

土壤侵蚀下黑龙江省人地系统适应性研究

徐秋¹ 雷国平¹ 杨厚翔^{1,2} 陈建龙² 连臣³

(1. 东北大学土地管理研究所, 沈阳 110169; 2. 黑龙江省国土空间规划研究院, 哈尔滨 150090;
3. 黑龙江省土地利用监测和综合治理中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 为缓解人地关系,以对黑龙江省威胁最大的土壤侵蚀为切入点,从“三生”视角分析区域人地系统适应性,并提出基于不同修复优先级的人地系统修复方案。首先,在总结、梳理适应性内涵,整合适应性理论与方法基础上,从“三生”视角提出了基于风险扰动的适应性分析框架,将系统适应性分解为扰动、影响、响应、能力4方面,并从土壤侵蚀风险扰动出发,构建了系统适应性评价指标体系与评价模型;其次,采用极差标准化法、克里格插值法、蔡崇法法和 DEA-CCR 模型处理数据,利用土壤侵蚀方程测算土壤侵蚀风险,利用适应性评价模型测算适应性指数,分析土壤侵蚀风险和人地系统适应性分布情况;最后,提出基于不同修复优先级组合模式的人地系统修复方案。结果表明:黑龙江省土壤侵蚀风险区面积为 1 366.61 万 hm²,占区域耕地面积的 85.74%,高、中、低级别风险规模分别为 324.02、596.33、446.26 万 hm²。高、较高级别人地系统适宜程度区分布在三江平原东北部和松嫩平原东南部地区,中级别分布在大兴安岭和松嫩平原南部地区,低、较低级别分布在东南部山地和松嫩平原北部地区。形成了基于不同修复优先级组合模式的人地系统修复方案,其中 53 个地区仅存在 1 种人地系统修复方案,其余 27 个地区在不同优先级组合模式下形成了不同的人地系统修复方案,为区域人地系统修复提供了多种选择方案。

关键词: 人地系统; 适应性; 土壤侵蚀; 修复方案; 黑龙江省

中图分类号: F301.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)09-0201-10 **OSID:** 

Adaptability of Human – Land System under Disturbance of Soil Erosion of Heilongjiang Province

XU Qiu¹ LEI Guoping¹ YANG Houxiang^{1,2} CHEN Jianlong² LIAN Chen³

(1. Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang 110169, China
2. Heilongjiang Research Institute of Territory’s Spatial Planning, Harbin 150090, China
3. Heilongjiang Province Land Use Monitoring and Comprehensive Management Center, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to alleviate the relationship between human and land, taking the soil erosion that is the most threatening to Heilongjiang Province as the starting point, the adaptability of the regional human – land system was analyzed from the perspective of production – living – ecological, and human – land system restoration schemes were proposed based on different restoration priorities. Firstly, on the basis of summing up and sorting out the connotation of adaptability and integrating the theory and methods of adaptation, a framework for adaptive analysis based on risk disturbance was proposed, which decomposed system adaptability into four aspects: disturbance, impact, response, and capability. Starting from the disturbance of soil erosion risk, a systematic adaptability evaluation index system and evaluation model were constructed. Secondly, the range standardization method, Kriging interpolation method, CAI Chongfa method, and DEA-CCR model were used to process the data, and the soil erosion equation was used to measure the soil erosion risk. The adaptation evaluation model was used to calculate the adaptation index, analyze the soil erosion risk and the adaptive distribution of the human – land system. Finally, a human – land system restoration scheme based on the combination of different restoration priority modes was proposed. The results showed the area of soil erosion risk area in Heilongjiang

收稿日期: 2019-12-24 修回日期: 2020-01-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(41671520)
作者简介: 徐秋(1987—),女,博士生,主要从事土地利用与规划研究,E-mail: xuqiu27@163.com
通信作者: 雷国平(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事土地利用与规划管理研究,E-mail: guopinglei@126.com

Province was 13.666 1 million hm^2 , accounting for 85.74% of the area of cultivated land in the region, and the scales of the high, middle and low-level risk scale were 3.240 2 million hm^2 , 5.963 3 million hm^2 and 4.462 6 million hm^2 . Adaptation areas for high-level and high-level human – land systems suitability areas were distributed in the northeast of the Sanjiang Plain and the southeast of the Songnen Plain, middle levels were distributed in the Daxing'an Mountains and the southern area of the Songnen Plain, and low and lower levels were distributed in the southeast mountains and Northern Songnen Plain. The research formed a human – land system restoration scheme based on different restoration priority combination modes, of which only one kind of human – land system restoration scheme existed in 53 regions, and the remaining 27 areas formed different human – land system restoration schemes under different priority combination modes. The research result provided a variety of options for the repair of regional human – land systems.

Key words: human – land system; adaptability; soil erosion; restoration scheme; Heilongjiang Province

0 引言

随着科学技术的进步,人类活动对自然生态系统的影响愈发强烈,加之毁林开荒、重种轻养、过度施肥等掠夺式的生产经营方式长期作用于脆弱的自然环境,以及保护措施滞后,打破了原有的平衡状态,而这种不平衡成为土地退化的驱动力,扰动着区域生产、生活、生态环境,进一步激化了人地关系之间的矛盾^[1]。科学界相继提出了“预防、阻止、减缓”等概念,直至“适应性”这一理念被普遍认同,并列为可持续发展的关键^[2]。全球变化的四大科学计划(国际地圈生物圈计划、国际全球环境变化人文因素计划、国际生物多样性计划和世界气候研究计划)都将科学地适应未来环境变化作为人类社会可持续发展的重要准则,同时适应性战略也出现在发达国家的政策体系中,由此可见适应性已成为当前全球变化科学领域的前沿和核心概念之一。我国于2006年颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》将全球变化的区域适应问题研究列为面向国家重大战略需求的基础研究,表明在未来一段时期内适应性将是我国经济社会发展迫切需要研究的重要科学问题。20世纪90年代,适应性已成为全球地理学、生态学、环境科学等相关学科及交叉学科的重点研究方向,已有研究领域多集中在自然科学^[3-4]、社会科学^[5]和全球变化领域^[6],研究内容多为适应性内涵及概念的探讨^[7]、适应性理论体系和分析框架的探索^[8]、适应战略与对策^[9]等定性分析探讨阶段,研究视角也逐渐具体化,相继在农户生计^[10-12]、旅游发展^[13-14]、城市景观^[15-16]以及产业系统^[17-18]等视角下对适应性进行具体研究。然而,已有研究多重人轻地,即单方面考虑适应能力,忽视了区域不同自然、人为立地条件及其组合模式导致的系统扰动风险的差异及影响,导致评价结果的科学性有待商榷。

