

阴山北麓地区土壤侵蚀的时空变化及驱动力

吴 帅, 阿如旱, 潘海伟

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古, 呼和浩特 010010)

摘 要: [目的] 分析 2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀时空变化及其影响因素, 为该区土壤侵蚀治理与国土空间规划提供科学指导。[方法] 基于降水、土地利用、土壤和遥感影像等数据, 采用 GIS 技术和 RUSLE 模型开展研究。[结果] ① 2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀强度主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 高等级侵蚀面积不断增加, 阴山北麓地区土壤侵蚀状况十分严峻; ② 阴山北麓地区土壤侵蚀严重区主要分布在阴山山脉沿线和内蒙古多伦县大部分地区; ③ 土地利用类型是阴山北麓地区土壤侵蚀主要影响因素, 各因子解释力大小依次为: 土地利用类型 > 植被覆盖度 > 降雨 > 坡度。土地利用类型为耕地, 植被覆盖度小于 0.3, 坡度在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 和降雨量在 365~413 mm 之间的地区为高风险侵蚀区域。[结论] 阴山北麓地区土壤侵蚀程度整体偏高。植被覆盖度低的耕地和草地应为阴山北麓地区土壤侵蚀治理重点区域, 应采取植树造林种草, 扩大林草覆盖面, 改善植被覆盖率, 降低地表径流速率, 提高下渗能力, 来控制土壤侵蚀发生。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 地理探测器; 阴山北麓地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0380-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 吴帅, 阿如旱, 潘海伟. 阴山北麓地区土壤侵蚀的时空变化及驱动力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 380-390. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.043; Wu Shuai, Aruhan, Pan Haiwei. Spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in north piedmont of Yinshan Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 380-390.

Spatial and Temporal Changes and Driving Factors of Soil Erosion in North Piedmont of Yinshan Mountain

Wu Shuai, Aruhan, Pan Haiwei

(College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal changes of soil erosion and its influencing factors in the north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020 were analyzed in order to provide scientific guidance for soil erosion control and land space planning in this area. [Methods] Based on precipitation, land use, soil and remote sensing image data, the research was carried out by using GIS technology and the RUSLE model. [Results] ① From 2000 to 2020, soil erosion intensity in the north piedmont of Yinshan Mountain was mainly micro-grade erosion and moderate-grade erosion. The area of high-grade erosion continued to increase over time. The soil erosion status in the north piedmont of Yinshan Mountain was very severe. ② The areas of severe soil erosion in the north piedmont of Yinshan Mountain were mainly located along the Yinshan Mountain range and most areas of Duolun County, Inner Mongolia Autonomous Region. ③ Land use type was the main influencing factor of soil erosion in the north piedmont of Yinshan Mountain. The explanatory power of each factor followed the order of: land use type > vegetation coverage > rainfall > slope. The area consisting of cultivated land with vegetation coverage less than 0.3, slope of $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$, and rainfall of 365~

收稿日期: 2023-01-08

修回日期: 2023-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“生态敏感煤炭富集区的区域发展空间均衡研究”(41061011); 内蒙古大学试验教学项目(YZ2017016); 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室基金项目

第一作者: 吴帅(1996—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: 1067980638@qq.com。

通信作者: 阿如旱(1973—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: aruhan@imau.edu.cn。

413 mm was the high risk erosion area. [Conclusion] The degree of soil erosion in the north piedmont of Yinshan Mountain was generally high. Cultivated land and grassland with low vegetation coverage should be the key areas for soil erosion control in the north piedmont of Yinshan Mountain. Soil erosion should be controlled by planting trees and grasses to expand the coverage of forests and grasslands, improve vegetation coverage, reduce surface runoff rate, and improve infiltration capacity.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; geographic detector; north piedmont of Yinshan Mountain

土壤侵蚀主要受水力、风能等外力作用以及自然原因和人类活动的影响下,对地表物体产生转移现象,致使土地资源遭到破坏,土壤肥力降低,影响植物生长与发育,引起生态退化^[1-2]。丘陵区因地势起伏,地质结构复杂,受强降雨、基础工程建设和城镇化等各种因素影响,而导致大量水土流失,植被破坏,导致山地丘陵区生态系统脆弱,土壤侵蚀程度加剧^[3]。探究区域土壤侵蚀特征,有助于制定合理的水土流失治理措施,对于重筑地区生态屏障,保护生态和恢复自然环境具有重要意义。

土壤侵蚀定量分析中修正土壤流失方程(RUSLE)是目前国际使用普遍,开发相对完善土壤侵蚀模型。国外学者在修正土壤流失方程使用上已较为完善,通过对各个国家土壤侵蚀情况进行研究,为当地生态环境治理提供依据^[4-5]。中国科学家已将RUSLE模型应用于各区域水土流失问题的分析和研究中。杜梅等^[6]利用RUSLE模型,确定了湟水河流域18 a间土壤侵蚀空间演化特点,从而得到湟水河流域土壤侵蚀总体上趋于严重,并具有空间多样性的规律;高泗强等^[7]定量分析重庆市市域和县域尺度土壤侵蚀特征,说明林地,旱地和水田是土壤侵蚀的主要来源。在一些学者广泛致力于研究土壤侵蚀进程时,一部分学者开始研究影响土壤侵蚀不同区域呈现不同特征的驱动因素。王猛等^[8]基于RUSLE和地理探测器模型,对西南地区30 a间进行土壤侵蚀格局研究和定量归因,得出坡度在 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 且植被盖度在30%~45%的区域为高风险区域的结论;牛丽楠等^[9]发现植被覆盖度和多年平均降雨量是造成贵州省六盘水市1990—2015年土壤侵蚀的主要原因。在阴山北麓地区的研究中,王彦阁等^[10]进行了关于2000—2015年该地区土壤保持量以及侵蚀量的研究,发现土壤侵蚀以微度和中度为主;朱丽等^[11]开展了对该地区土壤侵蚀驱动力因素的研究,得出人口、经济、不合理的土地利用是土壤侵蚀的关键因素。土壤侵蚀模型应用存在明显区域性,各个研究地区结果差别很大。

