贾振宇,王世曦,刘学,等. 辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J]. 环境工程技术学报,2021,11(4):686-692.
JIA Z Y,WANG S X,LIU X,et al. Spatial and temporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2021,11(4):686-692.

辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析

贾振宇[1,2],王世曦[1,2],刘学[1,2],孙倩莹[1,2*],杨春艳[1,2],冯朝阳[1,2]
1. 环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院
2. 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室,中国环境科学研究院

摘要 土壤保持是生态系统提供的调节服务之一,在维持生态安全等方面发挥着重要作用。以辽河保护区为研究对象,基于中国土壤流失方程(CSLE)模型和地理探测器等方法,开展土壤保持功能时空变化及影响因素分析。结果表明:2010—2018 年辽河保护区土壤以微度和轻度侵蚀为主,土壤侵蚀量呈降低趋势,土壤侵蚀严重的区域主要位于河流两侧及下段;土壤保持功能不断增强,土壤保持量较高的区域集中在河流上段和中段;土壤保持功能表现出随降水量、高程增加先减少后增加,随坡度和植被覆盖度增加而增加的趋势,在林地—耕地—草地—灌木林梯度上呈递减趋势;土地利用类型是影响辽河保护区土壤保持格局的主导因素;土地利用类型为耕地,降水量为 657~735 mm,坡度为 35°~68°,高程为 -73~-26 m,植被覆盖度为 0~0.3 时,土壤保持能力最低,坡度和土地利用类型的交互作用对土壤保持能力变化的解释力最强。

关键词 土壤保持;CSLE 模型;地理探测器;辽河保护区
中图分类号: X522,S157 **文章编号:** 1674-991X(2021)04-0686-07 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20200231

Spatial and temporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Liaohe Conservation Area

JIA Zhenyu[1,2], WANG Shixi[1,2], LIU Xue[1,2], SUN Qianying[1,2*], YANG Chunyan[1,2], FENG Chaoyang[1,2]
1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Soil conservation is one of the regulation services provided by ecosystems, which plays an important role in maintaining ecological security. Taking Liaohe Conservation Area as the research object, based on China Soil Loss Equation (CSLE) model and Geodetector analysis, the temporal and spatial variation of soil conservation function and its influencing factors were analyzed. The results showed as follows: from 2010 to 2018, the soil erosion in Liaohe Conservation Area was mainly slight and mild erosion, the amount of soil erosion showed a decreasing trend, and the areas with serious soil erosion were mainly located on both sides and lower sections of the river. The function of soil conservation was increasing, and the areas with higher soil conservation were concentrated in the upper and middle sections of the river. The soil conservation function decreased at first then increased with the increase of rainfall and elevation, increased with the increase of slope and vegetation coverage, and decreased in the gradient of forest land, cultivated land, grassland and shrubwood. Landuse type was the dominant factor in the soil conservation pattern in Liaohe Conservation Area. The amount of soil conservation per unit area was the lowest, when the land use type was cultivated land, the rainfall was 657-735 mm, the slope was 35°-68°, the elevation was -73--26 m, and the vegetation coverage was 0-0.3. In this case, Besides, the

收稿日期: 2020-09-21
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-003)
作者简介: 贾振宇(1989—),男,助理研究员,硕士,主要从事生态文明评估、生态资产核算研究,jiazy@craes.org.cn
* **责任作者:** 孙倩莹(1993—),女,助理研究员,硕士,主要研究方向为生态系统服务评估,sunqy@craes.org.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

combination of landuse type with slope has the strongest explanation for the soil conservation ability.