土壤侵蚀是当今人类面临的一种最普遍、持续

性最强的地质灾害,是我国最主要的生态环境问题之一,不仅造成土壤及土壤中氮、磷、钾、有机质等养分的流失,同时还会造成河床淤积、水质污染,增加了旱涝等灾害风险,对区域生产、生活、生态环境,甚至生命安全构成威胁^[19-20]。根据第二次全国土壤侵蚀遥感调查,全国土壤侵蚀面积占调查国土面积的37.42%,水利普查结果显示,中国黑土区有侵蚀沟29.57万条,每年土壤流失量为 4.98×10^9 t,土壤有机质流失高达 1.63×10^8 t,损失的氮、磷、钾共计 1.18×10^8 t^[21]。黑龙江省是世界三大黑土地带之一,是我国重要的商品粮生产基地,由于长期缺乏科学合理的开发利用,已成为我国最严重的土壤侵蚀地区之一,若不及时治理,再过50年大部分黑土层将流失殆尽^[22]。

本文基于典型案例分析,构建基于“三生”视角的土壤侵蚀风险扰动下人地系统适应性分析框架,将土壤侵蚀作为扰动因子,从生产、生活、生态环境3方面评估黑龙江省人地系统适应性,并提出基于不同“三生”修复优先级的人地系统修复方案,旨在推动区域可持续管理策略的制定,为统一的适应性理论、分析框架以及数理方法的形成提供案例参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,介于北纬 $43^{\circ}26'$ ~ $53^{\circ}33'$ 、东经 $121^{\circ}11'$ ~ $135^{\circ}5'$ 之间,是全国第一产粮大省和重要的商品粮生产基地,承担着保障国家粮食安全重任,被称为中国“战略粮仓”。但由于长期不合理的耕作方式、森林过度采伐、草原过度放牧和盲目开垦等人为原因,土壤侵蚀问题日趋严重,黑龙江省现有侵蚀沟11.6万条,占全国侵蚀沟总数的39.23%,黑土层厚度由开垦初期的80~100 cm下降到目前的20~30 cm,平均每年流失表土 $0.7 \sim 1.0$ cm,土壤有机质含量(质量比)由第二次土壤普查的38.7 g/kg下降到现在的26.7 g/kg,每年由于

土壤侵蚀造成的粮食减产高达 400 万吨。

1.2 数据来源与处理

土壤侵蚀风险评价方面。降雨侵蚀力因子采用李巍等^[23]研究成果,利用 ArcGIS 软件将测算出的各站点降雨侵蚀因子矢量化,由于点位分布稀疏而不均匀,故利用克里格插值法推算出空间面上降雨侵蚀力因子分布;土壤可蚀性因子采用周宁等^[24]研究成果,结合黑龙江省土壤类型进行赋值,土壤类型数据来自中国土壤数据库;坡度坡长因子数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台;植被覆盖与管理因子采用蔡崇法等^[25]提出的方法利用植被覆盖度估算,其中 NDVI 来自地理国情监测云平台空间分辨率 1 km 时间分辨率 16 d 的数据产品;水土保持措施因子参照隋欣^[26]研究成果,结合黑龙江省土地利用图进行赋值,林地、草地为 1,旱地为 0.35,水田为 0.01,水域、城乡建设用地为 0;以上数据统一转换为 90 m × 90 m 的空间分辨率,GCS_Xian_1980 投影坐标系参与空间运算。土壤侵蚀风险评价因子见图 1。

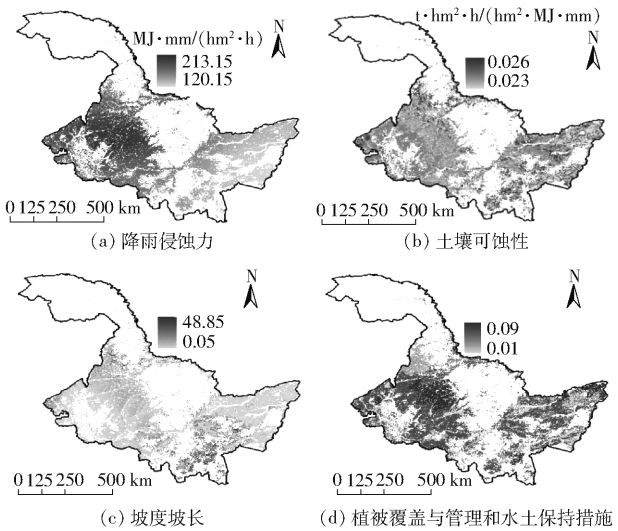


图 1 土壤侵蚀风险评价因子

Fig. 1 Risk assessment factor of soil erosion

适应能力评价方面。耕层厚度、土壤有机质含量来自农用地分等成果;地均地区生产总值、单位面积粮食产量、居民人均可支配收入、地均中小学教育在校学生数、地均卫生机构数、单位面积公路线路里程来自黑龙江省统计年鉴;耕地利用效率数据采用数据包络分析(CCR-DEA 模型)测算获取,其基础数据来自黑龙江省统计年鉴。土地、劳动、资本作为耕地生产最基本的三大生产要素,本文选取地均劳动力、地均农药投入量、地均化肥投入量、地均农业机械总动力投入量、地均农用塑料薄膜投入量、地均用电量作为耕地利用投入指标;选取地均粮食产量作为耕地利用产出指标。运用 DEA-CCR 模型对

