

基于RUSLE的黑土区典型县域土壤侵蚀时空变化特征研究

王婷¹, 陆忠军¹, 宁静², 付斌¹, 辛蕊¹, 黄楠¹, 赵博文³

(1.黑龙江省农业科学院 农业遥感与信息研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086;

2.东北农业大学 公共管理与法学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3.黑龙江省农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: [目的] 明确土壤侵蚀时空变化特征, 为土壤侵蚀防治与水土保持效益评估提供参考依据。[方法] 基于RUSLE土壤侵蚀方程, 在RS和GIS技术支持下, 分析2000—2020年典型黑土区黑龙江省宾县土壤侵蚀时空演变特征, 并探究地形因子及土地利用对土壤侵蚀的影响。[结果] ①2000, 2010, 2020年宾县平均土壤侵蚀模数分别为893.02, 499.84, 1 561.02 t/(km²·a), 土壤侵蚀强度整体以微度和轻度为主。②低强度侵蚀全区域均有分布, 高强度侵蚀主要分布在南部山区; ③100~200 m是侵蚀分布的主要高程带; 土壤侵蚀面积与坡度成反比, 0°~5°是主要侵蚀坡度带; 偏北坡方向的土壤侵蚀面积大于偏南坡方向; ④研究区坡耕地土壤侵蚀模数和侵蚀面积较大, 是宾县土壤侵蚀治理的重点区域。[结论] 2000—2020年宾县平均土壤侵蚀模数呈现先增加后减少的趋势, 具有显著的时空分异特征, 地形因子和土地利用变化对该区土壤侵蚀驱动作用明显。可以作为黑土区土壤侵蚀防治和水土保持效益评估的参考依据。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; 黑龙江省宾县; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0227-08

中图分类号: S157, K903

文献参数: 王婷, 陆忠军, 宁静, 等. 基于RUSLE的黑土区典型县域土壤侵蚀时空变化特征研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 227-234. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.027; Wang Ting, Lu Zhongjun, Ning Jing, et al. Temporal and spatial characteristics of soil erosion in typical counties of black soil region based on RUSLE [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 227-234.

Temporal and Spatial Characteristics of Soil Erosion in Typical Counties of Black Soil Region Based on RUSLE

Wang Ting¹, Lu Zhongjun¹, Ning Jing², Fu Bin¹, Xin Rui¹, Huang Nan¹, Zhao Bowen³

(1. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences,

Harbin, Heilongjiang 150086, China; 2. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University,

Harbin, Heilongjiang 150030, China; 3. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics of soil erosion were analyzed in order to provide a reference for soil erosion control and evaluation of soil and water conservation benefits. [Methods] Based on the RUSLE soil erosion equation, the spatial-temporal evolution of soil erosion in the typical black soil region of Binxian County, Heilongjiang Province from 2000 to 2020 was analyzed with the support of RS and GIS. The effects of topographic factors and land use on soil erosion were also investigated. [Results] ① The average modulus of soil erosion in 2000, 2010, and 2020 was 893.02 t/(km²·yr), 499.84 t/(km²·yr), and 1 561.02 t/(km²·yr), respectively. The soil erosion intensity was mainly classified as slight and mild. ② The low intensity erosion was distributed across the entire region, and the high intensity erosion was mainly located in the southern mountainous area. ③ Erosion mainly occurred at elevations of 100 to 200 m. Soil erosion area was inversely proportional to slope. 0°—5° slope was the main erosion gradient zone. Soil erosion area in the direction of the north slope was larger than in the direction of the south slope; ④ The soil erosion modulus and the area of sloping farmland in the study area were larger. This area is the key area for

收稿日期: 2022-11-14

修回日期: 2023-03-10

资助项目: 国家重点研发计划课题“基于大数据耕地资源评价利用技术与工具”(2022YFF0711803); 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关课题(2021ZXJ05A0501)

第一作者: 王婷(1995—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地生态。Email: 2102439644@qq.com。

通信作者: 陆忠军(1975—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士, 研究员, 主要从事农业遥感研究。Email: Lszjy@163.com。

soil erosion control in Binxian County, Heilongjiang Province. [Conclusion] From 2000 to 2020, the average soil erosion modulus initially increased and then decreased, showing a significant spatiotemporal differentiation. Topographic factors and land use change had significant driving effects on soil erosion in the study area. It can be used as a reference for soil erosion control and soil and water conservation benefit evaluation in black soil region.