Key words　soil conservation; CSLE model; geodetector; Liaohe Conservation Area

土壤保持是指生态系统对土壤起到的覆盖保护及对养分、水分调节过程,以防止地球表面的土壤被侵蚀,或因过度使用而发生盐碱化等化学变化,以及其他土壤化学污染的作用[1-2]。土壤保持研究在预防土壤侵蚀造成的危害及维持区域生态安全方面均发挥着重要作用[3-4]。目前土壤保持定量评估模型大致可分为经验统计模型和物理模型 2 类[5]。经验统计模型根据实测结果,确定土壤侵蚀的控制因素,并拟合出函数对应关系式,包括通用土壤流失方程[6](universal soil loss equation,USLE),修正通用土壤流失方程[7](revised universal soil loss equation,RUSLE)和黄土高原模型[8]等;物理模型通过研究土壤侵蚀过程的内部机制,依据质量、动量、能量守恒方程,经过一定简化后,对土壤侵蚀过程及因子的变化进行定量表述,主要包括水蚀预报模型[9](water erosion prediction project,WEPP)和欧洲土壤侵蚀模型[10](European soil erosion model,EUROSEM)等。其中,USLE 是目前应用最广泛、最具实用性的土壤侵蚀模型,是当前评估土壤保持服务最常用的方法[11-13]。Liu 等[14]在 USLE 的基础上,根据中国土壤保持的实际情况,考虑了覆盖与生物措施、工程措施和耕作措施,建立了中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation,CSLE)。CSLE 模型得到了中国科研工作者的认可,被应用于中国许多地区的土壤保持评价中[15-17],如在我国开展的“第一次全国水利普查”中,采用 CSLE 模型评价全国范围的土壤水蚀状况。

辽河保护区自 2010 年划定后,通过实施一系列的生态保护与修复工程,保护区内生态环境大有改善。笔者采用 CSLE 模型对辽河保护区土壤保持量进行评估,揭示其时空变化特征,分析其影响因素,以期明确生态治理与保护工程对辽河保护区水土保持改善的贡献,为定量评估辽河保护区土壤保持重要性提供理论支撑。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

辽河保护区(121°41′E ~ 123°55′E,40°47′N ~ 43°02′N)始于东西辽河交汇处,跨沈阳、鞍山、盘锦、铁岭 4 市,终于盘锦市入海口,流域面积为 1 869.20 km^2。辽河自北流向南,辽河干流地势平坦,地貌单元比较单一,均属于辽河冲积平原。保护区地处中高纬度,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均温度为 4 ~ 9 ℃,年际变化较大,温度自下游平原向上游山区递减;多年平均降水量为 450 ~ 650 mm,年内分配不均,降水量自东南向西北递减。保护区土壤类型以棕壤和草甸土为主。

1.2　数据来源

土地利用数据来源于 SPOT-5 和 GF-1 卫星遥感影像,采用人机交互解译方法提取 2010—2018 年土地利用数据,并抽取不少于总面积 6% 的样本通过手持 GPS 进行定点野外实地验证,整体分类精度大于 85%。植被覆盖度数据来源于 MODIS NDVI 和 Landsat TM/OLI 影像,通过融合生成 30 m NDVI 数据集。其中,MODIS NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的 16 d 合成的 MOD13A1 影像,Landsat TM/OLI 6—9 月影像数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn),选取 2000—2018 年辽河保护区及周边地区 17 个站点的降水数据集,利用 AUSPLIN 插值工具,选取 3 次样条函数,获得统一分辨率(30 m × 30 m)的栅格数据。其他数据主要包括辽河保护区边界、土壤数据和地形数据,其中辽河保护区边界和土壤数据来源于辽河经济开发区管理委员会,地形数据来源于地理空间数据云的 30 m 分辨率的数字高程模型(DEM)数据。

2　研究方法

2.1　土壤保持量计算方法

2.1.1　土壤保持量计算公式

潜在土壤侵蚀量是指生态系统在没有植被覆盖情况下的土壤侵蚀量。运用 CSLE 模型计算辽河保护区潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量,二者之差即为土壤保持量(M)。实际土壤侵蚀量计算公式为:

$$M_a = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T \quad (1)$$

式中:M_a为实际土壤侵蚀量,t/(hm^2·a);R 为降水侵蚀力因子,MJ·mm/(hm^2·h·a);K 为土壤可蚀性因子,t·hm^2·h/(hm^2·MJ·mm);L 为坡长因子,无量纲;S 为坡度因子,无量纲;B 为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