全省各地区耕地利用效率进行测算。设有 k 个决策单元,每个决策单元均有 m 种投入 $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$, n 种产出 $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj})$ ($j = 1, 2, \dots, k$)。耕地利用效率测算模型为

$$\begin{cases} \min \theta \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^k X_j \lambda_j \leq \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^k Y_j \lambda_j \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ ——耕地利用效率,取 0 ~ 1,当效率为 1 时,表明该决策单元的耕地利用效率处于完全有效状态

λ_j ——决策单元的现行组合系数

以上数据采用极差标准化法对原始数据进行标准化处理,利用 ArcGIS 添加相关属性信息,并转换为 GCS_Xian_1980 投影。适应能力评价因子见图 2。

2 分析框架

2.1 人地系统适应性内涵

适应一词最早源于进化生态学,达尔文在阐述自然选择原理时用生存来定义适应,即优胜劣汰、适者生存,可见是否生存和生存优劣表征是否适应及适应程度。随后适应普遍应用在社会经济领域,在国际全球环境变化人文因素计划(International human dimensions programme on global environmental change, IHDP)研究中,适应性与脆弱性紧密联系,脆弱性是系统固有的一种属性,只有当系统遭受扰动时这种属性才表现出来,表现为当系统受到外部扰动时所遭受某种程度的损失或损害。适应是指当系统面对变化、压力、灾害以及风险或者机遇时,系统响应的过程、行动,亦或结果^[9]。可见适应性分析主要包括适应主体、适应对象、适应过程和适应能力。土壤侵蚀扰动下人地系统适应性内涵表现为:①适应主体为社会生态系统中的成员。②适应对象为扰动风险,该处为土壤侵蚀退化风险。③适应过程表现为社会生态系统中的成员为降低土壤侵蚀风险及其对生产、生活、生态环境的潜在危害或现实威胁,所采取的一系列技术、生物、工程等科学的措施和手段。④适应能力表现为生产、生活、生态环境运行状态,即基于“三生”视角的土壤侵蚀风险扰动下人地系统适应性内涵为社会生态系统中的成员为降低土壤侵蚀风险及其对生产、生活、生态环境的潜在危害或现实威胁,采取技术、工程、生物、经济等一系列科学的措施和手段后,生产、生活和生态环境运行状态的优良程度。

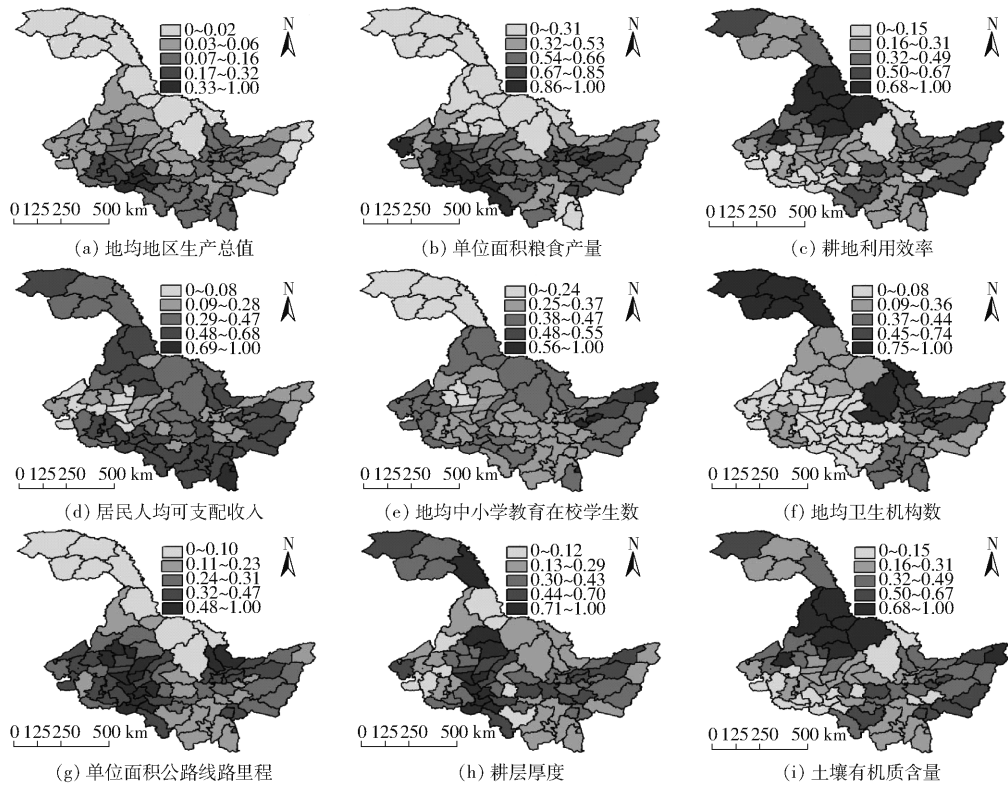


图 2 “三生”系统适应能力评价指标标准化值

Fig. 2 Standardized value of adaptability evaluation index of production – living – ecological system

2.2 人地系统适应性分析框架

前人设计了诸多概念模型框架,常见的有压力-响应 (Pressure – response, PR) 模型、压力-状态-响应 (Pressure – state – response, PSR) 模型、驱动力-状态-响应 (Driving force – state – response, DSR) 模型、压力-状态-响应-潜力 (Pressure – state – response – potential, PSRP) 模型、驱动力-压力-状态-影响-响应 (Driving force – pressure – state – impact – response, DPSIR) 模型,在所有的系统框架模型中 PSR 应用最为广泛, DPSIR 框架模型内容比较全面。

由适应性内涵可以看出,适应性既包括生态问题发生的因果链条,又包括与社会生态系统中成员息息相关的生产、生活、生态环境运行状态的优良程度。DPSIR 解释了引发问题的因果链条,但是没有解释有关措施手段响应后,系统运行状态的优良程度,无法完全符合适应性分析思路,因此本文在 DPSIR 基础上,结合适应性研究思路和需求建立集因果链条和适应能力的概念模型,即扰动-影响-响应-能力 (Disturbance – impact – response – ability, DIRA) 概念模型,扰动 (Disturbance, D) 为不同自然立地条件、人为立地条件及其组合模式综合作用形成的具体扰动风险;影响 (Impact, I) 为具体扰动风险对生产、生活、生态环境的影响;响应 (Response, R) 是为了缓解或避免问题而采取的措施;能力