Keywords: soil erosion; RUSLE; Binxian County, Heilongjiang Province; spatiotemporal change

土壤侵蚀是当今全球人类面临普遍且持续的生态环境问题,是自然因素和社会经济因素共同作用的结果。由于人地矛盾的加剧,土壤侵蚀侵蚀现象日趋严峻,致使泥石流、旱涝灾害等生态问题凸显,一定程度上阻碍了全球可持续发展。因此,土壤侵蚀的研究对生态修复及可持续发展均有重要意义。土壤侵蚀的定量评估及分析土壤侵蚀空间分布特征是水土流失治理和土壤侵蚀监测的关键。目前,定量评估土壤侵蚀的模型包括美国土壤流失方程(USLE)^[1-3]、修正土壤侵蚀方程(RUSLE)^[4-6]、中国土壤流失方程(CSLE)^[7-9]、水蚀预报方程(WEEP)等^[10-11]。由于RUSLE模型结构简单,参数便于获取,计算简便且精度高,在国内外土壤侵蚀估测研究中得到广泛的应用。童珊等^[12]基于RUSLE模型对祁连山南坡2000—2019年土壤侵蚀空间变化及预测,不同地形条件下土壤侵蚀变化特征及影响因子的定量分析进行了研究。殷小菡等^[13]通过RUSLE模型和遥感监测,探究了中国北方农牧交错带的退耕状况和及其引起的土壤保持功能变化特征。陈正发等^[14]通过修正后的土壤侵蚀方程(RUSLE)模型对云南省土壤侵蚀和养分流失特征进行分析。Sultan Mohammed Heyder等^[15]利用RUSLE模型,结合RS和GIS技术,绘制生成土壤侵蚀风险因子图并估算土壤流失量;Hao Gairui等^[16]通过RUSLE模型评估中国北罗河流域PN/PP面源污染的负荷量。以上研究表明,该模型与GIS集成,是量化不同时空尺度、不同区域土壤流失量和分析土壤侵蚀问题的重要手段。

黑土区是中国主要粮食产区和重要的商品粮基地,由于社会系统与生态系统的互动性加强,人类社会发展需求的过度干扰,导致黑土区土壤质量和生态功能严重退化,并影响东北黑土区农业的可持续发展。黑土区水土流失面积约为 2.80×10^5 km²,其土壤侵蚀问题受到学者的广泛关注。Fang Haiyan^[17]利用SEDEM模型估算了受农田防护林影响的东北黑土区集水区土壤侵蚀速率和产沙量。魏建兵等^[18]基于RUSLE模拟土壤侵蚀,分析东北黑土区小流域景观指数与土壤侵蚀模数的呼应关系。邵帅等^[19]利用RUSLE模型揭示黑土区田块尺度土壤侵蚀在微地形的时空变异特征。以往关于东北黑土区的土壤侵蚀研究主要集中在侵蚀过程与机理,并且往往只关

注某一年的侵蚀量,缺少对典型县域尺度土壤侵蚀时空变化特征方面的研究。黑龙江省宾县位于典型黑土区边缘,其土壤条件和自然条件具有很高的土地侵蚀敏感性。因此,本文以宾县作为研究区,基于RUSLE土壤侵蚀方程,对宾县2000,2010,2020年的土壤侵蚀模数进行反演,分析土壤侵蚀分布的空间特征,并探究不同地形因子和土地利用变化对土壤侵蚀影响,为该区域土壤侵蚀防治和水土保持措施的实施提供理论基础,以期更科学有效地实现保持和改善黑土区生态系统功能的可持续性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宾县位于黑龙江省南部地区,地理位置介于东经 $126^{\circ}55'41''$ — $128^{\circ}19'17''$,北纬 $45^{\circ}30'37''$ — $46^{\circ}01'20''$,位于松花江南岸,毗邻延寿县、尚志市、方正县,下辖12个镇,5个乡。研究区总面积为3 843 km²,其中耕地面积为1 776 km²,以旱作农业为主。耕地主要集中在低山丘陵地带,坡耕地面积较大。宾县属于寒温带大陆性季风气候,年均气温 5.5° ,降水主要集中在7—9月,年均降水量938 mm,全年无霜期134 d。海拔范围 $-122 \sim 926$ m,地势南高北低。境内主要有蜚克图河、枷板河等8条主要河流和24条支流。宾县地貌可概括为“五山半水四分半田”,地貌以低山丘陵和漫川漫岗为主(图1)。研究区的土壤类型主要是黑土和黄土,其中黑土主要分布在平原区。宾县属于典型的黑土垄作区,受旋耕起垄的耕作方式和夏季强降雨的双重作用,易形成地表径流,沟蚀现象严重,存在侵蚀沟约420条,是黑龙江省水土流失重点治理县之一。

1.2 数据来源

本研究所运用到的数据及基本情况(表1)所示,土地利用数据以Land TM影像为数据源,通过监督分类与目视解译相结合的方式,获取研究区土地利用分类系统6个主要一级地类;土壤基础数据为中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心(RESDC)(<http://www.RESDC.cn/>)提供的1:100万土壤图;降雨量数据通过中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取的吉林省和黑龙江省宾县附近67个站点的日平均降雨量。