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因子,无量纲。

潜在土壤侵蚀量计算公式为:

$$M_o = R \times K \times L \times S \times B_p \quad (2)$$

式中: M_o为潜在土壤侵蚀量,t/(hm²·a); B_p为无植被覆盖情况下覆盖与生物措施因子,无量纲。

土壤保持量计算公式为:

$$M = M_o - M_a \quad (3)$$

2.1.2 土壤保持量计算中相关参数计算

2.1.2.1 降水侵蚀力因子(R)

R 采用章文波等[18]提出的降水侵蚀力模型计算:

$$\overline{R} = \sum_{v=1}^{24} R_v \quad (4)$$

$$R_v = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=0}^{x}(\alpha P_{i,j,v}^{1.7265}) \quad (5)$$

式中: $\overline{R}$ 为多年平均年降水侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h); R_v 为第 v 个半月的降水侵蚀力,MJ·mm/(hm²·h); $P_{i,j,v}$为第 i($i=1,2,\cdots,N$)年第 v 个半月(将 1 年划分为 24 个半月)第 j($j=0,1,\cdots,x$)个侵蚀性降水日(日降水量不小于 12 mm)的降水量,如果没有侵蚀性降水量,则 $P_{i,j,v}=0$; α 为参数,暖季时 $\alpha=0.3937$,冷季时 $\alpha=0.3101$。

2.1.2.2 土壤可蚀性因子(K)

K 采用 Williams 等[19]在 RUSLE 模型中修正的土壤可蚀性因子的计算公式:

$$K = \left\{0.2 + 0.3\exp\left[-0.0256 S_a\left(1 - \frac{S_b}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{S_b}{C_1 + S_b}\right)^{0.3}\left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)}\right] \quad (6)$$

式中: S_a、S_b、C_1分别为砂粒(粒径 0.05~2.00 mm)、粉砂(粒径 0.002~0.050 mm)、黏粒(粒径 <0.002 mm)的占比,%; S_n 为 $1 - S_a/100$; C 为有机碳占比,%。

2.1.2.3 坡度因子(L)、坡长因子(S)

L、S 分别采用 McCool 等[20-21]的公式计算:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leqslant 1° \\ 0.3 & 1° < \theta \leqslant 3° \\ 0.4 & 3° < \theta \leqslant 5° \\ 0.5 & \theta > 5° \end{cases} \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5° \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5° \leqslant \theta < 10° \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & \theta \geqslant 10° \end{cases} \quad (8)$$

式中: λ 为坡长,m; m 为坡长指数,无量纲; θ 为坡度,(°)。

2.1.2.4 覆盖与生物措施因子(B)

根据《水土保持情况普查报告》[22],对于林地、灌木林、草地,按其不同植被覆盖度对 B 进行赋值:对于耕地,B 取 1;对于其他土地利用类型,B 取 0。

假定以生态系统极端退化条件下的土壤侵蚀为潜在土壤侵蚀,根据《水土保持情况普查报告》[22],对于林地、灌木林、草地的 B_p 按极端退化下植被覆盖度进行赋值:对于耕地,B_p 取 1;对于其他土地利用类型,B_p 取 0。

2.1.2.5 工程措施因子(E)和耕作措施因子(T)

实地调查发现,辽河保护区水土保持工程措施很少,因此耕地和其他土地利用类型的工程措施因子均赋值 1。参考《水土保持情况普查报告》[22]中耕作措施因子赋值表,根据辽河平原的耕作措施类别,耕地取其均值 0.399 3,其余土地利用类型赋值 1。

2.2 土壤保持功能变化影响因素分析方法

土壤保持功能变化影响因素分析采用地理探测器方法,该方法通过分析与辨别不同影响因素分区之间的异质性进而探究其背后的影响力,若某影响因素有重要影响,则与该影响因素的空间分布应具有相似性的假设。在地理探测器中通过层内方差之和小于层间总方差分异性进行判定,分异性的大小由某一自变量的解释力(q)来衡量[23],其模型为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{Y} I_h \sigma_h^2}{I\sigma^2} \quad (9)$$

式中: h 为影响因素的分层,$h=1,2,\cdots,Y$; I 和 I_h 分别为全区和第 h 层的样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为全区和第 h 层的影响因素的方差。q 取值为 [0,1],q 越大说明该因素的作用越明显,由此对主导影响因素进行判别。