(Ability, A) 为响应机制施行后系统运行状态的优良程度。

3 研究方法

3.1 人地系统适应性评价指标体系构建

扰动-影响-响应-能力 (DIRA) 适宜性分析框架能够解释人地系统适应的整个过程,包括风险扰动的程度与成因、影响、响应措施、系统运行的优良状态。其中扰动 (D)、能力 (A) 能够解释在面临具体风险扰动下系统运行的优良状态。而影响 (I)、响应 (R) 主要作为解释变量,保证适应能力指标选取的逻辑合理性和可解释性。本文在理顺土壤侵蚀风险扰动过程基础上,构建土壤侵蚀扰动下的人地系统适应性评价指标体系,包括风险扰动 (D)、适应能力 (A)。

风险扰动 (D) 指标层依据土壤侵蚀方程式^[27-31],选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖与管理、水土保持措施作为风险扰动评价指标。其中,降雨是引起水土流失主要动力因素,降雨侵蚀力因子是反映由降雨引起土壤分离和搬运的指标。土壤作为被侵蚀对象,自身可蚀性是水土流失发生的内在因素,土壤可蚀性因子可客观反映不同类型土壤在雨滴击溅、径流冲刷等作用下,被分散、搬运的难易程度。地貌形态特征是影响土壤侵蚀的重要因素,各种地貌形态,如平原、山地、山谷都

是由不同坡面组成,地貌变化实际上源于坡面的变化,主要通过坡度坡长因子影响下垫面的形态,从而影响雨滴对坡面的打击角、汇流面积、径流冲刷过程与水沙物质汇集关系。地表植被可以截留降雨,减少雨滴击溅土壤的动能,增加土壤团粒结构,固结土壤,使地表径流和土壤流失减弱。植被覆盖与管理因子为种植作物或有林草的土地与连续休闲地之间的土壤流失量的比值,是反映地面植被对土壤侵蚀影响的指标。水土保持措施因子是在其他条件相同的情况下实行某种保土措施,采用专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土

壤流失量的比值,是反映水土保持措施对土壤侵蚀影响的指标。适应能力(A)指标的选取应体现出具体的风险所扰动的领域,根据其运行状态的优良程度,表征适应能力。土壤侵蚀扰动可分为直接扰动和间接扰动,直接扰动主要体现在生态方面,土壤侵蚀直接带来耕层变薄和土壤有机质流失。间接影响主要是由直接影响而导致的,主要体现在耕地利用、粮食生产和地区经济水平等生产方面,以及收入、医疗、教育、交通等生活方面。综上,本文从生产、生活、生态 3 方面选取 9 个指标作为适应能力评价指标,见表 1。

表 1 土壤侵蚀风险干扰下人地系统适应性评价模型指标体系
Tab.1 Adaptability evaluation index system of human – land system under disturbance of soil erosion risk

目标层	准则层	权重 w_i	指标层	权重 w_{ij}
风险扰动(D)	土壤侵蚀	0.42	降雨侵蚀力	
			土壤可蚀性	
			坡度坡长	
			植被覆盖与管理和水土保持措施	
适应能力(A)	生产	0.42	地均地区生产总值	0.62
			单位面积粮食产量	0.14
			耕地利用效率	0.24
	生活	0.39	居民人均可支配收入	0.23
			地均中小学教育在校学生数	0.08
			地均卫生机构数	0.48
			交通(单位面积公路线路里程)	0.21
	生态	0.19	耕层厚度	0.47
			土壤有机质含量	0.53

3.2 土壤侵蚀风险评估方法

利用通用土壤流失方程(Universal soil loss equation,USLE)测算土壤侵蚀模数^[32],侵蚀模数越大表明区域土壤侵蚀风险越大,借助 ArcGIS 空间分析(Spatial analysis)模块中的栅格运算(Raster calculator)功能,将土壤侵蚀指标层各因子相乘,得到每个栅格的年土壤侵蚀量,采用自然断点法划分土壤侵蚀风险级别。计算公式为

$$A = RKLSCP \tag{2}$$

式中 A——土壤侵蚀模数,t/km²
R——降雨侵蚀力因子,MJ·mm/(hm²·h)
K——土壤可蚀性因子,t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)
L——坡长因子
S——坡度因子
C——植被覆盖与管理因子
P——水土保持措施因子

3.3 人地系统适应性评估模型

系统适应性取决于风险干扰程度与表征系统环境运行优良状态的适应能力。根据适应性分析概念框架,借鉴 VISHNU 等^[33]运用的适应能力量化方法,以及 LUERS 等^[34]、METZGER 等^[35]提出的函数

模型,构建适应能力指数与风险指数的函数关系,对人地系统适应性进行评估,利用自然断点法将适宜性程度划分为 5 级(低、较低、中、较高、高)。具体函数模型为

$$F = \sum_{i=1}^3 F_i w_i \tag{3}$$

其中 $F_i = I_{ci}/I_s \tag{4}$

$$\begin{cases} I_{ci} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \mu_{ij} \\ I_s = Z_n A_m \end{cases} \tag{5}$$

式中 F——适应性指数
F_i——第 i 个子系统适应性指数
w_i——子系统权重
I_c——适应能力指数
I_{ci}——第 i 个子系统适应能力指数
w_{ij}——第 i 个子系统第 j 个指标的权重
μ_{ij}——第 i 个子系统第 j 个指标标准化值
I_s——土壤侵蚀风险指数
Z_n——土壤侵蚀等级的标准化赋值,采用自然断点法将土壤侵蚀模数划分为 3 级(高、中、低),赋值 1.00、0.70、0.40