阴山北麓地区具有独特自然环境与水资源状况,

历史上曾为天然草场丰润之地,但随着人类生产生活的增加,并在风能、水力2个自然因素影响下,生态环境受到严重损害,水土流失趋势极为严重,甚至有加剧倾向。目前,对阴山北麓区域土壤的侵蚀研究主要集中于风力侵蚀研究^[12-14],而水力侵蚀研究相对较少。从21世纪初开始,随着一批重大环境整治项目的实施,阴山北麓区域土地利用模式也出现了明显改变。为此,本文基于RUSLE模型模拟阴山北麓地区土壤侵蚀时空变化及驱动机制,分析土壤侵蚀动态变化情况,通过地理探测器探究土壤侵蚀影响因子,旨在为该区域生态环境综合整治提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阴山北麓地区($107^{\circ}17'E-116^{\circ}53'E$, $40^{\circ}43'N-43^{\circ}23'N$)地处阴山山脉和蒙古高原交接带,位于内蒙古自治区中部,以农业与牧业活动为主。行政区划上包括了12个旗县区。区域内大部分地形种类是低山丘陵和层状高原,海拔为921~2 316 m。土壤种类主要为栗钙土,西部地区有部分棕钙土分布,植被覆盖程度低。该区域属于中温带的干旱、半干旱大陆性季风气候区域,年降水量为200~400 mm且主要集中在夏季,年平均温度为 $1.3\sim 3.9^{\circ}C$,年均蒸发量大。该气候条件使阴山北麓地区植被类型以典型草原和荒漠草原为主。

1.2 数据来源

气象数据为国家青藏高原科学数据中心月降雨量栅格数据产品,数据中主要收录了阴山北麓地区月降雨量统计资料;土壤数据采用中科院南京环境研究院所级资源中心数据,包括土壤质地砂砾、黏粒、粉粒,有机碳等信息;地形信息为30 m数字高程的GDEM V3数据产品;遥感数据主要使用Landsat 4/5 TM数据和Landsat 8 OLI_TIRS数据,均为5—8月影像;植被覆盖指数NDVI数据由地面遥感图像信息解译;土地利用资料为2000,2005,2010,2015和2020年5期30 m分辨率的土地利用/覆地资料,共涉及6个1级类与25个2级类(表1)。

表 1 RUSLE 模型数据来源
Table 1 RUSLE model date sources

| 数据名称 | 数据来源 | 时 段 | 分辨率 | 数据说明 |
|-------------------|---|-------------|------|--------------------------------------|
| 土地利用/覆被数据 | 中国科学院资源环境科学与数据中心 | 2000—2020 年 | 30 m | 2000,2005,2010,2015,2020 年 5 期土地利用数据 |
| 气象数据 | 国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn) | 2000—2020 年 | 1 km | 2000,2005,2010,2015,2020 年 各月降水量栅格数据 |
| GDEM V3 数据 | 地理空间数据云 (http://www.gsc1oud.cn) | 2000—2020 年 | 30 m | DEM 高程数据 |
| Landsat 4/5 TM | 地理空间数据云 (http://www.gsc1oud.cn) | 2000—2010 年 | 30 m | 影像数据 |
| Landsat 8OLI_TIRS | 地理空间数据云 (http://www.gsc1oud.cn) | 2010—2020 年 | 30 m | 影像数据 |
| 土壤数据库 | 中国科学院南京土壤研究所所级数据中心(https://soildata.issas.ac.cn/) | 2000—2020 年 | 1 km | 土壤质地砂砾、黏粒、粉粒,有机碳含量等数据 |

1.3 研究方法

1.3.1 RUSLE 模型 此次研究利用 RUSLE 模型估算土壤的侵蚀模数^[15],具体计算公式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中:A 为每年单位面积水土流失数量,为土地侵蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$; LS 分别为坡度、坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。该因子主要反映了降

水程度对土壤侵蚀的潜在影响能力,与降雨量、降雨力度、经历时间、雨滴规模和雨滴的下落最终速率相关^[16]。采用魏健美^[17]的计算方法,使用月、年降雨量数据,其计算公式为:

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735\times10\left[1.5lg\frac{P_i^2}{P}-0.8188\right] \tag{2}$$

式中:R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; i 为月序; P_i 为月降雨量(mm); P 为年降雨量(mm)。

