度进行分级赋值(表1),得到研究区植被覆盖因子敏感性空间分布图(图5)。需要说明的是,建设用地和交通用地虽无植被覆盖,但一般认为其不会发生土壤侵蚀,因此将二者归为土壤侵蚀不敏感级别。

(5)沟壑密度

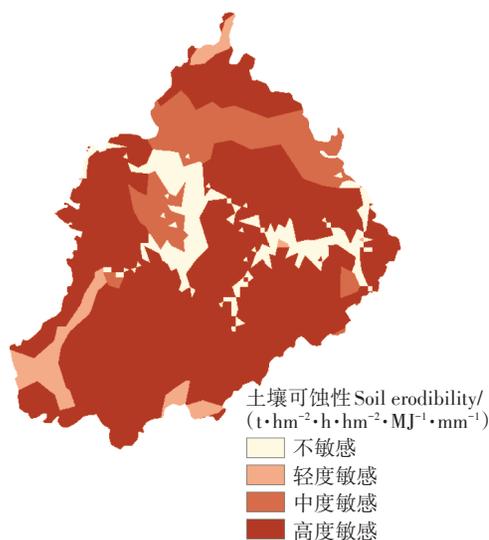


图3 土壤可蚀性因子分布图

Figure 3 Distribution map of soil erodibility factors

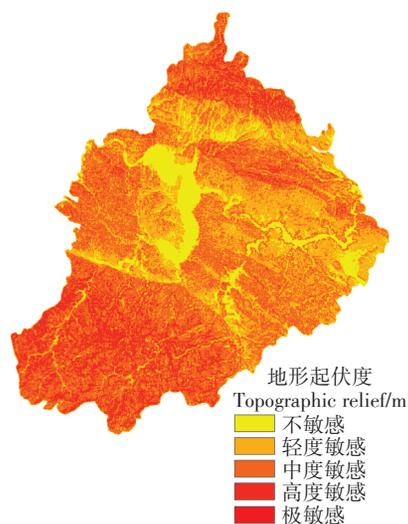


图4 地形起伏度因子分布图

Figure 4 Distribution map of topographic relief factors

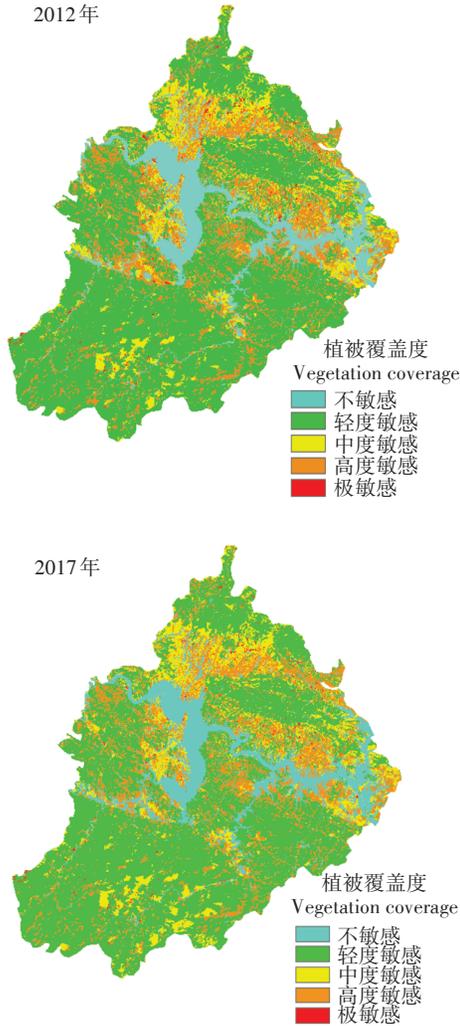


图5 2012、2017年植被覆盖因子分布图
Figure 5 Distribution map of vegetation cover factors in 2012 and 2017

沟壑密度是表征内外营力对地表侵蚀影响的重要指标。沟壑密度的大小与地表的切割破碎程度呈正相关,沟壑密度越大,地表越破碎,越容易引发土壤侵蚀^[28]。利用ArcGIS软件水文分析工具提取研究区盆地与沟壑,在考虑研究区地形特征及DEM分辨率的基础上,确定提取流域盆地流量累计阈值为200,提取沟壑流量累计阈值为100,再将沟壑长度相加赋于流域面积,计算得到研究区沟壑密度分级图(图6)。