A_m ——各级别土壤侵蚀量比重
 n ——各子系统指标个数

权重采用熵值法确定,熵值法能够反映指标信息熵值的效用价值,其计算的指标权重相比主观确权方法具有较高的可信度,被广泛应用于相关领域研究,权重测算结果见表 1。

3.4 人地系统修复方案

依据木桶原则,将生产、生活、生态环境中最不适宜的类型作为生态修复类型,在此基础上依据不适宜程度确定修复优先级。对于存在 2 种或 2 种以上最不适宜类型的地区,制定基于不同修复优先级的人地系统修复方案,分别为:①生产→生活→生态。②生产→生态→生活。③生活→生产→生态。④生活→生态→生产。⑤生态→生产→生活。⑥生态→生活→生产。

4 实证研究

4.1 土壤侵蚀风险空间分布特征

利用 ArcGIS 软件对土壤流失方程的各因子数据进行处理,生成因子栅格图层。根据土壤流失方程对各因子图层加权叠加运算,得到土壤侵蚀评估结果。采用自然断点法对区域土壤侵蚀风险进行分级(图 3),划分为高、中、低级别风险区和非风险区。由图 3 可以看出,黑龙江省土壤侵蚀风险级别呈现由大到小依次为东南部山地、大小兴安岭、松嫩平原、三江平原的总体格局,中、高级别集中分布在东南部山地,大小兴安岭,松嫩平原北、东北、西部及三江平原西南部地区,低级别分布在松嫩平原中南部地区以及三江平原中北、西北、东北部地区。

由表 2 可以看出,黑龙江省土壤侵蚀风险区面积为 1 366. 61 万 hm^2 ,占区域耕地面积的 85. 74%,

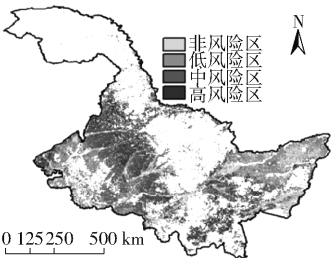


图 3 土壤侵蚀风险级别

Fig. 3 Risk levels of soil erosion

从规模上看由大到小总体呈现中级别、低级别、高级别,其中高、中、低级别风险区规模分别为 324. 02、596. 33、446. 26 万 hm^2 。其中高级别风险规模占耕地总规模的 20. 33%,由大到小依次为松嫩平原、东南部山地、三江平原、大小兴安岭;中级别风险规模占耕地总规模的 37. 41%,由大到小依次为松嫩平原、三江平原、大小兴安岭、东南部山地;低级别风险规模占耕地总规模的 28. 00%,由大到小依次为三江平原、松嫩平原、大小兴安岭、东南部山地。

表 2 黑龙江省土壤侵蚀风险级别面积分布

Tab. 2 Distribution of soil erosion risk level in Heilongjiang Province

地区	高级别		中级别		低级别	
	面积/	比例/	面积/	比例/	面积/	比例/
	万 hm^2	%	万 hm^2	%	万 hm^2	%
三江平原	63. 58	3. 99	114. 45	7. 18	218. 96	13. 74
松嫩平原	161. 26	10. 12	425. 03	26. 66	208. 81	13. 10
大小兴安岭	27. 86	1. 75	30. 86	1. 94	11. 12	0. 70
东南部山地	71. 32	4. 47	25. 99	1. 63	7. 37	0. 46

4.1.1 水平分布特征

对黑龙江省不同级别土壤侵蚀风险进行核密度分析,结果见图 4。

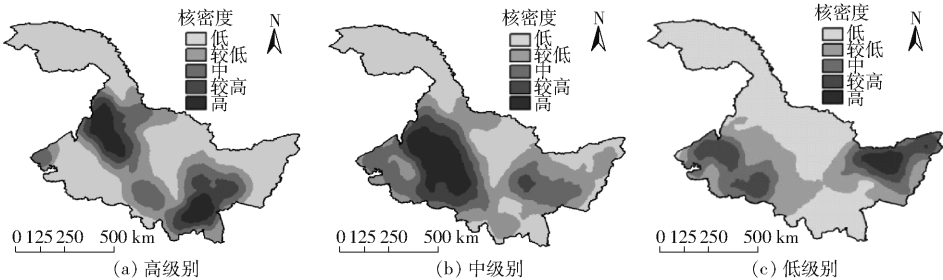


图 4 不同级别土壤侵蚀核密度分布图

Fig. 4 Distribution maps of nuclear density of soil erosion at different levels

由图 4 可以看出,不同级别土壤侵蚀风险集聚特征明显,其中高级别风险总体呈现双核心分布,分别分布在松嫩平原东北部与大小兴安岭交界处的克东县、克山县、拜泉县、五大连池市、讷河市、嫩江市,以及东南部山地的穆棱市、林口县;中级别呈 1 个核心 1 个次核心,核心分布在松嫩平原中东部至北部

与大小兴安岭交界处的明水县、青冈县、望奎县、克东县、巴彦县、依安县、克山县、拜泉县、海伦县、讷河市,次核心分布在三江平原中西部的勃利县、桦南县、依兰县;低级别呈 1 个核心 2 个次核心,核心分布在三江平原中北部的友谊县、绥滨县、富锦市,次核心分布在松嫩平原西北部的林甸县、富裕县和松

嫩平原中南部的兰西县、双城市、肇东市。

4.1.2 垂直分布特征

将 DEM 数据与土壤侵蚀风险级别进行叠加,分别统计不同级别风险区平均海拔,其中高级别风险区平均海拔为 283.51 m,中级别为 191.19 m,低级别为 107.28 m。可以看出,土壤侵蚀风险级别总体呈现高海拔大于低海拔的分布特征。为进一步分析不同级别土壤侵蚀风险垂直分布特征,将 DEM 数据按照 50 m 间距划分高程带,统计不同高程带上的土壤侵蚀风险面积、比例;利用面积加权指数法测算不同高程带平均风险级别,其中高、中、低级别分别对应 3、2、1 级;利用分布指数模型测算不同高程带分布指数,统计结果见表 3。