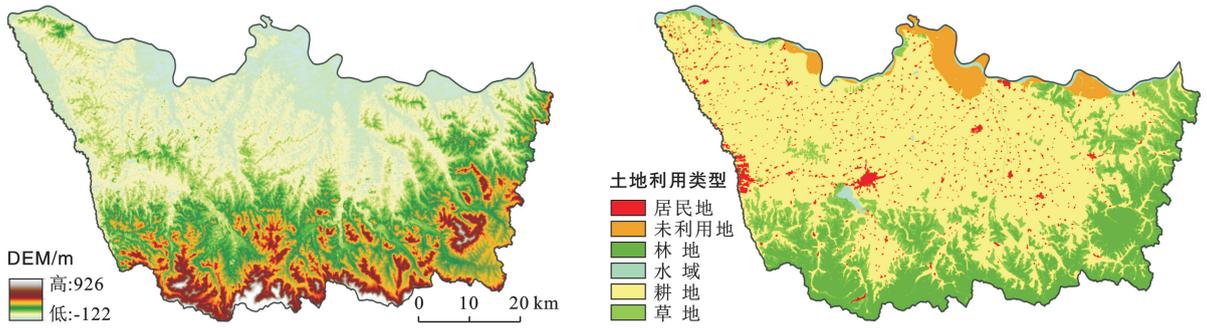


图 1 黑龙江省宾县地形及土地利用现状

Fig.1 Toporaphy and land use status of Binxian County, Heilongjiang Province

表 1 研究数据来源

Table 1 Data sources of study

数据名称	数据时相/年	数据格式	空间分辨率/比例尺	数据来源
土地利用数据	2000/2010/2020	栅格	30 m	RESDC
DEM 数据	2019	栅格	30 m	地理空间数据云
土壤基础数据	1990s	栅格	1 : 100 万	RESDC
气象站点降雨量数据	2000/2010/2020	文本	—	中国气象数据网

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀模型

基于土壤数据、土地利用数据、DEM 和降雨量数据对宾县 2000, 2010, 2020 年土壤侵蚀模数进行计算, RUSLE 土壤流失方程式为^[20]:

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

式中: A 表示计算获得的年平均土壤侵蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 表示降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可侵蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; L, S 分别表示坡长因子和坡度因子; C 代表植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子; L, S, C, P 均为无量纲。

2.1.1 降雨侵蚀力因子 (R) R 是降雨对土壤侵蚀影响的综合反应。本文选用 Wischmeier^[21] 提出的基于年均降雨量和月均降雨量降雨侵蚀力计算

$$K_{epic} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.256 s_a \frac{(1-s_i)}{100} \right] \right\} \times \left(\frac{s_i}{c_i + s_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.72 - 2.95c)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7s_{n1}}{s_{n1} + \exp(-5.51 + 22.9s_{n1})} \right] \quad (3)$$

$$K = -0.01383 + 0.51575K_{epic} \quad (4)$$

式中: S_a 为砂粒含量 (%); S_i 为粉粒含量 (%); C_i 为黏粒含量 (%); C 为有机碳含量 (%); $S_{n1} = 1 - S_a/100$; 由于研究区南部存在大量坡耕地, 土壤可蚀性较高。

2.1.3 地形因子 (LS) 坡度和坡长因子是反映区域

模型计算宾县 R 值, 该方法应用广泛, 计算简便, 公式为:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \times \lg(\frac{P_i}{P}) - 0.8188)} \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀因子; P_i 为月均降水量 (mm); P 为年均降水量 (mm)。通过研究区附近 67 个气象站点 1990—2020 年的降雨量信息, 计算获取以 10 a 为单位的年均降雨量和月均降雨量。利用克里金插值法, 通过栅格计算得到宾县 2000, 2010, 2020 年降雨侵蚀力。

2.1.2 土壤可蚀性因子 (K) 土壤可蚀性是反映降雨力侵蚀力分离、冲击和搬运敏感程度的重要指标^[22]。本文借鉴 Sharpley^[23] 在 EPIC 模型中的方法计算 K_{epic} 值。由于中国土壤与美国的差异性, 张科利等^[24] 利用线性关系对 K_{epic} 进行修正。通过修正后的公式获得研究区 K 值。

地貌的主要地形特征要素, 同时也是影响降雨侵蚀力的主要因素。坡度因子的计算本文采用刘宝元在 CSLE^[25] 模型中提出的坡度因子算法。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.05 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度。

坡长因子利用 Wischmeier^[26] 提出的坡长计算公式, 公式为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad \begin{cases} m=0.2 & (\theta \leq 0.5^\circ) \\ m=0.3 & (0.5^\circ < \theta \leq 1.5^\circ) \\ m=0.4 & (0.5^\circ < \theta \leq 2.5^\circ) \\ m=0.5 & (\theta \geq 2.5^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为坡长; m 为坡长系数, 标准小区坡长为 22.13 m; 通过研究 30 m 分辨率 DEM 数据提取地形因子, 利用计算公式计算 L , S 值。