1.4 土壤侵蚀敏感性评价方法

单因子的土壤侵蚀敏感性仅反映某一因子对土壤侵蚀的作用程度,由于不同影响因子对土壤侵蚀的贡献度不同,需要对土壤侵蚀各单一指标进行加权计算,对土壤侵蚀敏感性进行综合评价。综合评价公式如下:

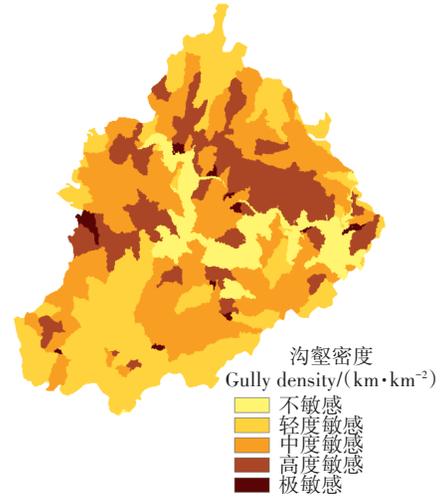


图6 沟壑密度因子分布图
Figure 6 Distribution map of gully density factors

$$S_j = \sum_{i=1}^5 C_{ij} \times W_i \quad (4)$$

式中: S_j 为 j 空间单元土壤侵蚀敏感性指数; C_{ij} 为 i 因素敏感性等级值; W_i 为影响土壤侵蚀 i 因子的权重。

根据丹江口市的实际情况及各因子对土壤侵蚀影响的大小,参考前人研究结果^[29],采用专家打分法,确定土壤侵蚀敏感性各因子权重,降雨、土壤质地、地形起伏度、植被、沟壑密度权重依次为0.25、0.1、0.25、0.3、0.1。参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)和《生态功能区划暂行规程》,确定主要影响因子评价指标敏感性等级和分级赋值标准(表1)。依据公式(4),在ArcGIS操作平台上将单因子敏感性进行加权叠加运算,运用自然分界法将运算结果划分为五级,得到丹江口市2012、2017年土壤侵蚀敏感性评价结果(表2),绘制丹江口市两期30 m分辨率土壤侵蚀敏感性分级图。其中自然分界法是利用统计学的JENK最优化法确定的分界点,可以使各级内部方差和最小,根据2012年研究区自然分界法的划分阈值,对2017年各因子加权求和结果进行分级,得到研究区两期土壤侵蚀敏感性分级图(图7)。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀敏感性现状

土壤侵蚀敏感性综合评价结果(表2)表明,2017年丹江口市土壤侵蚀以中度敏感(1 365.66 km²)为主,其次为轻度敏感(985.24 km²),二者占75.19%;高度敏感区面积为408.21 km²,占比为13.06%;不敏感区面积为352.52 km²;土壤侵蚀极敏感区面积为

14.56 km², 仅占丹江口市总面积的0.47%。由图7可知, 研究区分布最为广泛的轻度敏感区主要分布在库区北侧习家店镇、蒿坪镇、石鼓镇, 南部武当山中高山区及库区西侧平原向低山丘陵过渡的丘陵台地区; 轻度敏感区分布广泛但零散, 主要分布在植被覆盖度较高、人类活动干扰较少的低山丘陵区; 高度敏感区主要分布在凉水河镇、习家店镇、六里坪镇、均县镇、土台乡等山地丘陵区, 该区地形起伏度较大, 沟壑密布, 土壤类型以黄棕壤为主, 土壤中砾石、沙粒含量高, 养分匮乏, 保水保肥性差, 土壤侵蚀敏感性较高; 不敏感区主要分布在丹江口市、丹江口水库、库区周边河谷平原区及大小河流的阶地上, 这些地区地形平坦, 土壤类型以水稻土和潮土为主, 土壤质地多为壤黏土, 土壤砂粒、粉粒、黏粒含量适中, 保水保温性能强,