表 3 土壤侵蚀风险规模、比例、分布指数、平均等级垂直分布特征

Tab.3 Scale,proportion,distribution index and average grade vertical distribution characteristics of drought-type cultivated land quality degradation risk

高程带/ m	风险区		平均 等级	分布 指数
	面积/万 hm ²	比例/%		
0 ~ 50	108.62	7.95	1.09	0.74
50 ~ 100	153.42	11.23	1.35	0.79
100 ~ 150	298.54	21.85	1.62	1.01
150 ~ 200	296.48	21.69	1.91	1.04
200 ~ 250	187.01	13.68	2.25	1.12
250 ~ 300	138.57	10.14	2.44	1.15
300 ~ 350	86.97	6.36	2.58	1.16
350 ~ 400	47.7	3.49	2.71	1.16
400 ~ 450	24.65	1.80	2.84	1.16
450 ~ 500	12.42	0.91	2.90	1.16
500 ~ 550	6.96	0.51	2.86	1.16
> 550	5.28	0.39	2.94	1.16

由表 3 可以看出,土壤侵蚀风险规模总体呈现两头小中间大的分布特征,其中 100 ~ 150 m 高程带上风险规模最大,为 298.54 万 hm²,占比为 21.85%;大于 550 m 高程带规模最小,为 5.28 万 hm²,占比为 0.39%;分布指数表现为递增趋势,其中在大于 100 m 高程带上处于优势分布;平均等级总体呈现随高程的增加而增加,其中大于 550 m 高程带上土壤侵蚀级别最高,其次是 450 ~ 500 m 高程带上,级别最低的是小于 50 m 高程带。

4.2 人地系统适应性分布

利用 3.3 节研究方法,采用自然断点的分类方法,计算土壤侵蚀风险扰动下人地系统适应性水平,结果见图 5。

由图 5 可以看出,黑龙江省高、较高级别人地系统适宜程度区主要分布在三江平原东北部和松嫩平

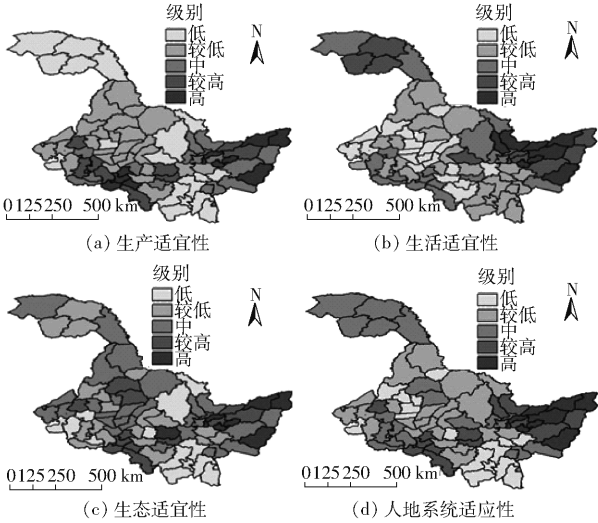


图 5 土壤侵蚀扰动下黑龙江省人地系统适应性水平

Fig.5 Adaptability level of human – land system in Heilongjiang Province under soil erosion disturbance

原东南部地区,中级别适宜程度区主要分布在大兴安岭和松嫩平原南部地区,低、较低级别适宜程度区主要分布在东南部山地和松嫩平原北部地区。其中高、较高级别生产适宜程度区分布在三江平原东北部和松嫩平原东南部地区,低、较低级别适宜程度区分布在大兴安岭和东南部山地区;高、较高级别生活适宜程度区分布在三江平原北部和大兴安岭北部,低、较低级别适宜程度区分布在松嫩平原与大小兴安岭、东南部山地交界区;高、较高级别生态适宜程度区分布在三江平原中北部、松嫩平原东南部地区,低、较低级别适宜程度区分布在松嫩平原西南部和东南部山地区。

4.3 人地系统修复方案

采用 3.4 节方法确定人地系统修复方案,采取修复类型-修复优先级的表达方式,结果见表 4。表 4 中 A1 ~ A7 表示不同“三生”修复优先级组合模式下人地系统修复方案有所调整的地区,B1 ~ B9 表示不同“三生”修复优先级组合模式下人地系统修复方案未调整的地区。A1 包括拜泉县,A2 包括东宁市、海林市、嘉荫县、林口县、牡丹江市本级、穆棱市、宁安市、泰来县、伊春市本级,A3 包括爱辉区、北安市、嫩江县、五大连池市、逊克县、依安县,A4 包括富锦市、绥滨县,A5 包括宝清县、鹤岗市、萝北县、饶河县,A6 包括木兰县,A7 包括安达市、巴彦县、大庆市本级、肇东市,B1 包括勃利县、呼玛县、呼中区、漠河县、七台河市本级、塔河县、铁力市、新林区,B2 包括桦南县、庆安县,B3 包括集贤县、佳木斯市本级、密山市、汤原县,B4 包括北林区、宾县、甘南县、海伦市、克东县、克山县、兰西县、龙江县、明水县、讷河市、齐齐哈尔市本级、青

冈县、尚志市、绥棱县、孙吴县、望奎县、延寿县、依兰县,B5 包括富裕县、鸡东县、鸡西市本级、通河县,B6 包括阿城区、方正县、哈尔滨市本级、呼兰区、双城区、五常市,B7 包括抚远市、桦川县,B8 包括杜尔伯特蒙古族自治县、林甸县、绥芬河市、肇州县,B9 包括肇源县。