2.1.4 植被覆盖与管理因子(C) 植被覆盖与管理因子是计算土壤侵蚀模数的重要参数, C 值的大小由地表植被所决定, 不同的植被, 对雨水的拦蓄作用大小不同。本文参照蔡崇法等^[27] 构建的模型计算 C 值, 并借鉴谭炳香等^[28] 计算 NDVI 的公式。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (7)$$

式中: $NDVI$ 为归一化植被指数; R 和 NIR 分别为红外和近红外波段。

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\min} + NDVI_{\max}}$$

$$C = \begin{cases} 0 & (F_c \leq 2\%) \\ 1 & (2\% < F_c \leq 10\%) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg F_c & (10\% \leq F_c \leq 78.3\%) \\ 0 & (F_c > 78.3\%) \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_c 代表植被覆盖度; $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别为植被全覆盖和裸土时 $NDVI$ 取值。 C 值介于 0~1 (无量纲); C 为 0 即认为不发生土壤侵蚀。结合上述公式计算 C 值, 并得到 2000, 2010, 2020 年 C 值分布图。

2.1.5 水土保持措施因子(P) 水土保持措施因子采取水土保持措施土壤流失量和顺坡耕地土壤流失量之比, 比值介于 0~1。根据美国农业部手册 537 号和覃杰香等^[29] 的相关研究, p 值通过对不同土地利用类型进行赋值来确定。研究区不同土地利用类型具体 p 值赋值情况见表 2。

表 2 黑龙江省宾县不同土地利用类型 p 值

Table 2 The p values of different land use types in Binxian County, Heilongjiang Province

土地利用类型	耕地	林地	草地	居民点	水域	未利用地
p 值	0.4	1	1	0	0	0

2.1.6 精度验证 通过对野外侵蚀等级的综合评定, 与 RUSLE 模型计算结果进行对比验证。于

2020 年 10 月进行采样点验证, 共验证 105 个样点, 其中分类一致的 92 个点, 不一致的 13 个点, 验证精度为 87.62%。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀强度分布特征

利用 ArcGIS 对上述 RUSLE 模型中的因子进行计算, 并按照《土壤侵蚀分类标准》(SL190-2007) 将研究区土壤侵蚀强度划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 6 类, 3 个时段土壤侵蚀强度分级如图 2 所示, 宾县土壤侵蚀强度呈现先增加后减少的趋势, 2000, 2010, 2020 年平均土壤侵蚀模数为 893.02, 499.84, 1 561.02 t/(km² · a)。整体来看, 较低侵蚀强度全区域均有分布, 主要呈块状分布; 较高侵蚀强度主要分布在南部山地, 呈不连续条带状。

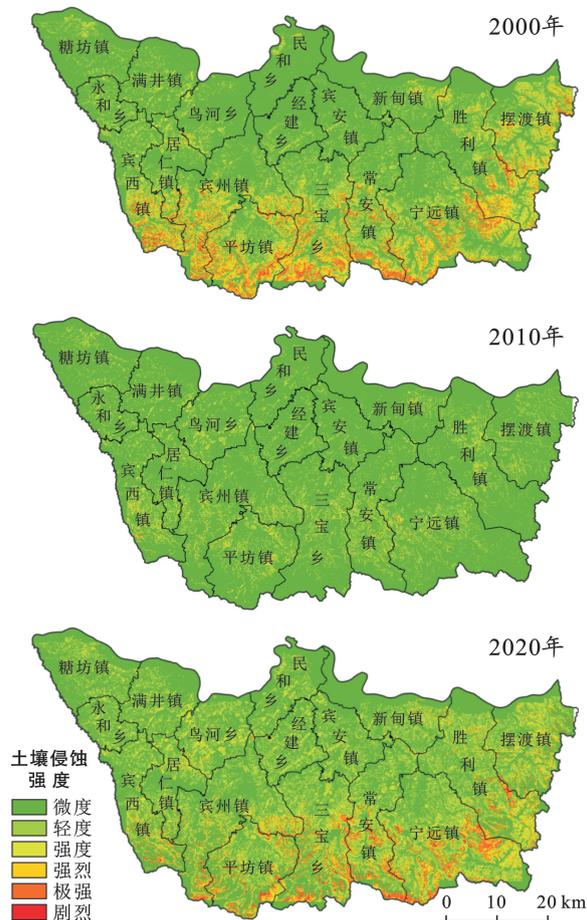


图 2 黑龙江省宾县侵蚀强度分级

Fig.2 Classification of soil erosion intensity of Binxian County, Heilongjiang Province

由表 3 可知, 研究区土壤侵蚀强度整体以中度以下侵蚀强度为主。3 个时段轻度侵蚀及以下等级侵蚀面积分别占侵蚀总面积的 82.33%, 96.78%, 81.37%。中度侵蚀及以上等级的侵蚀面积分别占侵