土壤侵蚀敏感性相对较低; 极敏感区零散分布于北部大横山区及南部武当山区, 是由人类生产建设活动、局部微地貌等多种土壤侵蚀易发因子叠加所致。

2.2 土壤侵蚀敏感性时空变化特征

对丹江口市2012、2017年两期土壤侵蚀敏感性分级图进行叠加分析, 得到土壤侵蚀敏感性强度转移矩阵(表3)。由表3可知, 5年间研究区土壤侵蚀敏感性等级降低的面积达105.87 km², 主要表现为高度敏感转化为中度敏感、中度敏感转化为轻度敏感和不敏感; 土壤侵蚀敏感性等级升高的面积仅为11.83 km², 主要表现为轻度敏感转化为中度和高度敏感、中度敏感转化为高度敏感。

由图8可知, 研究区土壤侵蚀敏感性等级降低比较明显的有: ①北部石鼓镇、蒿坪镇、习家店镇、均县镇, 土壤侵蚀敏感性由高度敏感向中度敏感转化。该区地形以丘陵为主, 山地丘陵与平原相间分布, 人类开发强度大, 土壤侵蚀敏感性较高, 2012年以来国家在丹江口库区实施水土流失综合整治项目, 将丹江口水库大坝加高后即将淹没的优质耕园地的耕作层剥离转移到交通便利、距库岸较近的瘠薄耕园地上, 改良土壤性能, 区域土壤抗蚀能力明显增强, 土壤侵蚀敏感性由高度敏感向中轻度敏感转化。②南部武当山区六里坪镇、武当山镇、盐池河镇、浪河镇、丁家营镇和白杨坪林业开发区部分区域, 土壤侵蚀敏感性由高度敏感向中度、轻度敏感转化。该区植被覆盖度整

表2 2012—2017年丹江口市土壤侵蚀敏感性综合评价
Table 2 Comprehensive evaluation of soil erosion sensitivity in Danjiangkou City from 2012 to 2017

敏感性等级 Sensitivity	2012年		2017年	
	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
不敏感	333.93	10.68	352.52	11.28
轻度敏感	972.27	31.10	985.24	31.51
中度敏感	1 327.12	42.45	1 365.66	43.68
高度敏感	476.71	15.25	408.21	13.06
极敏感	16.16	0.52	14.56	0.47