结合王欢等[24-25]的土壤保持影响因素研究及经验知识,选取土地利用类型、植被覆盖度、降水量、坡度、高程 5 个因素作为辽河保护区土壤保持功能变化的影响因素,由于地理探测器的输入变量要求为分类别数据,因此要对连续型变量做离散化处理。其中,土地利用类型分为草地、耕地、灌木林、林地 4 类;植被覆盖度按 0~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.7、0.7~0.8、0.8~0.9、0.9~1.0 分为 8 类;降水量、高程数据按等间距分类法分成 8 类;坡度按 0~5°、5°~10°、10°~15°、15°~20°、20°~25°、25°~30°、30°~35°、>35°分为 8 类。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　结果与分析

3.1　辽河保护区土壤保持时空变化特征

辽河保护区 2010 年、2013 年、2015 年和 2018 年单位面积土壤侵蚀量分别为 3 116.59、906.63、917.64 和 911.30 t/km^2。按照土壤侵蚀分类分级标准对辽河保护区土壤侵蚀进行分级统计，结果如表 1 所示。由表 1 可知，从侵蚀强度上看，2010—2018 年辽河保护区土壤微度侵蚀和轻度侵蚀面积占比较高，除 2010 年外其面积占比之和均在 80% 以上。2010—2018 年辽河保护区土壤侵蚀面积呈递减趋势: 2010 年土壤侵蚀面积为 648.41 km^2，占辽河保护区面积的 34.69%；2013 年为 634.79 km^2，占 33.96%；2015 年为 632.50 km^2，占 33.84%；2018 年为 587.14 km^2，占 31.41%。2018 年与 2010 年相比，土壤侵蚀面积减少 61.29 km^2。从土壤侵蚀量上看，2010—2018 年呈降低趋势，依次为 202.08 万、57.55 万、58.04 万和 53.51 万 t，2018 年与 2010 年相比，土壤侵蚀量减少 148.57 万 t。从空间分布上看，辽河保护区土壤侵蚀较低的区域集中在辽河保护区上段，侵蚀严重区域主要在辽河保护区河流两侧及下段。

表 1　辽河保护区土壤侵蚀分级

Table 1　Classification of soil erosion in Liaohe Conservation Area

侵蚀等级/(t/km^2)	2010 年		2013 年		2015 年		2018 年	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
微度侵蚀(<200)	277.79	42.84	440.31	69.36	434.14	68.64	406.79	69.28
轻度侵蚀(200 ~ 2 500)	125.44	19.35	133.91	21.10	134.39	21.25	122.76	20.91
中度侵蚀(2 500 ~ 5 000)	109.63	16.91	26.22	4.13	27.46	4.34	25.46	4.34
强度侵蚀(5 000 ~ 8 000)	58.82	9.07	14.06	2.21	14.91	2.36	13.55	2.31
极强度侵蚀(8 000 ~ 15 000)	47.08	7.26	12.17	1.92	12.93	2.04	11.30	1.92
剧烈侵蚀(>15 000)	29.65	4.57	8.12	1.28	8.67	1.37	7.28	1.24

2010—2018 年辽河保护区单位面积土壤保持量空间分布如图 1 所示。由图 1 可知，2010 年、2013 年、2015 年和 2018 年，辽河保护区单位面积土壤保持量分别为 1 743.34、3 147.18、3 136.99 和 3 248.11 t/km^2，2010—2018 年单位面积土壤保持量整体呈递增趋势。从空间分布上看，辽河保护区土壤保持量较高的区域集中在辽河保护区的上段和中段，土壤保持量较低区域主要在辽河河流两侧及下段。