蚀总面积的 17.67%,3.22%,18.63%,其中强烈侵蚀变化明显。说明研究区内以微度和轻度侵蚀为主,土

壤侵蚀程度整体较轻,局部严重,应对土壤侵蚀敏感性较强的区域进行重点分区治理。

表 3 宾县不同时段土壤侵蚀强度分级及面积统计

Table 3 Soil erosion intensity classification and area statistics for different periods in Binxian County

侵蚀等级	侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	2000 年		2010 年		2020 年	
		面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
微度	<1 000	2 320.30	60.44	3 296.47	85.89	2 550.36	66.43
轻度	1 000~2 500	840.55	21.89	417.99	10.89	573.44	14.94
中度	2 500~5 000	354.29	9.23	93.03	2.42	315.73	8.22
强烈	5 000~8 000	153.13	3.99	25.56	0.67	205.03	5.34
极强烈	8 000~15 000	160.40	4.18	5.13	0.13	185.72	4.48
剧烈	>15 000	10.58	0.28	0.00	0.00	9.00	0.23

3.2 土壤侵蚀强度时空变化特征

基于各土壤侵蚀强度等级面积,计算获得 2000—2010 年时段和 2010—2020 年时段土壤侵蚀强度面积转移矩阵(见表 4)。

2000—2010 年宾县微度、轻度、中度、强烈、极强烈的土壤侵蚀面积稳定率分别为 97.54%,22.84%,8.66%,2.20%,1.37%。2.46%的微度侵蚀向高强度侵蚀转移,76.49%的轻度侵蚀向低强度侵蚀转移,90.60%的中度侵蚀向低强度转移,97.54%的强烈侵

蚀向低强度转移,98.63%的极强烈侵蚀向低强度转移。2010—2020 年研究区微度、轻度、中度、强烈、极强烈的土壤侵蚀面积稳定率分别为 72.85%,54.85%,42.18%,19.92%和 41.33%。27.15%的微度侵蚀向高强度侵蚀转移,17.80%的轻度侵蚀向高强度侵蚀转移,20.51%的中度侵蚀向高强度转移,32.21%的强烈侵蚀向高强度转移,8.5%的极强烈侵蚀向高强度侵蚀转移。从研究区整体来看,土壤侵蚀强度呈现先减少后增加的趋势。

表 4 2000—2020 年宾县土壤侵蚀强度转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of soil erosion intensity from 2000 to 2020 in Binxian County

土壤侵蚀类型	2000 年土壤侵蚀面积/ km^2						
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
2010 年	微度	2260.33	642.90	146.36	104.03	133.25	8.62
	轻度	37.37	191.96	174.59	10.88	3.10	0.06
	中度	14.33	5.26	30.69	34.43	7.90	0.41
	强烈	5.13	0.39	2.37	3.37	13.94	0.34
	极强烈	0.24	0.02	0.24	0.40	2.19	1.15
	剧烈	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
土壤侵蚀类型	2010 年土壤侵蚀面积/ km^2						
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
2020 年	微度	2400.78	114.33	24.43	7.40	1.43	0.00
	轻度	333.18	229.25	10.24	0.69	0.03	0.00
	中度	202.27	69.68	39.23	4.05	0.44	0.00
	强烈	178.96	3.99	16.28	5.09	0.67	0.00
	极强烈	171.83	0.71	2.80	8.23	2.12	0.00
	剧烈	8.42	0.00	0.03	0.09	0.44	0.00

为了更加直观揭示宾县土壤侵蚀强度空间演变特征,运用 ArcGIS 栅格计算获取 3 个时段土壤侵蚀强度空间变化(图 3)。3 个时段土壤侵蚀强度不变的面积分别占总面积的 65.15%,69.77%,67.24%,主要集中在北部平原区,土壤抗侵蚀能力强,故侵蚀强度相对稳定。2000—2010 年,土壤侵蚀强度减轻面

积为 1 281.95 km^2 ,占总面积的 33.10%;土壤侵蚀强度加剧面积为 66.64 km^2 ,仅占总面积的 1.74%。由于 2000—2010 年在宾县实施一系列“水土保持”治理措施,退耕还林和修筑梯田等,土壤侵蚀强度有所减轻;2010—2020 年,土壤侵蚀强度减轻面积为 163.72 km^2 ,占总面积的 4.27%;土壤侵蚀强度加剧

面积为 996.92 km², 占总面积的 25.96%。此时间段内降雨侵蚀力增加 57 MJ · mm/(hm² · h · a), 导致土壤侵蚀力增加; 就 2000—2020 年整体分析, 土壤侵蚀强度加剧的面积占总面积的 21.38%; 土壤侵蚀强度减轻的面积占总面积 11.38%, 主要集中在宾县西南部。研究表明, 2000—2010 年研究区由于降雨和人类活动强度的加剧, 土壤侵蚀强度整体有所增加。