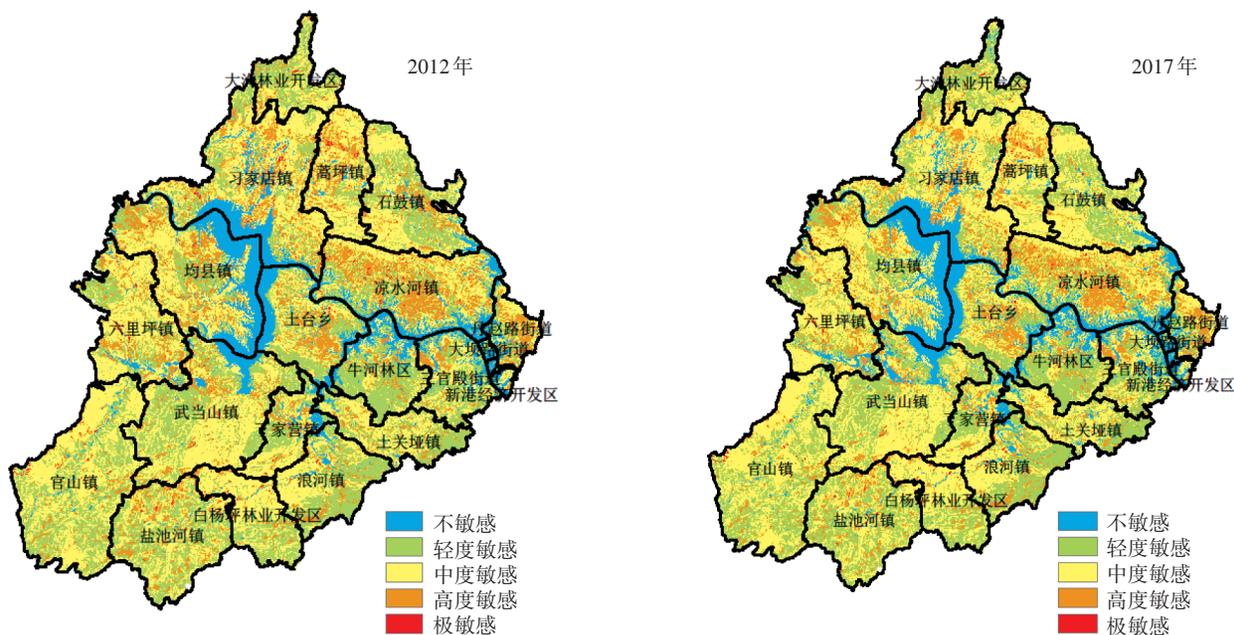


图7 丹江口市2012、2017年土壤侵蚀敏感性分级图

Figure 7 Classification map of soil erosion sensitivity in Danjiangkou City in 2012 and 2017

表3 2012—2017年丹江口市土壤侵蚀敏感性强度转移矩阵

Table 3 The intensity transfer matrix of soil erosion sensitivity in Danjiangkou City from 2012 to 2017

2012年 土壤侵蚀敏 感性等级 Soil erosion sensitivity	2017年									
	不敏感 Insensitive		轻度敏感 Slightly sensitive		中度敏感 Moderately sensitive		高度敏感 Highly sensitive		极敏感 Extremely sensitive	
	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
不敏感	331.61	10.60	0.77	0.02	1.44	0.05	0.12	<0.01	0	0
轻度敏感	6.39	0.20	959.64	30.70	3.71	0.12	2.49	0.08	0.04	<0.01
中度敏感	9.45	0.30	13.36	0.43	1 301.33	41.63	2.19	0.07	0.79	0.03
高度敏感	5.08	0.16	11.40	0.36	57.48	1.84	402.47	12.87	0.28	0.01
极敏感	0	0	0.07	<0.01	1.70	0.05	0.94	0.03	13.45	0.43

体较高,近年来对疏残幼林地和荒山荒坡进行封育管理,营造生态防护林,进行生态修复,推进退化林和人工纯林修复,增加复层异龄混交林比例,土壤侵蚀敏感程度降低。③南部官山河小流域,土壤侵蚀敏感性主要由中度和高度敏感转化为轻度敏感和不敏感。该地区早年间土地利用类型以坡耕地为主,土层薄,保水能力差,抗蚀性能差,土壤侵蚀敏感性较高,2013年以来,官山河进行流域综合治理,以坡耕地整治为重点,进行坡面整治,实施“移土培肥”改造,提高土壤抗蚀性能,营造农田防护林,多手段减少流域输沙率,土壤侵蚀敏感程度降低。

土壤侵蚀敏感性等级上升地区零散分布于研究区南部,该区地形起伏度高,地表破碎,沟壑密布,近年来伴随汉十高铁施工建设,部分地区地表植被破坏严重,土层直接暴露于地表,研究区降雨季节差异巨大,夏季遇侵蚀性降水,水土流失严重,土壤侵蚀敏感性有所增强。

2.3 土壤侵蚀敏感性与主要影响因素之间的关系

植被覆盖是土壤侵蚀的抑制因子,不同土地利用类型对应不同程度的植被覆盖度和人为干扰程度,进而影响土壤侵蚀的抗侵蚀阻力和动力系统,在区域土壤侵蚀发生、发展、变化中起重要作用。地形因子是区域地形特征的综合表征,也是土壤侵蚀敏感性空间分异的重要影响因素。为了进一步明确土壤侵蚀敏感性的空间分布规律,利用 ArcGIS 空间分析功能,探讨不同土地利用类型、不同坡度下土壤侵蚀敏感性大小。

2.3.1 不同土地利用类型下的土壤侵蚀敏感性评价

将 2017 年土壤侵蚀敏感性评价图与该年份土地利用图叠加分析(表 4)可知,研究区土壤侵蚀高度以上敏感区土地利用类型面积大小排序依次为园地、早



图8 丹江口市2012—2017年土壤侵蚀敏感性空间变化图
Figure 8 Spatial variation map of soil erosion sensitivity in Danjiangkou City from 2012 to 2017