研究区降雨侵蚀力因子结果如图 1 所示。

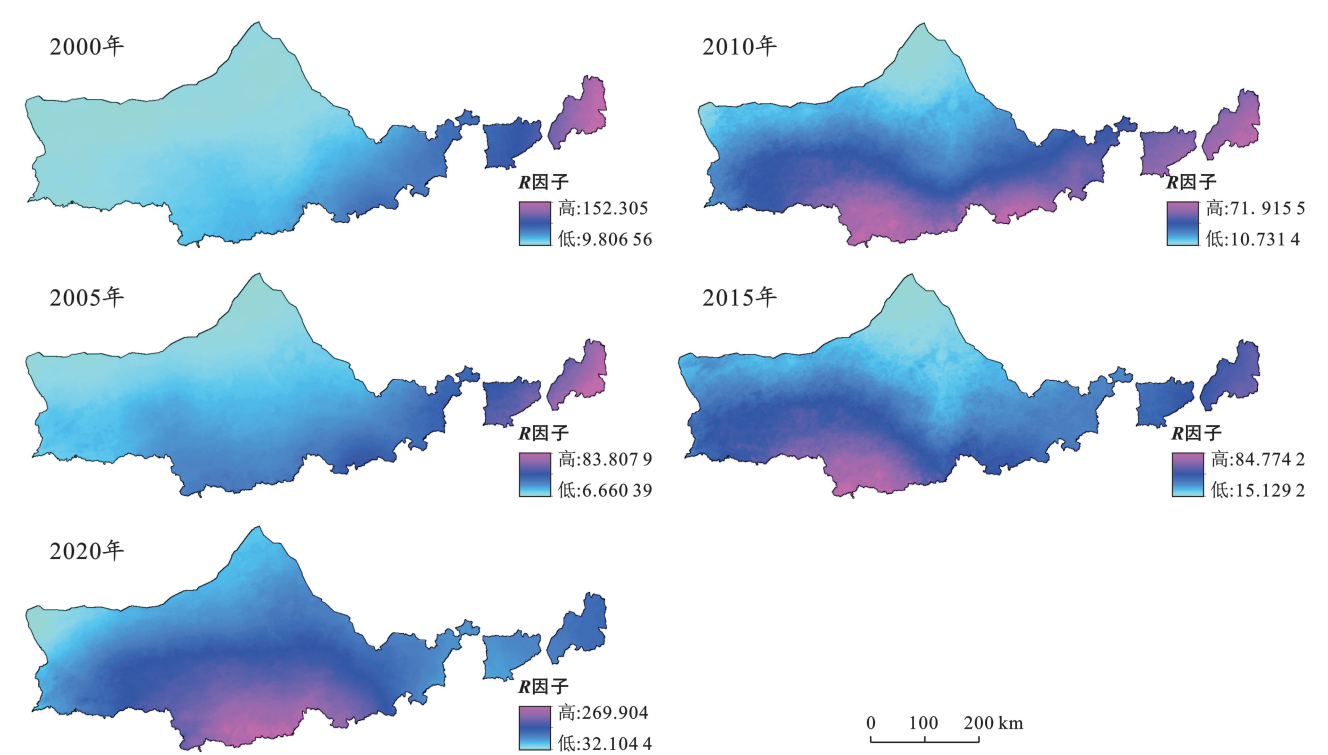


图 1 阴山北麓地区降雨侵蚀力因子分布

Fig.1 Rainfall erosivity factor distribution in north piedmont of Yinshan Mountain

(2) 土壤可蚀性因子(K)。该因子主要是反映不同质地土壤所能承受的侵蚀程度; K 值越大,土地敏感度就越高,更易于遭受破坏; K 因子的高低决定于土壤质地层(黏粒、粉粒、砂粒和有机质浓度),阴山北麓区域土壤可蚀性因子 K 取值经验方程式为^[18]:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 \ 6 S_{AN} \left(1 - \frac{S_{IL}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{S_{IL}}{C_{AL} + S_{IL}} \right)^{0.3} \left[1.0 - \frac{0.25 C}{C + \exp(3.72 - 2.95 C)} \right] \quad (3)$$
$$\left[1.0 - \frac{0.7 S_{NI}}{S_{NI} + \exp(-5.51 + 22.9 S_{NI})} \right]$$

式中: K 为土壤可蚀性因子值 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; S_{AN} 为砂砾(0.05~2 mm)含量(%); S_{IL} 为粉粒(0.002~0.05 mm)含量(%); C_{AL} 为黏粒(<0.002 mm)含量(%); C 为有机质含量(%); $S_{NI} = 1 - S_{AN}/100$ 。

研究区土壤可蚀性因子计算结果如图 2 所示。

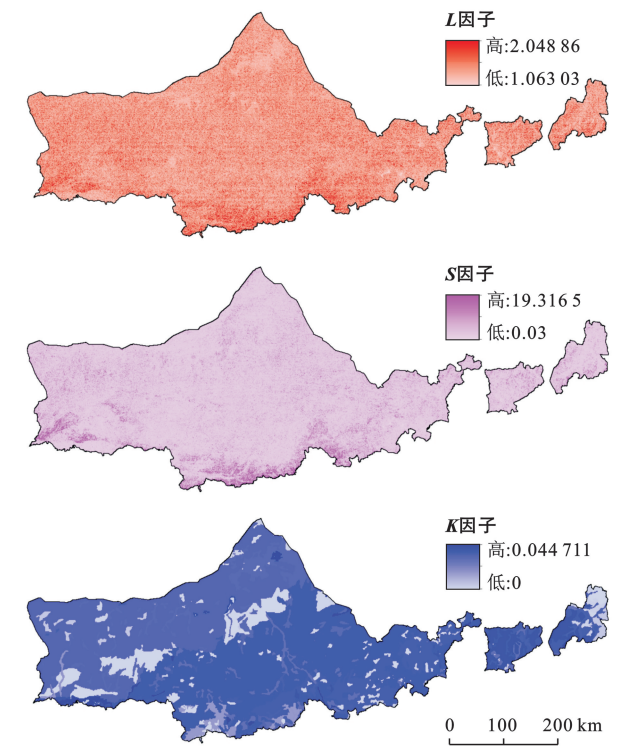


图 2 阴山北麓地区坡度、坡长(LS)及可蚀性因子(K)因子分布
Fig.2 Slope (S), slope lenth (L) and soil erodibility (K) factors distribution in north piedmont of Yinshan Mountain

(3) 坡度坡长因子(LS)。坡度坡长指标也是土地侵蚀影响程度的主要参数,包含了坡长因子和坡度因子。在通常状况下,斜面和坡长越大,径流能量就越大。因此降水对坡的侵蚀作用也越强,在土层中受到侵蚀作用的能力也就越强。首先分别计算 L 和 S ,

然后将二者相乘得到 LS 。 L 值计算公式为^[19]:

$$L = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) \cdot (22.13)^m} \quad (4)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_i, λ_{i-1} 分别为第 i 个和第 $i-1$ 个坡段坡长; m 为坡长指数,随坡度而变。

$$S \text{ 因子计算方程为}^{[20]}:$$
$$\begin{cases} S = 10.8 \times \sin \theta + 0.036 & (\theta < 5^\circ) \\ S = 16.8 \times \sin \theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ) \\ S = 21.6 \times \sin \theta - 0.96 & (\theta > 10^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度值。