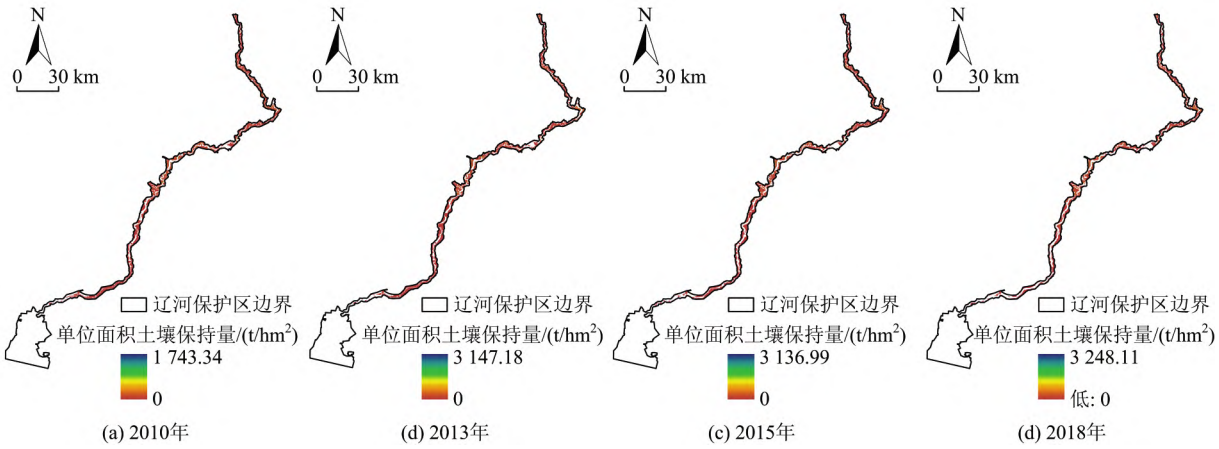


图 1　2010—2018 年辽河保护区单位面积土壤保持量空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of soil conservation capacity per unit area in Liaohe Conservation Area from 2010 to 2018