地、草地、灌木林地、有林地、疏林地、未利用地、城乡居民和工矿用地、水体及水田。但从土壤侵蚀高度以上敏感区面积占各土地利用类型面积比例来看,大小排序依次为疏林地、未利用地、园地、旱地、草地、灌木林地、水田、城乡居民和工矿用地、水体及有林地。丹江口市疏林地高度以上敏感区面积占比最高,研究区疏林地主要为2013年丹江口库区水土流失综合整治项目实施以来,植树造林形成的次生疏林地,生长期短,郁闭度低,水土保持性能差,土壤侵蚀敏感性高。

未利用地高度以上敏感区面积超过该地类总面积的70%,这是因为未利用地植被覆盖度极低,土壤结构破坏严重,抗蚀能力弱,水土保持措施不到位。对于疏林地、未利用地,虽然侵蚀面积较小,但是其侵蚀比例非常高,说明疏林地、未利用地是研究区高敏感性土地利用类型,今后应切实加强这些区域的植被恢复工作。有林地主要分布在研究区海拔较高的山地丘陵区,较其他植被类型而言,有林地高度以上敏感区面积占比较小,这表明有林地可以有效增强当地的土壤抗蚀能力,具有良好的水土保持性能。相比有林地,研究区灌木林地和草地土壤侵蚀敏感性较高,土壤抗侵蚀能力较弱,今后应进一步优化林灌草植被结构。丹江口市土层较薄,大部分坡耕地土层厚度不足30 cm,遇侵蚀性降水,极易形成集中水流,引发坡面侵蚀,因此坡耕地治理是该区域水土保持工作的重点。总体而言,研究区植被覆盖因子敏感性与土壤侵蚀敏感性的空间分布较为吻合,说明植被覆盖是丹江口市土壤侵蚀敏感性的重要影响因子。

2.3.2 不同坡度下的土壤侵蚀敏感性评价

丹江口市属低山丘陵区,地形起伏交错是引发土

壤侵蚀最直接的因素,对研究区坡度分级图和土壤侵蚀敏感性分级图进行叠加分析,可提取不同坡度等级土壤侵蚀敏感性分布情况(表5)。从表5可以看出,随着坡度增大,研究区土壤侵蚀敏感性总体呈现先升高后降低的趋势,0°~5°坡度带土壤侵蚀敏感性最低,35°~45°坡度带土壤侵蚀敏感性最高,从5°~15°坡度带到25°~35°坡度带,随坡度增加土壤侵蚀敏感性逐渐提高,这是因为随着坡度加大,土壤自身稳定性降低,雨滴击溅侵蚀增强,加之人类不合理经济活动导致土壤结构破坏严重,使得土壤侵蚀敏感性升高。45°以上的坡度带土壤侵蚀敏感性不升反降,这是因为坡度大于45°的地区,封育管理、生态防护林营造等水土保持措施相对完善,植被覆盖度高。

3 讨论

土壤侵蚀敏感性受地形地貌、降雨、植被及土壤质地等因素的综合影响。降雨作为土壤侵蚀的主要动力,随时间变化明显,研究降雨因子与土壤侵蚀敏感性之间的关系,对于水土保持措施的实施具有重要参考作用。张恩伟等^[30]在研究滇池流域土壤侵蚀敏

表4 不同土地利用类型土壤侵蚀敏感性分布面积(km²)

Table 4 Distribution area of soil erosion sensitivity in different land use types(km²)

土地利用类型 Land use type	不敏感 Insensitive	轻度敏感 Slightly sensitive	中度敏感 Moderately sensitive	高度敏感 Highly sensitive	极敏感 Extremely sensitive	高度以上敏感 Highly sensitive and above
水田	16.66	6.37	1.63	0.77	0.01	0.78
旱地	2.40	10.30	99.31	152.80	1.64	154.44
园地	2.06	6.59	50.63	154.67	3.29	157.96
有林地	11.45	866.21	964.09	19.17	0.66	19.83
灌木林地	2.12	15.82	139.94	35.31	1.13	36.44
疏林地	0.14	0.33	1.99	4.83	6.27	11.10
草地	1.19	11.08	101.35	36.86	0.14	37.00
城乡居民和工矿用地	47.05	26.47	3.08	1.99	0.02	2.01
水体	269.41	41.95	3.30	1.04	0.02	1.06
未利用地	0.04	0.12	0.34	0.77	1.38	2.15

表5 不同坡度土壤侵蚀敏感性分布面积(km²)