研究区坡度坡长因子计算结果如图 2 所示。

(4) 植被覆盖因子(C)。 C 为 RUSLE 方程中最主要参数,表征了所有植物特性,对作物覆盖、轮作顺序和管护措施等综合影响,确定了 C 取值。 C 值一般为 0~1,当地面完全裸露时, C 值为 1.0;当地面植被覆盖度很好时, C 值可取 0.001。在试验中将 C 数据通过归一化植被系数($NDVI$)计算得到,而 $NDVI$ 计算参照王彦彪等^[10]方法,植被覆盖度(f_g)的算法则根据图像元二分模型^[21-22]。

$$C = \begin{cases} 1 & (f_g = 0) \\ 0.650 \ 8 - 0.343 \ 6 \lg f_g & (0 < f_g \leq 78.3\%) \\ 0 & (f_g > 78.3\%) \end{cases} \quad (7)$$

$$f_g = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_g - NDVI_0) \quad (8)$$

$$NDVI = (band_4 - band_3) / (band_4 + band_3) \quad (9)$$

式中: $NDVI_0$ 为裸土或无植被像元 $NDVI$ 值; $NDVI_g$ 为纯植被像元 $NDVI$ 值; $band_3$ 为红外波段; $band_4$ 为近红外波段。

研究区植被覆盖因子计算结果如图 3 所示。

(5) 水土保持因子(P)。水土保持措施指标判断土地类型是否采用了水土保持措施标准时,取值区域为 0~1,不产生水土流失区域则为 0,无其他水土保持措施时为 1。通过对前人得出结果与分析^[10,23-24],可以得到各种土地利用类型水土保持因子数值(表 2),计算结果如图 4 所示。

表 2 阴山北麓地区不同土地利用类型水土保持措施因子
Table 2 Soil and water conservation measures factors of different land types in north piedmont of Yinshan Mountain

| 土地利用类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设用地 | 未利用地 |
|--------|-----|----|-----|----|------|------|
| 水保措施因子 | 0.3 | 1 | 0.8 | 0 | 0 | 1 |

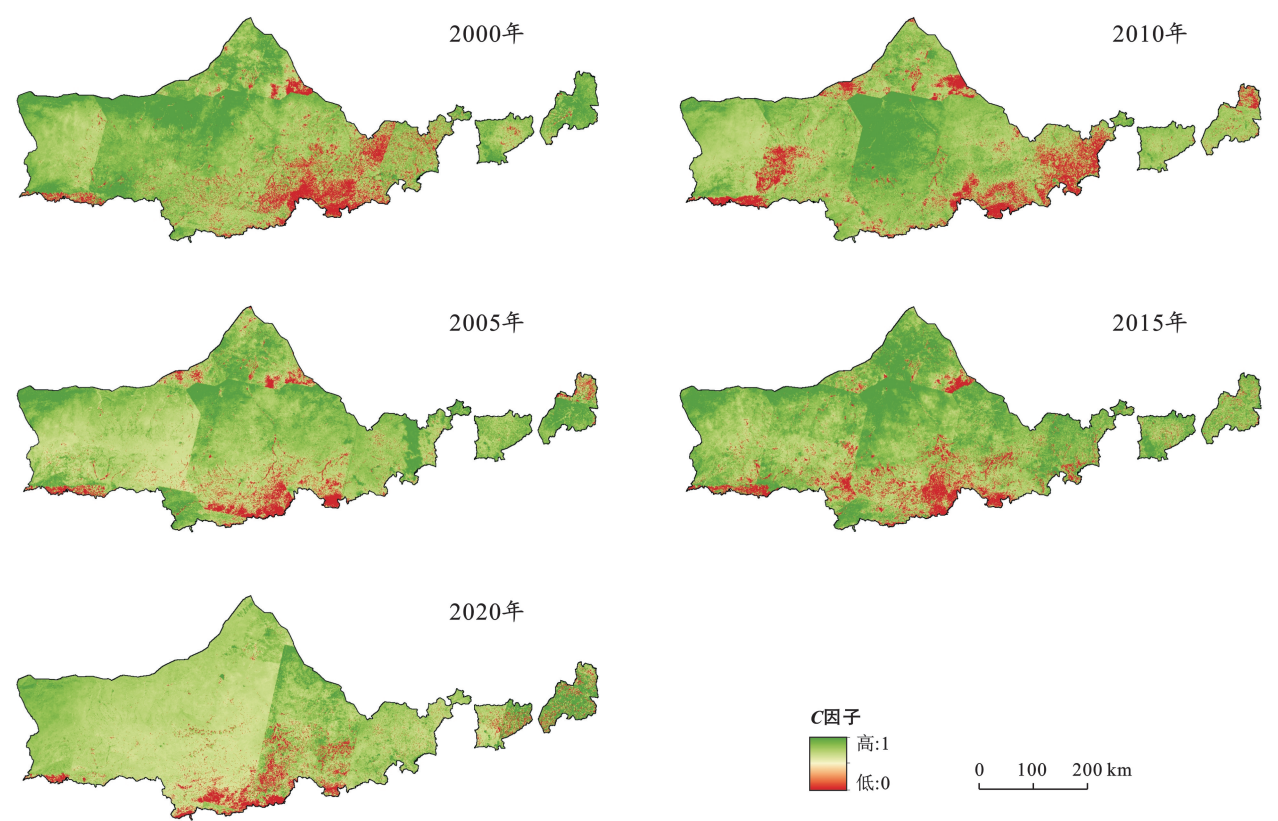


图 3 2000—2020 年阴山北麓地区植被覆盖度因子(C)分布

Fig.3 Vegetation coverage factor (C) distribution in north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020