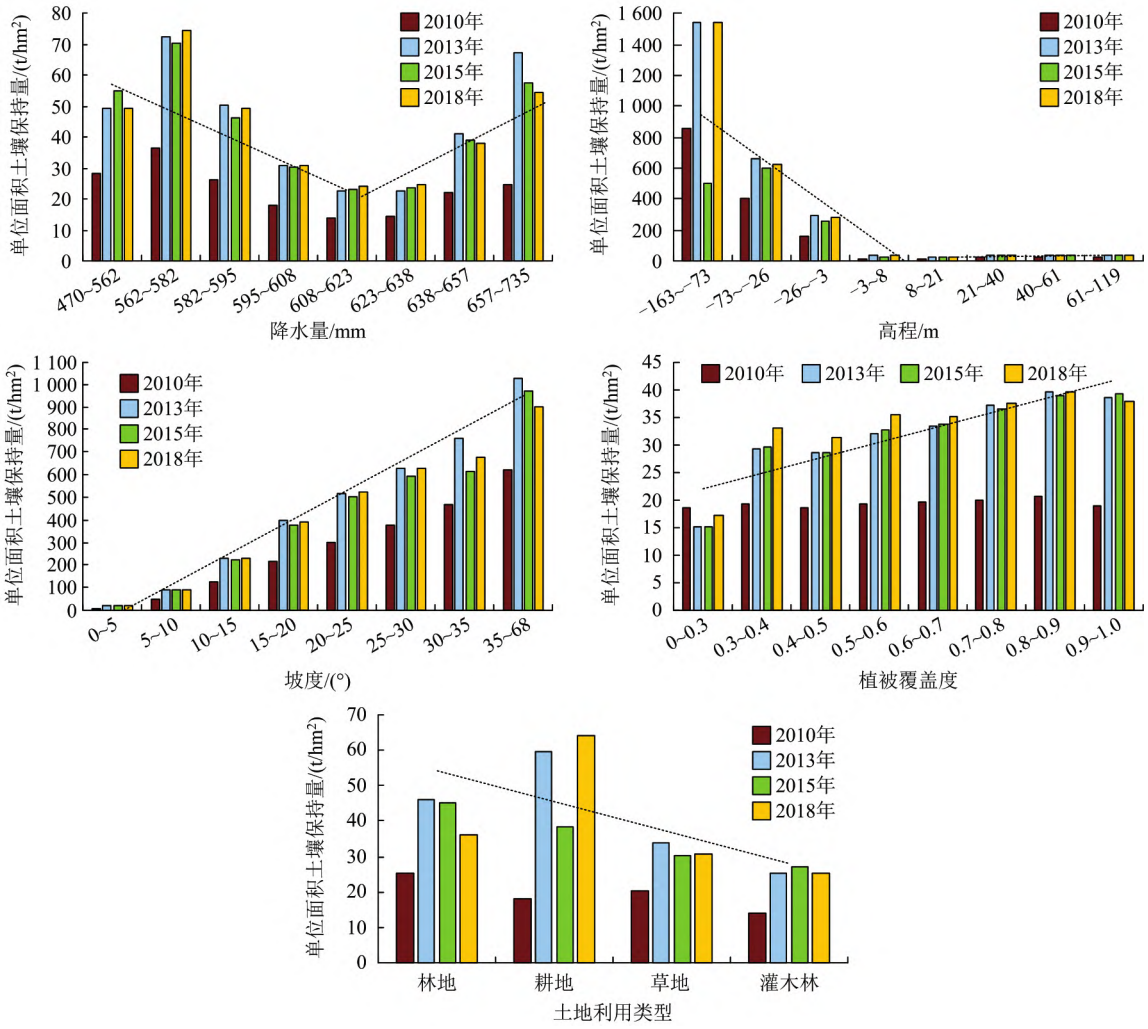
3.2　辽河保护区土壤保持影响因素分析

3.2.1　不同影响因素下的单位面积土壤保持量

2010—2018 年辽河保护区单位面积土壤保持量与降水量、高程、坡度、植被覆盖度和土地利用类型分区间统计结果如图 2 所示。由图 2 可知，土壤保持能力在降水量和高程梯度上，表现出先减少后

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增加的变化特征。当降水量小于 623 mm，高程低于 21 m 时，土壤保持能力随着降水量和高程的增加而减少；当降水量高于 623 mm，高程高于 21 m 时，土壤保持能力则随着降水量和高程的增加而增加。土壤保持能力在坡度和植被覆盖度梯度上，呈现明显的垂直递增特征，即坡度和植被覆盖度与土壤保持能力呈正相关。土壤保持能力在林地—耕地—草地—灌木林梯度上，呈现明显的垂直递减特征。



注：图中虚线为递增或递减趋势。

图 2 2010—2018 年辽河保护区不同影响因素分区对单位面积土壤保持量的影响

Fig. 2 Soil conservation capacity per unit area under different influencing factors in Liaohe Conservation Area from 2010 to 2018

3.2.2 基于地理探测器的单位面积土壤保持量变化归因

地理探测器因子探测运行结果表明，不同影响因素对土壤保持能力变化的解释力具有显著差异（表 2）。辽河保护区各影响因素对单位面积土壤保持量变化的解释力从大到小依次为土地利用类型、植被覆盖度、高程、坡度和降水量，其中土地利用类型是辽河保护区单位面积土壤保持量变化的主导因素，降水量对单位面积土壤保持量的影响最低。分析辽河保护区土地利用类型变化发现，2010 年辽河保护区土地利用类型以耕地为主，影响单位面积土壤保持量变化的主导因素是人为因素，自 2011 年实施退耕封育工程后，大面积的耕地转换为草地和撂荒地，人类活动减少，主导因素变为自然因素，表明退耕封育工程对降低土壤侵蚀起到一定作用。

表 2 不同影响因素 q 值统计

Table 2 Statistis of q value of different influencing factors

土地利用类型	植被覆盖度	降水量	高程	坡度
0.375 1	0.291 8	0.059 2	0.133 9	0.062 4

地理探测器风险探测结果如表 3 所示。由表 3

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可知,土地利用类型中耕地土壤保持的风险最高,这是由于耕地植被单一,加之科学有效的水土管理措施实施并不到位,容易造成土壤侵蚀。降水量为 657 ~ 735 mm 时的土壤保持的风险最高,叠加降水量空间分布图可以得到,该区间的区域主要位于辽河保护区中段和下段,这些区域的土壤侵蚀均较为严重。坡度为 35°~ 68°时的土壤保持的风险最高,对比不同坡度分区对应的土壤侵蚀量可以发现,随着坡度的增加土壤侵蚀量明显增加。高程为 - 73 ~ - 26 m 时的土壤保持的风险最高,对比不同高程分区对应的土壤侵蚀量可以发现,此区间土壤侵蚀量最高。植被覆盖度为 0 ~ 0. 3 时土壤保持的风险最高,叠加植被覆盖度空间分布图发现,土壤保持能力较低的区域主要是低植被覆盖区。