Table 5 Distribution area of soil erosion sensitivity in different slope(km²)

敏感性等级 Classification	0°~5°	5°~15°	15°~25°	25°~35°	35°~45°	>45°
不敏感	259.98	76.33	10.89	2.84	2.29	0.19
轻度敏感	116.97	406.15	331.72	111.30	14.85	4.25
中度敏感	109.29	379.28	445.59	301.21	109.09	21.20
高度敏感	52.68	169.26	123.57	46.98	13.37	2.35
极敏感	0.58	3.95	5.28	3.35	1.20	0.20
高度以上敏感	53.26	173.21	128.85	50.33	14.57	2.55

感性时发现,降雨是影响滇池流域土壤侵蚀敏感性的关键因子,降雨侵蚀力敏感性的空间分布与土壤侵蚀敏感性的空间分布高度吻合。丹江口市降雨侵蚀力的空间分布自西南向东北递减,降雨侵蚀力敏感性的空间分布与土壤侵蚀敏感性的空间分布吻合度差。这表明,土壤侵蚀敏感性是多个因子共同作用的结果,且不同地区的主导影响因子具有差异性。

地形因子是影响土壤侵蚀敏感性最直接的因素。通过对比分析地形因子与土壤侵蚀敏感性数据,发现不敏感区主要分布在研究区坡度 $<5^{\circ}$ 的区域,地形起伏度在100~300 m、坡度在 5° ~ 35° 的区域与土壤侵蚀轻度敏感和中度敏感空间分布较为吻合,高度敏感和极敏感区并没有集中分布在坡度大于 35° 的区域,土壤侵蚀敏感性由低到高的空间分布与坡度由小到大的空间分布并不完全一致。孙小涛等^[31]在研究贵州省雷山县时发现,雷山县土壤侵蚀敏感性随着坡度的增大而升高,当坡度超过 35° 后,土壤侵蚀敏感性随坡度的增大而降低,这表明土壤侵蚀敏感性存在坡度临界值,超过该坡度范围,土壤侵蚀敏感性降低。这与本研究结果相似。

土壤抗蚀能力与土壤自身理化性质密切相关,丹江口市土壤抗侵蚀能力偏弱,土壤可蚀敏感性主要为中度敏感和高度敏感。中度敏感区土壤类型主要为黄棕壤和黄褐土,土层深厚、质地黏重、易旱易涝,土壤侵蚀敏感性高。高度敏感性地区土壤类型主要为石灰岩土,土层贫瘠、质地松散、抗冲蚀能力差。朱明勇等^[32]在研究南水北调水源区时发现,丹江口水库区土壤总体上属中高可蚀性土壤,本研究进一步验证了此结论。

植被覆盖是土壤侵蚀的阻抗因子,不同植被覆盖类型对水土保持的效果差异显著。丹江口市植被覆盖敏感性轻度以下区域占72.21%,不敏感区域主要为水体和建设用地,轻度敏感区主要为有林地。从植被类型看,丹江口市林地以北亚热带阔叶混交林为主,其林冠层对降雨截流作用较强^[33],植被覆盖因子敏感性与土壤侵蚀敏感性的空间分布高度吻合。

4 结论

本研究以通用土壤流失方程为基础,选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度、植被覆盖度、沟壑密度5个因子,采用专家打分法对其赋权重,依据ArcGIS空间分析模块进行加权叠加计算,得到丹江口市土壤侵蚀敏感性分级结果,分析了研究区2012—

2017年土壤侵蚀敏感性各强度等级之间时空变化,探讨了土壤侵蚀敏感性与下垫面因素之间的关系。

(1)2017年,丹江口市土壤侵蚀敏感性整体呈现南北高、中间低的态势,主要表现为轻度敏感和中度敏感,高度及以上敏感区仅占13.53%。

(2)从丹江口市土壤侵蚀敏感性空间分布及时空变化情况来看,研究区5年间中度敏感、轻度敏感、不敏感区域面积呈增加趋势,高度敏感和极敏感区面积呈下降趋势,土壤侵蚀敏感性等级变化主要表现为高度敏感转化为中度轻度敏感、中度敏感转化为轻度敏感和不敏感;总体而言,研究区5年间土壤侵蚀敏感性状况有所改善,仅少量区域土壤侵蚀敏感性有所升高。