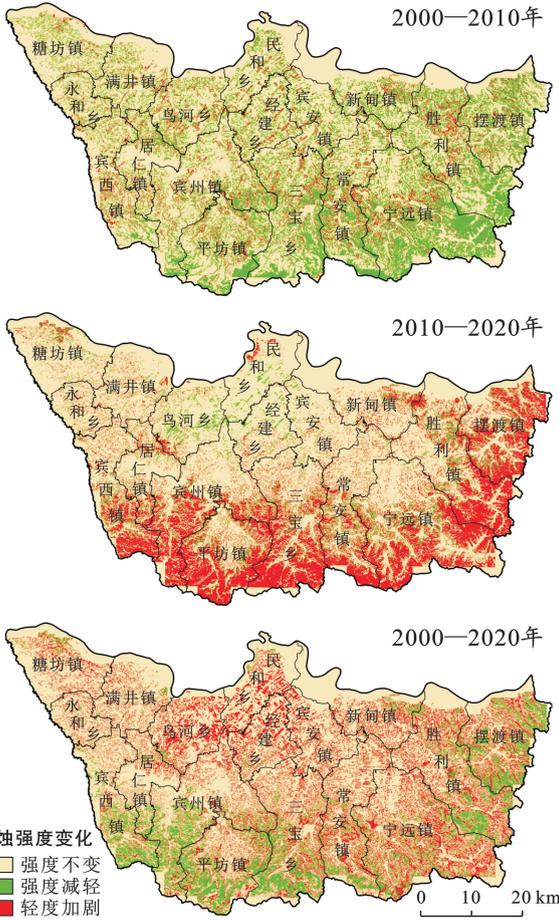


图 3 2000—2020 年宾县土壤侵蚀强度等级变化
Fig.3 Changes of soil erosion intensity levels in Binxian County from 2000 to 2020

3.3 地形对土壤侵蚀的影响

3.3.1 不同海拔下土壤侵蚀特征 以 DEM 为基础数据, 将研究区海拔分为 6 个高程带, 将土壤侵蚀度和高程栅格图层叠加, 得到宾县土壤侵蚀在不同高程带的分异特征(图 4)。在海拔 <100 m 平原区土壤侵蚀面积与土壤侵蚀模数较小; 海拔 >100 m, 土壤侵蚀面积随着海拔的升高而减少, 在 100~200 m 时侵蚀面积达到极大值, 为 2 114.78 km²。平均土壤侵蚀模数随着海拔的升高呈现“增—减—增”的变化趋势。海拔 >800 m 时, 平均土壤侵蚀模数最大, 高达 7 192.54 t/(km² · a)。主要原因为此区域内植被覆盖

少, 林地退化, 易发生侵蚀。土壤侵蚀防治工作应着重在中部丘陵区展开, 对于低山丘陵区应进行“封山育林”等防护工作。

3.3.2 不同坡度下土壤侵蚀特征 根据水利部关于土壤侵蚀坡度等级划分的标准, 将研究区坡度划分为 5 个等级。利用 ArcGIS 土壤侵蚀强度与坡度进行叠加分析, 得出不同坡度下土壤侵蚀的分异特征(图 5)。随着坡度的增加土壤侵蚀面积逐渐减少, 0°~5°是主要侵蚀坡度带, 侵蚀面积占总面积的 42.16%; >15°的土壤侵蚀面积仅占总面积的 7.65%。中度以上侵蚀面积随着坡度的增加而增大, 微度和轻度侵蚀面积随着坡度的增加侵蚀面积逐渐减少。因此, 坡度 >15°, 土壤侵蚀敏感性强, 但坡耕地主要分布在 0°~5°, 自然侵蚀导致吞噬耕地地表现象严重, 应开展坡改梯工程, 有利于抑制侵蚀现象的发生。

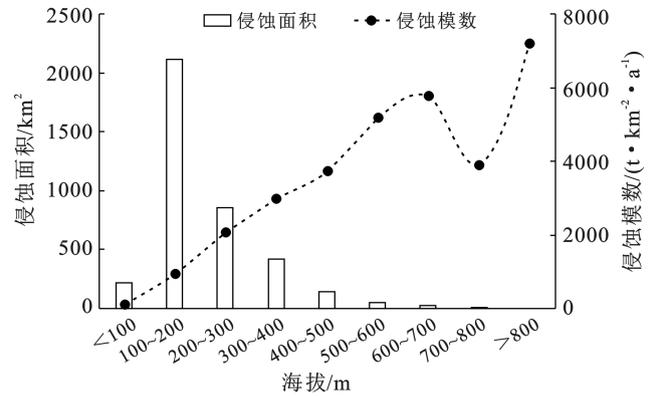


图 4 宾县不同海拔土壤侵蚀变化
Fig.4 Change of soil erosion at different altitudes in Binxian County