表 3　不同影响因素土壤保持高风险区域

Table 3　High risk areas of soil conservation with different influencing factors

土地利用类型	植被覆盖度	降水量/mm	高程/m	坡度/(°)
耕地	0 ~ 0. 3	657 ~ 735	- 73 ~ - 26	35 ~ 68

地理探测器交互探测可用来检验 2 种影响因素是自身独立起作用还是相互作用,若为相互作用,作用是增强还是减弱。交互探测结果(表 4)表明,坡度和土地利用类型交互作用对土壤保持能力的解释力最强,坡度和植被覆盖度交互作用次之。表明在降水等气象要素相对稳定的背景下,应控制农业活动对地表的干扰强度,增加植被覆盖度,从而提高区域生态系统的土壤保持能力。

表 4　不同影响因素交互作用 q 值统计

Table 4　Statistics of q value of interaction among different influencing factors

驱动因素	降水量	高程	坡度	植被覆盖度	土地利用类型
降水量	0. 059 2				
高程	0. 255 3	0. 133 9			
坡度	0. 658 4	0. 660 2	0. 062 4		
植被覆盖度	0. 098 7	0. 208 7	0. 666 2	0. 291 8	
土地利用类型	0. 102 3	0. 195 4	0. 685 3	0. 050 4	0. 375 1

4　结论

(1) 2010—2018 年辽河保护区土壤侵蚀量呈递减趋势,土壤受到微度和轻度侵蚀强度的面积占比较高; 土壤侵蚀程度空间差异较大,侵蚀程度强的区域零星分布在辽河保护区河流两侧及下段; 2010—2018 年土壤保持量呈持续上升趋势,土壤保持量较高的区域集中在保护区上段和中段,土壤保持量较低区域主要在辽河保护区两侧及下段。

(2) 2010—2018 年辽河保护区土壤保持能力在降水量和高程梯度上,呈现先减少后增加的变化特征; 在坡度和植被覆盖度梯度上,呈现明显的递增特征; 土壤保持能力在林地—耕地—草地—灌木林梯度上,呈现明显的递减特征。

(3) 不同影响因素对土壤保持能力变化的解释力从大到小依次为土地利用类型、植被覆盖度、高程、坡度和降水量,其中土地利用类型是辽河保护区土壤保持格局变化的主导因素; 土地利用类型为耕地,降水量为 657 ~ 735 mm,坡度为 35°~ 68°,高程为 - 73 ~ - 26 m,植被覆盖度为 0 ~ 0. 3 时,土壤保持的风险最高; 坡度和土地利用类型交互作用对土壤保持能力的解释力最强,在降水等气象要素相对稳定的背景下,增加植被覆盖可以提高区域生态系统的土壤保持能力。

(4) 2010 年辽河保护区土地利用类型以耕地为主,影响土壤保持能力变化的主导因素是人为因素,自 2011 年实施退耕封育工程后,大面积的耕地转换为草地和撂荒地,人类活动减少,主导因素变为自然因素,退耕封育工程对降低土壤侵蚀起到一定作用。

参考文献

[1] Millennium ecosystem assessment: ecosystems & human well-being: synthesis report [M]. Washington DC: Island Press, 2005.

[2] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

[3] 饶恩明, 肖燚, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 746-755.
RAO E M, XIAO Y, OUYANG Z Y, et al. Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 746-755.

[4] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 基于 GIS 的石羊河流域可持续发展能力评估[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(6): 170-174.
WEI W, SHI P J, ZHOU J J, et al. Assessment of sustainable development of the Shiyang River Basin based on GIS [J]. Areal Research and Development, 2014, 33(6): 170-174.