(3)从不同下垫面土壤侵蚀敏感性分布来看,未利用地和疏林地是研究区高敏感性土地利用类型;研究区土壤侵蚀敏感性随坡度增大呈先升高后降低趋势, 0° ~ 5° 坡度带敏感性最低, 35° ~ 45° 坡度带敏感性最高,而坡度在 45° 以上的区域,由于植被覆盖条件好,水土保持措施较为完善,土壤侵蚀敏感性下降。

参考文献:

- [1] 陈世发. ENSO对韶关市1951—2013年降雨侵蚀力影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1573-1580. CHEN S F. Impact of ENSO on rainfall erosivity in Shaoguan City during 1951—2013[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1573-1580.
- [2] 张乃夫, 刘霞, 朱继鹏, 等. 安徽新安江流域土壤侵蚀敏感性评价及空间分异特征[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 8-15. ZHANG N F, LIU X, ZHU J P, et al. Assessment and spatial heterogeneity of soil erosion sensitivity in the Xin'anjiang River basin, Anhui Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(6): 8-15.
- [3] BORRELLI P, SCHÜTT B. Assessment of soil erosion sensitivity and post-timber-harvesting erosion response in a mountain environment of central Italy[J]. *Geomorphology*, 2014, 204(1): 412-424.
- [4] MISRA R K, TEIXEIRA P C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59(1): 81-93.
- [5] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington: US Department of Agriculture, 1997: 404-407.
- [6] 张景华, 高慧, 欧阳渊, 等. 贵州省黔西县土壤侵蚀敏感性评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 88-94. ZHANG J H, GAO H, OUYANG Y, et al. Sensitivity evaluation of soil erosion in Qianxi County of Guizhou Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(2): 88-94.
- [7] 闫利会, 周忠发, 王媛媛. 丹霞地区水土流失遥感评价及空间分异——以贵州省赤水市为例[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(20): 4491-4495.