表 4 基于“三生”优先级组合模式的人地系统修复方案

Tab.4 Human – land system repair scheme based on production – living – ecological priority combination model						
类型	人地系统修复方案					
	生产→生活→生态	生产→生态→生活	生活→生产→生态	生活→生态→生产	生态→生产→生活	生态→生活→生产
A1	生产-高级别	生产-高级别	生活-高级别	生活-高级别	生产-高级别	生活-高级别
A2	生产-高级别	生产-高级别	生产-高级别	生态-高级别	生态-高级别	生态-高级别
A3	生产-较高级别	生产-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别	生产-较高级别	生活-较高级别
A4	生产-低级别	生产-低级别	生产-低级别	生态-低级别	生态-低级别	生态-低级别
A5	生产-较低级别	生产-较低级别	生产-较低级别	生态-较低级别	生态-较低级别	生态-较低级别
A6	生活-高级别	生态-高级别	生活-高级别	生活-高级别	生态-高级别	生态-高级别
A7	生活-较高级别	生态-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别	生态-较高级别	生态-较高级别
B1	生产-高级别	生产-高级别	生产-高级别	生产-高级别	生产-高级别	生产-高级别
B2	生产-较高级别	生产-较高级别	生产-较高级别	生产-较高级别	生产-较高级别	生产-较高级别
B3	生产-较低级别	生产-较低级别	生产-较低级别	生产-较低级别	生产-较低级别	生产-较低级别
B4	生活-高级别	生活-高级别	生活-高级别	生活-高级别	生活-高级别	生活-高级别
B5	生活-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别	生活-较高级别
B6	生活-较低级别	生活-较低级别	生活-较低级别	生活-较低级别	生活-较低级别	生活-较低级别
B7	生活-低级别	生活-低级别	生活-低级别	生活-低级别	生活-低级别	生活-低级别
B8	生态-高级别	生态-高级别	生态-高级别	生态-高级别	生态-高级别	生态-高级别
B9	生态-较高级别	生态-较高级别	生态-较高级别	生态-较高级别	生态-较高级别	生态-较高级别

由表 4 可以看出,不同“三生”优先级的人地系统修复方案中,除爱辉区、安达市、巴彦县、拜泉县、宝清县、北安市、大庆市本级、东宁市、富锦市、海林市、鹤岗市本级、嘉荫县、林口县、萝北县、牡丹江市本级、木兰县、穆棱市、嫩江县、宁安市、饶河县、绥滨县、泰来县、五大连池市、逊克县、伊春市本级、依安县、肇东市 27 个地区外,其余 53 个地区生态修复类型未调整。27 个调整区在生产、生活、生态方面存在 2 个或 2 个以上最不宜类型,故在不同“三生”优先级组合模式下,存在不同的修复类型。53 个非调整区仅存在一种最不宜类型,因此无论在何种“三生”优先级组合模式下,修复类型均不受其影响。

5 结论

(1) 黑龙江省土壤侵蚀风险区面积为 1 366. 61 万 hm²,占区域耕地面积的 85. 74%,高、中、低级别风险规模分别为 324. 02、596. 33、446. 26 万 hm²。高级别风险呈现双核心分布,分布在松嫩平原东北部与大小兴安岭交界处、东南部山地和中东部地区;中级别风险呈现 1 个核心、1 个次核心,核心分布在松嫩平原东北部至北部片区与大小兴安岭交界处,次核心分布在三江平原中西部;低级别风险呈现 1 个核心、2 个次核心,核心分布在三江平原中北部,次核心分别分布在松嫩平原西北部、中南部。土壤侵蚀风险在 100 ~ 150 m 的高程带上

规模最大,大于 300 m 高程带上呈最优分布,大于 550 m 高程带上级别最高。

(2) 黑龙江省高、较高级别人地系统适宜程度区主要分布在三江平原东北部和松嫩平原东南部地区,中级别适宜程度区主要分布在大兴安岭和松嫩平原南部地区,低、较低级别适宜程度区主要分布在东南部山地和松嫩平原北部地区。其中,高、较高级别生产适宜程度区分布在三江平原东北部和松嫩平原东南部地区,低、较低级别适宜程度区分布在大兴安岭和东南部山地区;高、较高级别生活适宜程度区分布在三江平原北部和大兴安岭北部,低、较低级别适宜程度区分布在松嫩平原与大小兴安岭、东南部山地交界区;高、较高级别生态适宜程度区分布在三江平原中北部、松嫩平原东南部地区,低、较低级别适宜程度区分布在松嫩平原西南部和东南部地区。

(3) 共形成 6 种基于不同“三生”修复优先级组合模式的人地系统修复方案:生产→生活→生态、生产→生态→生活、生活→生产→生态、生活→生态→生产、生态→生产→生活、生态→生活→生产。其中 53 个地区仅存在一种最不宜类型,因此其不受“三生”修复优先级组合模式的影响;27 个地区在生产、生活、生态方面存在 2 个或 2 个以上最不宜类型,故在不同“三生”优先级组合模式情况下形成了不同的修复方案。