[5] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 18-25.
JIANG L, BIAN J H, LI A N, et al. Spatial-temporal changes of soil erosion in the upper reaches of Minjiang River from 2000 to 2010 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 18-25.

[6] FISTIKOGLU O, HARMANCIOGLU N B. Integration of GIS with

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

USLE in assessment of soil erosion [J]. Water Resources Management,2002,16(6):447-467.

[7] RENARD K G,FOSTER G R,WEESIES G A,et al. RUSLE: revised universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1991,46(1):30-33.

[8] 吴礼福. 黄土高原土壤侵蚀模型及其应用 [J]. 水土保持通报,1996,16(5):29-35.
WU L F. Soil erosion model and its application in loess plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1996,16(5):29-35.

[9] LAFFEN J M,LWONARD J L,FOSTER G R. Weep a new generation of erosion prediction technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1991,46(1):34-38.

[10] MORGAN R P C,QUINTON J N,SMITH R E,et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1998,23(6):527-544.

[11] 刘宝元,毕小刚,符素华,等. 北京土壤流失方程 [M]. 北京: 科学出版社,2010:7-13.

[12] 王晗,屈创,赵国栋. 基于中国土壤流失方程模型的区域土壤侵蚀定量评价 [J]. 水土保持通报,2018,38(1):122-125.
WANG L,QU C,ZHAO G D. Quantitative assessment of regional soil erosion based on Chinese soil loss equation model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(1):122-125.

[13] 李翠漫,卢远,刘斌涛,等. 广西西江流域土壤侵蚀估算及特征分析 [J]. 水土保持研究,2018,25(2):34-39.
LI C M,LU Y,LIU B T,et al. Estimation and characteristics analysis of soil erosion in Xijiang River Basin of Guangxi [J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(2):34-39.

[14] LIU B Y,ZHANG K L,XIE Y. An empirical soil lossequation [C] //Proceedings of the 12th ISCO Coference. Vol. Ⅱ: process of soil erosion and its environment effect. Beijing: Tsinghua University Press,2002:21-25.

[15] 马亚亚,王杰,张超,等. 基于 CSLE 模型的陕北纸坊沟流域土壤侵蚀评价 [J]. 水土保持通报,2018,38(6):95-102.
MA Y Y,WANG J,ZHANG C,et al. Evaluation of soil erosion based on CSLE model in Zhifanggou Watershed of northern Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(6):95-102.

[16] 陈美淇,魏欣,张科利,等. 基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析 [J]. 水土保持学报,2017,31(3):16-21.
CHEN M Q,WEI X,ZHANG K L,et al. Analysis of the characteristics of soil and water loss in Guizhou Province based on CSLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(3):16-21.

[17] 何维灿,赵尚民,王睿博,等. 基于 GIS 和 CSLE 的山西省土壤侵蚀风险研究 [J]. 水土保持研究,2016,23(3):58-64.
HE W C,ZHAO S M,WANG R B,et al. Research on soil erosion risk based on GIS and CSLE in Shanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(3):58-64.

[18] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
ZHANG W B,XIE Y,LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica,2002,22(6):705-711.

[19] WILLIAMS J R,JONES C A,DYKE P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1984,27(1):129-144.

[20] McCOOL D K,FOSTER G R,MUTCHLER C K,et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1989,32(5):1571-1576.

[21] LIU B Y,NEARING M A,SHI P J,et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.

[22] 中国水利水电出版社. 水土保持情况普查报告(第一次全国水利普查成果丛书) [M]. 北京: 中国水利水电出版社,2017:73-79.

[23] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
WANG J F,XU C D. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134.

[24] 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 H,GAO J B,HOU W J. 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.

[25] 邹雅婧,闫庆武,谭学玲,等. 渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析 [J]. 干旱区地理,2019,42(6):1387-1394.
ZOU Y J,YAN Q W,TAN X L,et al. Evaluation of soil erosion and driving factors analysis in Weibei mining area [J]. Arid Land Geography,2019,42(6):1387-1394. ◇

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net