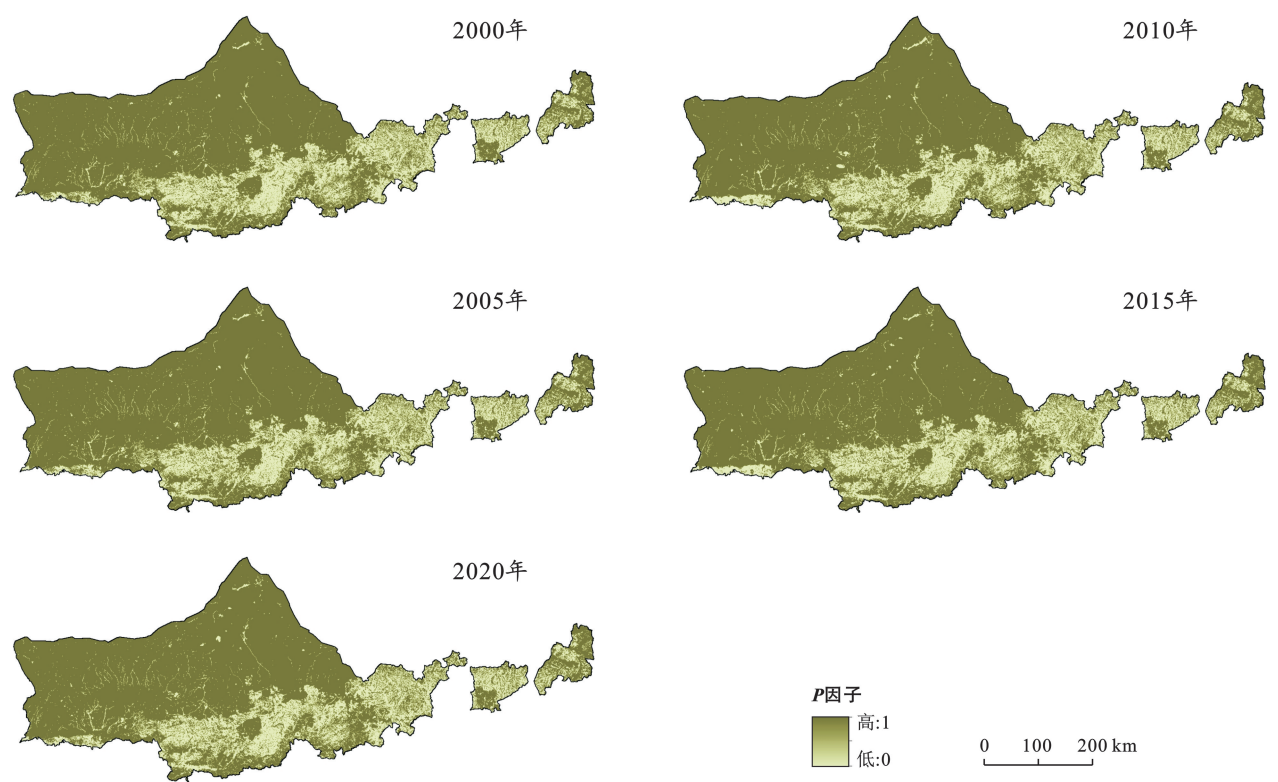


图 4 2000—2020 年阴山北麓地区水保措施因子(P)分布

Fig.4 Soil and water conservation measures factor (P) distribution in north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020

1.3.2 地理探测器模型 地理学现象的基本特征为时空分异性关系,地理要素空间结构分配一般并不一致,因而存在空间结构异质性^[25]。地理探测器能够判断并利用空间分异性,识别各种要素空间类型分区

相互异质性,并定量分析对地理学现象的影响要素^[26]。此次的科研重点通过因子探测器、风险探测器以及交互作用探测器,对能够影响阴山北麓区域土壤侵蚀的重要因子展开了探究,因子探测器用因子解析力(q 值)来量化解释程度,取值范围通常是 0~1,取值范围越大表示影响因子对土壤侵蚀程度的解析力也越好; p 值是用于判别各因素之间能否通过显著性检测, p 值<0.05,因子可以通过显著性检测;交互作用探测器则是判别水土流失中 2 个因子之间的相互影响的程度,也可以通过比较单因子与多因子之间的 q 值,来判断其对水土流失的影响程度;在水土流失监测中风险探测器是用于判断可导致水土流失的风险因素数值程度。水土流失受天气、植物、地貌等诸多因素制约^[27],选择将多年平均降水量,多年平均植被覆盖率、坡度、土地利用类型 4 个变量因子放在地理探测器中加以计算,以年平均土壤侵蚀力度为因变数。利用王劲峰^[28]等人提供数据离散化方式和先验知识,对 4 类因子实行了离散化操作,将多年平均降雨量等距离分成九级,将植被覆盖率分成 8 级(<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);坡度等级划分为 6 级(<5°,5°~10°,10°~15°,15°~20°,20°~25°,>25°)。按照土地的使用类型按类别进行划分,将阴山北麓地区划的

研究单位为 2 km×2 km 格网,每一格点均采取土壤侵蚀强度、降水、植物覆盖率、坡度和土地利用类型等数据作为地理探测器运行数据。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀各因子分析

通过对计算得到的各因子进行分析,RCPLSK 因子计算结果与前人的计算数值基本一致^[10]。 R 因子(图 1)呈现由西向东逐步升高,这是由降水量决定; LS 因子(图 2)由北向南升高,这是因为北部地区地形起伏偏大,而南部地区地形相对平缓; K 因子(图 2)主要与土壤质地相关,不同的土壤质地呈现不同的 K 值; C 因子(图 3)主要与植被覆盖度有关,林地覆盖度高,耕地、草地、未利用地覆盖度小; P 因子(图 4)与土地利用类型有关,林地草地值偏高,耕地值偏低。

2.2 土壤侵蚀时空变化分析

阴山北麓地区平均土壤侵蚀模数为 95.46 t/(km²·a),平均土壤侵蚀量为 9.14×10⁶ t,试验所得土壤侵蚀模数结果与前人研究结果^[10]基本一致。根据中国土壤侵蚀标准^[29]对阴山北麓区域土壤侵蚀强度进行了分类,并依次计算 5 个时期的土地侵蚀模数平均数值、土壤侵蚀范围(表 3)。

表 3 2000—2020 年阴山北麓地区不同年份土壤侵蚀强度面积

| 侵蚀强度 | 2000 年 | | 2005 年 | | 2010 年 | | 2015 年 | | 2020 年 | |
|---|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% |
| 微度侵蚀 | 77 264.40 | 80.75 | 68 376.44 | 71.45 | 60 837.97 | 63.55 | 55 342.53 | 57.81 | 69 834.50 | 72.98 |
| 轻度侵蚀 | 14 324.70 | 14.97 | 20 862.24 | 21.80 | 24 384.03 | 25.47 | 30 060.97 | 31.40 | 21 599.02 | 22.57 |
| 中度侵蚀 | 2 947.51 | 3.08 | 4 448.15 | 4.65 | 6 916.31 | 7.22 | 6 619.93 | 6.91 | 3 028.83 | 3.17 |
| 强烈侵蚀 | 879.51 | 0.92 | 1 490.17 | 1.56 | 2 348.12 | 2.45 | 2 666.90 | 2.79 | 917.89 | 0.96 |
| 极强烈侵蚀 | 234.74 | 0.25 | 434.99 | 0.45 | 1 027.68 | 1.07 | 877.07 | 0.92 | 260.33 | 0.27 |
| 剧烈侵蚀 | 68.56 | 0.07 | 107.35 | 0.11 | 243.65 | 0.25 | 190.46 | 0.20 | 78.77 | 0.08 |
| 年均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) | 86.88 | | 68.09 | | 108.39 | | 126.01 | | 87.96 | |