参 考 文 献

- [1] 郭晓娜,陈睿山,李强,等. 土地退化过程、机制与影响——以土地退化与恢复专题评估报告为基础[J]. 生态学报,2019,39(17):6567–6575.
GUO Xiaona, CHEN Ruishan, LI Qiang, et al. Processes, mechanisms, and impacts of land degradation in the IPBES thematic assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6567–6575. (in Chinese)
- [2] 葛全胜,陈泮勤,方修琦,等. 全球变化的区域适应研究:挑战与研究对策[J]. 地球科学进展,2004,19(4):516–524.
GE Quansheng, CHEN Panqin, FANG Xiuqi, et al. Adaptation to global change: challenge and research strategy[J]. *Progress in Geography*, 2004, 19(4): 516–524. (in Chinese)
- [3] ENGLE N L, LEMOS M C. Unpacking governance: building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil [J]. *Global Environmental Change*, 2010, 20(1): 4–13.
- [4] GALLOPÍN G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 293–303.
- [5] O'BRIEN M J, HOLLAND T D. The role of adaptation in archaeological explanation[J]. *American Antiquity*, 1992, 57(1): 36–59.
- [6] CLAR C, PRUTSCH A, STEURER R. Barriers and guidelines for public policies on climate change adaptation: a missed opportunity of scientific knowledge-brokerage [J]. *Natural Resources Forum*, 2013, 37(1): 1–18.
- [7] NELSON D R, ADGER W N, BROWN K. Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007, 32: 395–419.
- [8] KINGSBOROUGH A. Adaptation pathways in practice: mapping options and trade-offs for London's water resources [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 27: 386–397.
- [9] ADEGER W N, ARNELL N W, TOMPKINS E L. Successful adaptation to climate change across scales [J]. *Global Environmental Change*, 2005, 15(2): 77–86.
- [10] 刘伟,徐洁,黎洁. 易地扶贫搬迁农户生计适应性研究——以陕南移民搬迁为例[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(12):218–223.
LIU Wei, XU Jie, LI Jie. Livelihood adaptive capacity of rural households under poverty alleviation relocation—a case study of Southern Shannxi [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 218–223. (in Chinese)
- [11] 刘永茂,李树苗. 农户生计多样性发展阶段研究——基于脆弱性与适应性维度[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(7):147–156.
LIU Yongmao, LI Shuzhuo. Study on the development stages of household livelihood diversification [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(7): 147–156. (in Chinese)
- [12] 任凯丽,杨美玲,朱志玲. 限制开发生态区农户参与生态补偿的适应性研究——以宁夏盐池县为例[J]. 水土保持研究,2018,25(1):313–320.
REN Kaili, YANG Meiling, ZHU Zhiling. Adaptability of farmers participation in ecological compensation in the restricted development ecological areas[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(1): 313–320. (in Chinese)
- [13] 张德平. 基于旅游地生命周期的江苏省乡村旅游适应性管理策略研究 [J]. 中国农业资源与区划,2016,37(10):110–116.
ZHANG Deping. The adaptability management strategy of rural tourism based on the tourist destination life cycle [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(10): 110–116. (in Chinese)
- [14] 吴吉林,刘水良,周春山. 乡村旅游发展背景下传统村落农户适应性研究——以张家界4个村为例 [J]. 经济地理,2017,37(12):232–240.
WU Jilin, LIU Shuiliang, ZHOU Chunshan. Peasant households adaptability under the background of rural tourism development in traditional villages—a case study of 4 traditional villages in Zhangjiajie [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 232–240. (in Chinese)
- [15] 张小飞,彭建,王仰麟,等. 全球变化背景下景观生态适应性特征[J]. 地理科学进展,2017,36(9):1167–1175.
ZHANG Xiaofei, PENG Jian, WANG Yanglin, et al. Characteristics of landscape system in the context of global change [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(9): 1167–1175. (in Chinese)
- [16] 刘焱序,王仰麟,彭建,等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报,2015,70(7):1052–1067.
LIU Yanxu, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1052–1067. (in Chinese)
- [17] 郭付友,佟连军,魏强,等. 吉林省松花江流域产业系统环境适应性时空分异与影响因素 [J]. 地理学报,2016,71(3):459–470.
GUO Fuyou, TONG Lianjun, WEI Qiang, et al. Spatio-temporal difference and influencing factors of environmental adaptability assessment of industrial system in the Songhua River Basin of Jilin Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 459–470. (in Chinese)

- [18] 李博,张志强,苏飞,等.环渤海地区海洋产业生态系统适应性时空演变及影响因素[J].地理科学,2017,37(5):701-708.
LI Bo, ZHANG Zhiqiang, SU Fei, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of marine industrial ecosystem adaptability in the Bohai Sea Region [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5): 701-708. (in Chinese)
- [19] 卓志清,李勇,兴安,等.东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):259-268,336.
ZHUO Zhiqing, LI Yong, XING An, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 259-268, 336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191030&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.030. (in Chinese)
- [20] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J].农业工程学报,2009,25(2):56-61.
ZHU Bingbing, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Dynamic changes of soil erodibility during process of land degradation and restoration [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 56-61. (in Chinese)
- [21] 赵明松,李德成,张甘霖,等.基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J].土壤学报,2016,53(1):28-38.
ZHAO Mingsong, LI Decheng, ZHANG Ganlin, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 28-38. (in Chinese)
- [22] 刘晓昱.黑土流失与整治[J].水土保持研究,2005,12(5):132-133,156.
LIU Xiaoyu. The loss of blacksoil and its rehabilitation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 132-133, 156. (in Chinese)
- [23] 李巍,张文超,毛学刚,等.黑龙江省降雨侵蚀力空间分布研究[J].安徽农业科学,2015,43(24):155-157,202.
LI Wei, ZHANG Wenchao, MAO Xuegang, et al. Study on the spatial distribution of rainfall erosivity in Heilongjiang Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(24): 155-157, 202. (in Chinese)
- [24] 周宁,李超,琚存勇,等.黑龙江省土壤可蚀性K值特征分析[J].农业工程学报,2015,31(10):182-189.
ZHOU Ning, LI Chao, JU Cunyong, et al. Analysis of characteristics of soil erodibility K-value in Heilongjiang Province [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 182-189. (in Chinese)
- [25] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,24(2):20-25.
CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 24(2): 20-25. (in Chinese)
- [26] 隋欣.基于USLE模型的黑龙江省水土流失动态变化研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [27] 刘宝元,谢云,张科利.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.
- [28] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于USLE模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J].农业工程学报,2018,34(10):138-146.
PENG Shuangyun, YANG Kun, HONG Liang, et al. Spatio-temporal evolution analysis of soil erosion based on USLE model in Dianchi Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 138-146. (in Chinese)
- [29] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.
WANG Huan, GAO Jiangbo, HOU Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in Karst areas: based on the geographical detector method [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1674-1686. (in Chinese)
- [30] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.
LU Jianzhong, CHEN Xiaoling, LI Hui, et al. Soil erosion changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake basin [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 337-344. (in Chinese)
- [31] 胡刚,宋慧,石星军,等.基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析[J].地理科学,2018,38(4):610-617.
HU Gang, SONG Hui, SHI Xingjun, et al. Soil erosion characteristics based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 610-617. (in Chinese)
- [32] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses [M]. USDA Agricultural Handbook, 1978: 537.
- [33] VISHNU P P, MUKAND S B, SANGAM S, et al. A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 480-488.
- [34] LUERS A L, LOBELL D B, SKLAR L S, et al. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico [J]. Global Environmental Change, 2003, 13(4): 255-267.
- [35] METZGER M J, LEEMANS R, SCHRÖTER D. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 7(4): 253-267.