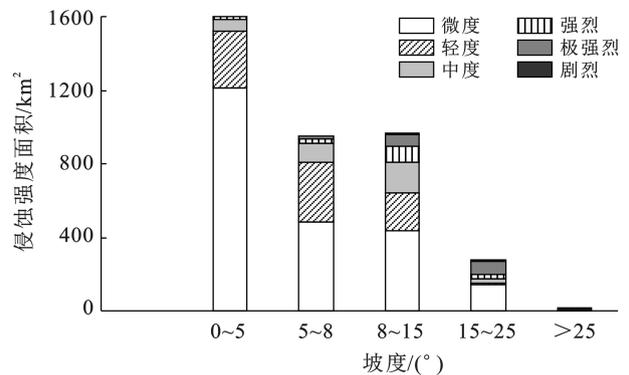


图 5 宾县不同坡度土壤侵蚀变化
Fig.5 Change of soil erosion on different slopes in Binxian County

3.3.3 不同坡下土壤侵蚀特征 受光照和风速等因素的影响, 不同坡向的土壤侵蚀程度存在明显差异。通过叠加分析计算宾县 8 个坡向(北、东北、东、东南、南、西南、西、西北)的土壤侵蚀面积, 探究不同坡向下

土壤侵蚀特征。西北坡方向的土壤侵蚀面积最大,最大值为 725.29 km²;南坡方向上土壤侵蚀面积最小,最小值为 312.88 km²。整体来看,土壤侵蚀面积偏北坡大于偏南坡,主要由于受光照条件和季风性气候影响,阳坡土壤水分含量低,植被覆盖率低,土壤侵蚀敏感性高^[30]。同时,夏季降雨量大,北坡受地表冲刷严重,因此北坡的土壤侵蚀强度大于南坡。

3.4 不同土地利用下土壤侵蚀特征

基于遥感影像解译获得研究区各土地利用分类及其面积(图 6)。耕地占总面积的比例最大,为 62%。坡耕地占耕地面积的 75%;其次林地占总面积的 21%,主要分布在研究区南部;草地占面积的 10%;水域和建设用地所占面积比例较小,分别为 3%和 4%。

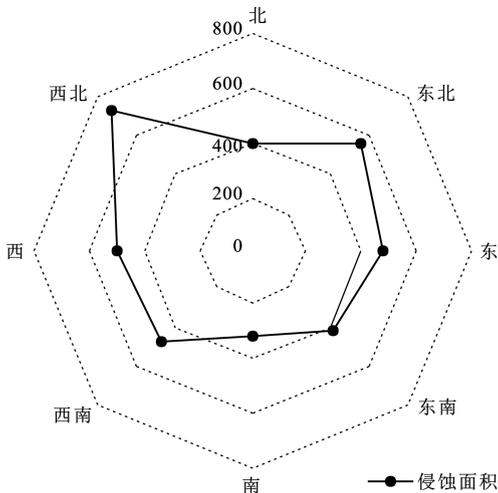


图 6 宾县不同坡向土壤侵蚀面积变化

Fig.6 Change of soil erosion in different slope directions in Binxian County

通过对宾县土地利用与土壤侵蚀模数图层进行叠加分析,获得不同土地利用类型土壤侵蚀特征(图 7)。不同土地利用类型土壤侵蚀强度差异较大,坡耕地土壤侵蚀模数达到 3 027.15 t/(km² · a),侵蚀面积占总面积的 48.47%;因此,坡耕地为宾县土壤侵蚀治理的重点区域,在治理过程中,应确保耕地的“质”和“量”,合理开垦科学退耕。林地和草地的侵蚀模数分别为 2 007.25, 1 207.41 t/(km² · a),侵蚀面积占总面积的 12%和 6%。研究区林地和草地分布较为广泛,应加强对研究区草地和林地的保护,防止林地和草地生态系统退化,对于陡坡的耕地适时开展退耕还林还草^[31]。

4 结论

本文以典型黑土区宾县为例,基于土壤侵蚀模数

和土壤侵蚀面积定量评价区域土壤侵蚀状况,对土壤侵蚀防治和制定水土保持规划有更好的指向性。

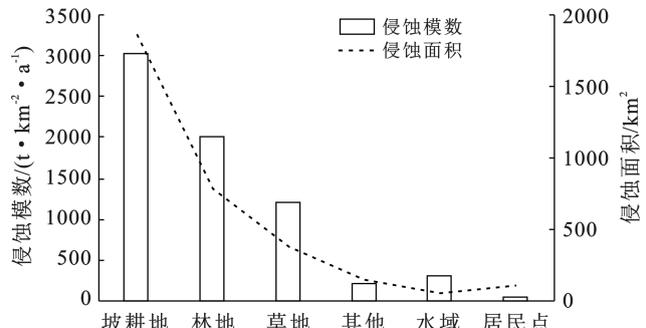


图 7 宾县不同土地利用类型土壤侵蚀变化

Fig.7 Change of soil erosion in different land use types in Binxian County

(1) 宾县土壤侵蚀强度呈现先减少后增加的趋势,3 个时期平均土壤侵蚀模数为 893.02, 499.84, 1 561.02 t/(km² · a)。土壤侵蚀强度整体较轻,以为微度和轻度侵蚀为主,局部严重。土壤侵蚀强度空间分布呈现由北向南发展的趋势,侵蚀强度较高的区域主要集中在南部山区。