阴山北麓区域主要以微度侵蚀和轻微侵蚀为主,水土流失程度范围广且水平较低,5 a 时间中研究区内的微度侵蚀和轻微侵蚀面积约为研究区内水土流失的总量 89%~96%;中等侵蚀以上程度,占全国水土流失强度总面积 1%~4%;且水土流失形势仍相当恶劣。2000—2020 年阴山北麓区域土壤侵蚀不同强度面积变异显著。该区侵蚀强度主要以微度侵蚀为主,从 2000—2020 年微度腐蚀面积分别占有面积 80.75%,71.45%,63.55%,57.81%和 72.98%。

2000 年土壤微度侵蚀面积为 77 264.40 km²,在 2005—2015 年土壤微度侵蚀面积下降,分别为 68 376.44,60 837.97 和 55 342.5 km²,而在 2020 年土

壤微度侵蚀面积上升至 69 834.50 km²;轻度侵蚀在 2000—2020 年侵蚀面积变化规律与微度侵蚀相反,在 2000—2015 年上升到 30 060.97 km² 后,又在 2020 年下降到 21 599.02 km²,在近 5 a 呈现由高级侵蚀向低级侵蚀不断转化;中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀面积均在 2015 年达到最高,又在 2020 年间达到最低。该区域年均土壤侵蚀模数 2000 年为 86.88 t/(km²·a),2005 年为 68.09 t/(km²·a),2010 年为 108.39 t/(km²·a),2015 年为 126.01 t/(km²·a),2020 年为 87.96 t/(km²·a)。总的来说,阴山北麓区域土壤侵蚀强度主要以微度和轻微为主,2000—2020 年比例总和分别为 95.72%,93.25%,89.02%,

89.21%和 95.55%，年均侵蚀模数在 2000—2005 年呈减少趋势，而 2005—2015 年显著增加，2015—2020 年又开始减少，2020 年轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积呈现逐步减少趋势，表明阴山北麓地区土壤侵蚀状况开始缓解。

2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀空间分布格局大体相同，但局地差别十分明显(图 5)。从不同土壤侵蚀程度所在区域来看，水土流失最强烈地区主要分布于阴山山脉沿线和多伦县大部，以极强烈侵蚀和剧烈侵蚀为主，2000—2020 年阴山山脉沿线土壤侵蚀在 2005 年得以缓解，2005—2015 年侵蚀程度加剧，到 2020 年再次得以缓解，2005—2015 年高等级侵蚀图斑呈逐步加大化。阴山山脉沿线地区微度、轻度和中度侵蚀逐步向强烈侵蚀及以上转化。2000—2020

年乌拉特中旗东南部和察右中旗西南部、固阳县和武川县北部、四子王旗中部、多伦县大部均存在大面积高等级侵蚀。从土壤侵蚀速率(图 6)上来看，2000 年有 80.75%的侵蚀速率在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，有 95.72%的侵蚀速率在 $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下；2005 年有 71.45%的侵蚀速率在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，有 93.25%的侵蚀速率在 $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下；2010 年有 63.55%的侵蚀速率在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，有 89.02%的侵蚀速率在 $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下；2015 年有 57.81%的侵蚀速率在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，有 89.21%的侵蚀速率在 $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下；2020 年有 72.98%的侵蚀速率在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，有 95.55%的侵蚀速率在 $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下，说明研究区土壤侵蚀比较严重。