- YAN L H, ZHOU Z F, WANG Y Y. Remote sensing evaluation and spatial distribution of soil erosion in Danxia area: A case of Chishui City of Guizhou[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(20): 4491-4495.
- [8] 王娇, 程维明, 祁生林, 等. 基于USLE和GIS的水土流失敏感性空间分析——以河北太行山区为例[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 614-624. WANG J, CHENG W M, QI S L, et al. Sensitive evaluation and spatial analysis of soil and water loss based on USLE and GIS: Taking Taihang Mountain area of Hebei Province as an example[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(4): 614-624.
- [9] 龚雪梅, 冯文兰, 郑杰, 等. 岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 68-74. GONG X M, FENG W L, ZHENG J, et al. Assessment of soil erosion sensitivity in the upper reaches of Minjiang River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(9): 68-74.
- [10] 杨新华, 王侃, 李加林, 等. 基于GIS的慈溪市土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 210-215. YANG X H, WANG K, LI J L, et al. A GIS-based assessment on soil erosion sensitivity in Cixi City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(4): 210-215.
- [11] 陈锐银, 严冬春, 王安邦, 等. 基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 17-26. CHEN R Y, YAN D C, WEN A B, et al. Research on soil erosion in key prevention and control region of soil and water loss based on GIS/CSLE in Sichuan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 17-26.
- [12] 李铖, 李俊祥, 朱飞鸽, 等. 基于RUSLE的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1577-1585. LI C, LI J X, ZHU F G, et al. Sensitivity evaluation and key sensitive factors identification of soil erosion around Hangzhou Bay based on RUSLE[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1577-1585.
- [13] 邹金浪, 谢花林, 杨子生, 等. 基于USLE的土壤侵蚀敏感性评价及其空间自相关分析——以江西省兴国县为例[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(6): 761-765. ZOU J L, XIE H L, YANG Z S, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and its spatial autocorrelation analysis based on USLE: A case study of Xingguo County in Jiangxi Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(6): 761-765.
- [14] 李团胜, 史小惠, 康欢欢, 等. 榆林地区水土流失敏感性时空特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 271-276. LI T S, SHI X H, KANG H H, et al. Spatial-temporal characteristics of sensitivity to soil and water loss in Yulin, China[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2016, 46(2): 271-276.
- [15] 于婧, 陈艳红, 彭婕, 等. 基于GIS和Fragstats的土地生态质量综合评价——以湖北省仙桃市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2932-2943. YU J, CHEN Y H, PENG J, et al. Comprehensive evaluation on land ecological quality based on GIS and Fragstats: A case study in Xiantao City, Hubei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(9): 2932-2943.
- [16] 王志杰, 苏嫄. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 432-442. WANG Z J, SU Y. Analysis of eco-environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the South-to-North Water Transfer Project, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 432-442.
- [17] 张利华, 李辉, 张艳艳. 基于¹³⁷Cs示踪法的丹江口小流域农用地土壤侵蚀研究[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 273-277. ZHANG L H, LI H, ZHANG Y Y. Evaluation of soil erosion rate in Danjiangkou City using ¹³⁷Cs tracing method[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 273-277.
- [18] 王超, 贾海燕, 汪涛, 等. 丹江口库区典型小流域水体氮素分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 696-705. WANG C, JIA H Y, WANG T, et al. Characteristics of nitrogen distribution in typical small watershed in Danjiangkou reservoir area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(3): 696-705.
- [19] 章影, 廖畅, 姜庆虎, 等. 丹江口库区土壤侵蚀对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 104-111, 2. ZHANG Y, LIAO C, JIANG Q H, et al. Response of soil erosion to land use change in Dangjiangkou reservoir area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 104-111, 2.
- [20] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 14-19. WANG X K, OUYANG Z Y, XIAO H, et al. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 14-19.
- [21] 赵平伟, 郭萍. 1980—2013年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1306-1311. ZHAO P W, GUO P. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in northwest Yunnan Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1306-1311.
- [22] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20. WANG W Z, JIAO J Y. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(5): 1-20.
- [23] 怡凯, 王诗阳, 王雪, 等. 基于RUSLE模型的土壤侵蚀时空分异特征分析——以辽宁省朝阳市为例[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 365-372. YI K, WANG S Y, WANG X, et al. The characteristics of spatial-temporal differentiation of soil erosion based on RUSLE model: A case study of Chaoyang City, Liaoning Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3): 365-372.
- [24] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion-sediment yield models[J]. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [25] 张荣华, 刘霞, 姚孝友, 等. 桐柏大别山区土壤侵蚀敏感性评价及空间分布[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 58-64. ZHANG R H, LIU X, YAO X Y, et al. Assessment and spatial distribution of soil erosion sensitivity in Tongbai-Dabie Mountainous area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(1): 58-64.
- [26] 刘文超, 刘纪远, 匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1835-1852. LIU W C, LIU J Y, KUANG W H. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the Grain for Green Project in northern Shaanxi[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1835-1852.

- [27] 国家环境保护总局. 生态功能区划技术暂行规程[R]. 2002-07-30. State Environmental Protection Administration of the PRC. The temporary regulations for eco-functional regionalization[R]. 2002-07-30.
- [28] 卢金发. 黄河中游流域地貌形态对流域产沙量的影响[J]. 地理研究, 2002, 21(2): 171-178. LU J F. Effect of basin morphology on sediment yield in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 171-178.
- [29] 杨广斌, 李亦秋, 安裕伦. 基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 73-78. YANG G B, LI Y Q, AN Y L. Pixel-based assessment and spatial distribution of sensitivity of soil erosion in Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(1): 73-78.
- [30] 张恩伟, 彭双云, 冯华梅. 基于GIS和RUSLE的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 115-122. ZHANG E W, PENG S Y, FENG H M. Sensitivity assessment of soil erosion and its spatial pattern evolution in Dianchi Lake basin based on GIS and RUSLE[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 115-122.
- [31] 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. 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.
- [32] 朱明勇, 谭淑端, 张全发. 南水北调中线工程水源地的土壤可蚀性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(8): 1161-1165. ZHU M Y, TAN S D, ZHANG Q F. Characteristics of soil erodibility in the South-to-North Water Transfer Project (middle route), China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(8): 1161-1165.
- [33] 刘超贤. 基于RS与GIS技术的丹江口库区土地生态安全变化及影响因素研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. LIU C X. Analysis on land ecological security change and affect factors based on RS and GIS in Danjiangkou reservoir area, China[J]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.