(2) 3 个时段土壤侵蚀强度面积变化特征显著。2000—2010 年,土壤侵蚀强度等级变化以减轻为主,轻度以上侵蚀强度主要向低强度转移,其中 98.63%的极强烈侵蚀向低强度转移;2010—2020 年,土壤侵蚀强度等级变化主要表现为强度加剧,32.21%的强烈侵蚀向高强度转移。

(3) 平均土壤侵蚀模数随着海拔的升高呈现“增—减—增”的变化趋势,海拔在 100~200 m 侵蚀面积最大;土壤侵蚀面积与坡度成反比,0°~5°是主要侵蚀坡度带,侵蚀面积占总面积的 42.16%;西北坡方向的土壤侵蚀面积最大,南坡方向上土壤侵蚀面积最小,总体表现偏北坡方向的土壤侵蚀面积大于偏南坡方向。

(4) 研究区的土壤侵蚀在不同土地利用类型上存在明显分异特征。坡耕地土壤侵蚀模数可以达到 3 027.15 t/(km² · a),其侵蚀面积占总面积的 48.47%;林地和草地的侵蚀模数分别为 2 007.25, 1 207.41 t/(km² · a),侵蚀面积占总面积的 12%和 6%。坡耕地为宾县土壤侵蚀治理的重点区域。

[参 考 文 献]

[1] 张养安,张鑫,江仕嵘.基于 GIS 与 RS 的杨凌区土壤侵蚀时空变异性研究[J].水土保持学报,2018,32(6): 130-133.
[2] 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.
- [3] 马力,卜兆宏,梁文广,等.基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J].土壤学报,2019,56(3):602-614.
- [4] 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.
- [5] 张园眼,李天宏.基于 GIS 和 RUSLE 模型的深圳市土壤侵蚀研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):1189-1202.
- [6] 康琳琦,周天财,干友民,等.1984—2013 年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J].应用与环境生物学报,2018,24(2):245-253.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 程琳,杨勤科,谢红霞,等.基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J].水土保持学报,2009,23(5):61-66.
- [10] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究[J].水土保持研究,2004,11(4):13-24.
- [11] 刘宝元,史培军.WEPP 水蚀预报流域模型[J].水土保持通报,1998,18(5):6-12.
- [12] 童珊,曹广超,闫欣,等.祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):100-107.
- [13] 殷小茜,孙希华,徐新良,等.我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1721-1732.
- [14] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于 RUSLE 模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.
- [15] Heyder S M, Dansa A O, Asfaw S, et al. Soil erosion risk assessment and prioritization of midhagdu micro watersheds for conservation measure using RUSLE, GIS, RS and SPSS in Eastern, Ethiopia [J]. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 2022,10(3):1-11.
- [16] Hao Gairui, Li Jiake, Li Shu, et al. Quantitative assessment of non-point source pollution load of PN/PP based on RUSLE model: a case study in Beiluo River basin in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(27):33975-33989.
- [17] Fang Haiyan. Quantifying farmland shelterbelt impacts on catchment soil erosion and sediment yield for the black soil region, Northeastern China [J]. Soil Use and Management, 2021,37(1):181-195.
- [18] 魏建兵,肖笃宁,李秀珍,等.东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J].生态学报,2006,26(8):2608-2615.
- [19] 邵帅,刘焕军,潘越,等.黑土区田块尺度微地形因子对土壤侵蚀与碱解氮的影响[J].土壤通报,2019,50(4):854-860.
- [20] Ghosal K, Bhattacharya S D. A review of RUSLE Model [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020,48(3):689-707.
- [21] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1958,39(2):285.
- [22] Zachar D. Soil Erosion [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [23] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: a new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1983,38(5):381-383.
- [24] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [25] Liu Baoyuan, 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.
- [26] Wischmeier W H, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [27] 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,2000,14(2):19-24.
- [28] 谭炳香,李增元,王彦辉,等.基于遥感数据的流域土壤侵蚀强度快速估测方法[J].遥感技术与应用,2005,20(2):215-220.
- [29] 覃杰香,王兆礼.基于 GIS 和 RUSLE 的从化市土壤侵蚀量预测研究[J].人民珠江,2011,32(2):37-41.
- [30] 陈红,江旭聪,任磊,等.基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J].土壤通报,2021,52(1):165-176.
- [31] 李嘉麟,陈家慧,华丽,等.基于 CSLE 的湖北省土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持学报,2022,36(4):43-52.