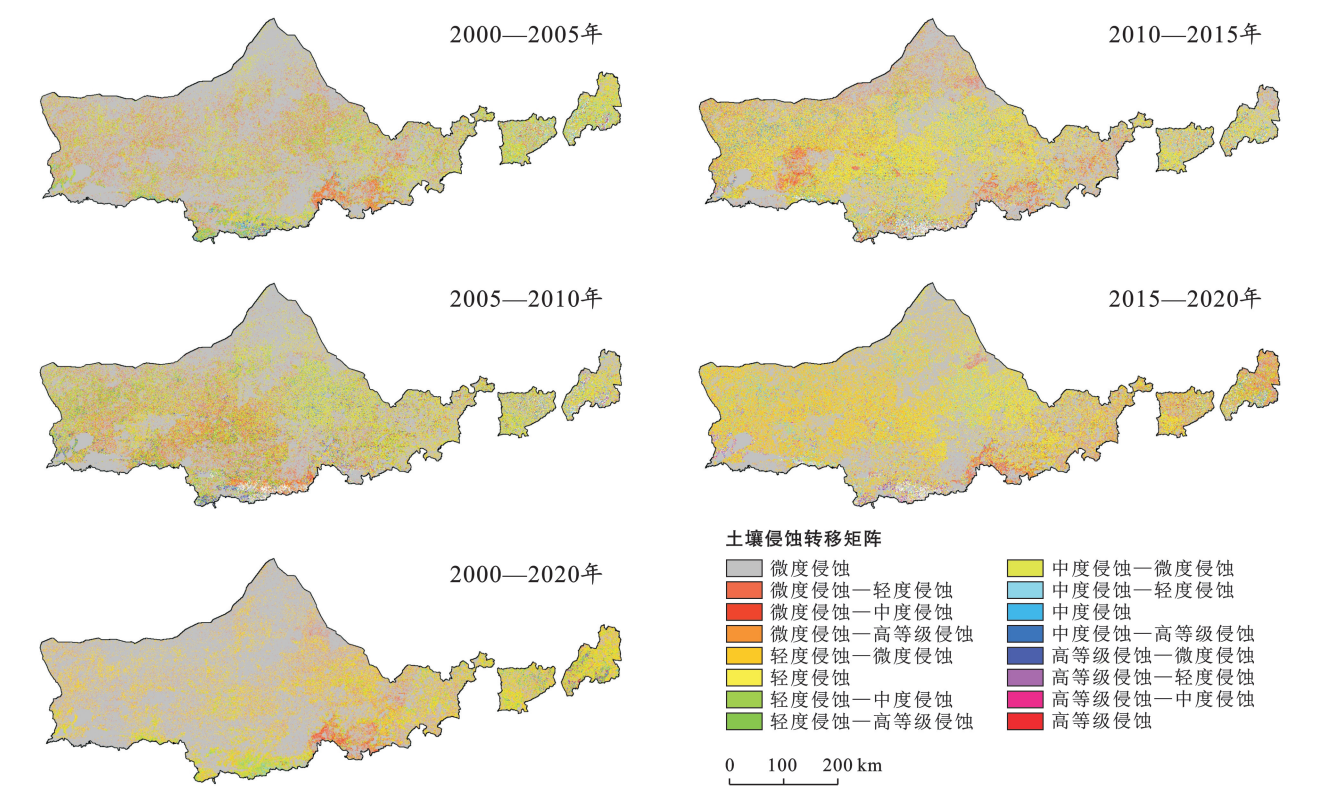


图 5 2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀分布

Fig.5 Soil erosion distribution in north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020

为了有效地展示阴山北麓区域水土流失空间变化规律，采用 ArcGIS 空间叠加方法，阴山北麓区域水土流失的时空变化转移矩阵图(图 7)。

如图 7 所示，2000—2005 年土壤侵蚀在微、轻和中度侵蚀强度之间变化明显，有 $9\,537.81\text{ km}^2$ 微度侵蚀面积向轻度侵蚀转化； $2\,248.15\text{ km}^2$ 由轻度侵蚀向中度侵蚀过渡；低侵蚀强度转换为高侵蚀强度面积为 $1\,017.24\text{ km}^2$ ，高侵蚀强度转换为低侵蚀强度面积为 167.54 km^2 。2005—2010 年土壤侵蚀能力变化与

2000—2005 年类似，由微度侵蚀向轻度侵蚀转化面积为 $10\,300.67\text{ km}^2$ ；低侵蚀强度转变为高侵蚀强度面积为 $2\,093.96\text{ km}^2$ ，高侵蚀强度转化为低侵蚀强度面积为 508.08 km^2 。2010—2015 年土壤侵蚀能力变化和 2005—2010 年相似，有 $10\,696.78\text{ km}^2$ 微度侵蚀面积向轻度侵蚀转化；低侵蚀强度转变为高侵蚀强度面积为 $1\,987.08\text{ km}^2$ ，高侵蚀强度转变为低侵蚀强度面积为 $1\,363.49\text{ km}^2$ 。2015—2020 年土壤侵蚀强度转化方向与 2000—2015 年相反，有 $17\,897.34\text{ km}^2$

轻度侵蚀转变为微度侵蚀,4 739.34 km² 由中度侵蚀向轻度侵蚀过渡;高侵蚀强度转化为低侵蚀强度面积为 2 906.69 km²,而低侵蚀强度转化为高侵蚀强度

面积为 430.15 km²。2000—2020 年强烈侵蚀和极强烈侵蚀强度面积增加 63.98 km²,增长幅度达到 5.43%。

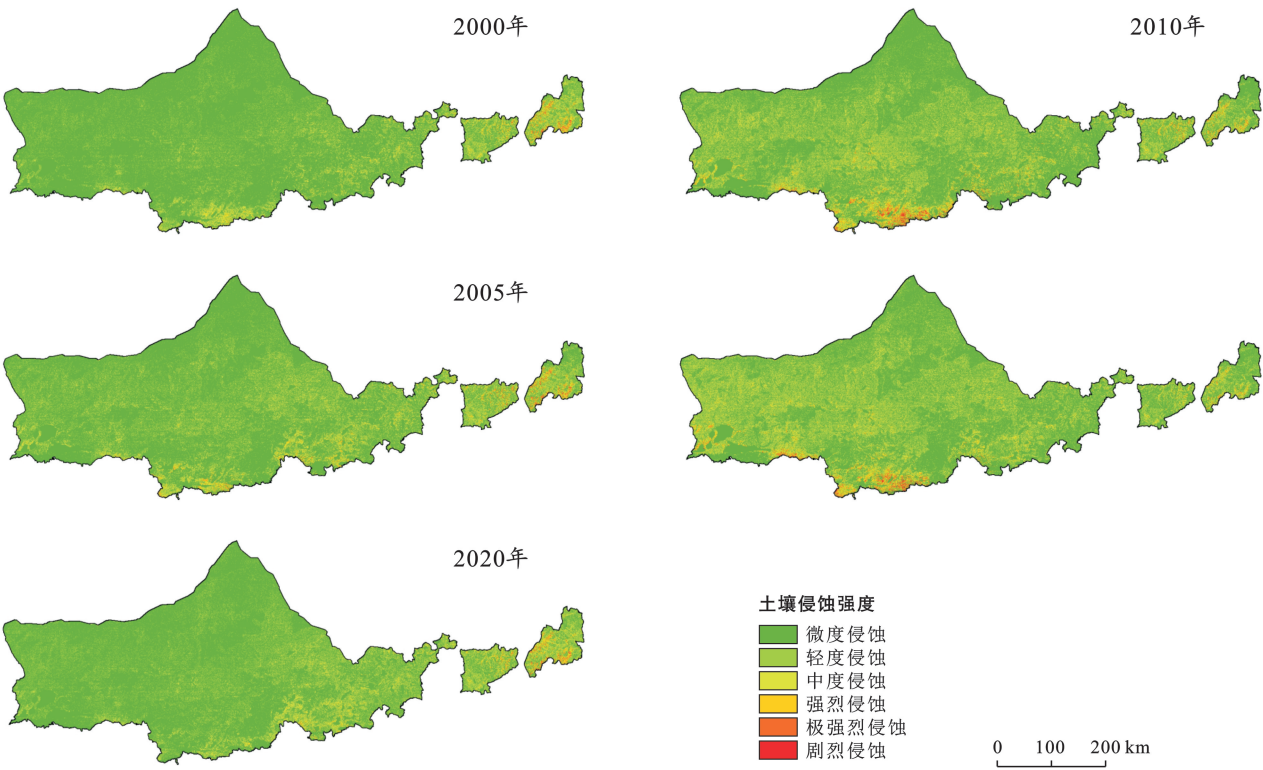


图 6 2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀速率
Fig.6 Soil erosion rate distribution in north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020

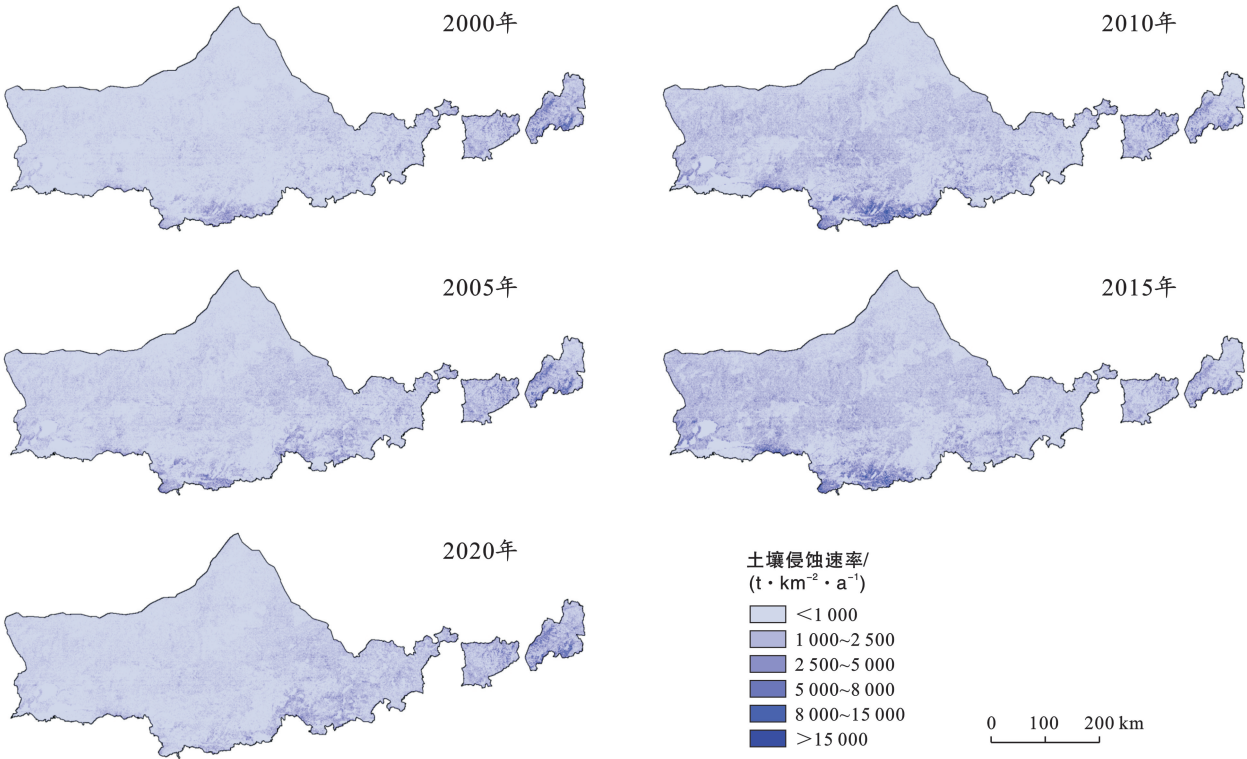


图 7 2000—2020 年阴山北麓地区土壤侵蚀转移矩阵
Fig.7 Soil erosion transfer matrix diagram in north piedmont of Yinshan Mountain from 2000 to 2020

2.3 土壤侵蚀影响因子分析

基于地理探测器中因子探测器,研究了不同影响因子对土地侵蚀空间分异特性解释能力 q 值均通过显著性检验(表 4)。结果显示,除坡度外其他 3 个影响因子均对土壤侵蚀分布有重要影响。阴山北麓区域的各因子贡献能力程度顺序为:土地利用类型>植被覆盖度>年均降水量>坡度。土地利用类型 q 值最大,贡献率为 21.25%,说明了土地利用类型对土壤侵蚀贡献程度最高,为主体因子;坡度类型 q 值较小,贡献率约为 0.15%,对阴山北麓区域土壤侵蚀危害程度也很小。上述因素共同影响了阴山北麓地区土壤侵蚀空间分布。其中,植被覆盖度和土地利用类型都比年平均降水量 q 值高,上述因素对阴山北麓区域土壤侵蚀影响明显。

表 4 土壤侵蚀各影响因子 q 值

| Table 4 The q values of impact factors of soil erosion | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| 因子 | 年均降水量 | 植被覆盖度 | 坡度 | 土地利用类型 |
| q 值 | 0.057 6 | 0.144 6 | 0.001 5 | 0.212 5 |

由交互探测器结果可知(表 5),各种土壤侵蚀影响因子在相互作用后,解释能力明显高于单个因子。土地利用类型因子与其他因子的叠加结果大多列在首位,因此,存在着较强解析能力。其中,植被覆盖度因子和土地利用类型因子叠加 q 值最高,表明不同地区植物覆盖度和土地利用类型之间土壤侵蚀程度存在显著差异。植被覆盖度因子和土地利用类型因子交互作用 q 值是 0.334 0,植被覆盖度单因子 q 值是 0.144 6,表明植被覆盖度会对土壤侵蚀有抑制作用,可通过退耕还林还草,植树造林,使地表径流减少,增强下渗能力,减少水土流失。

风险探测器结果可对土壤侵蚀高风险地区加以确定。平均坡度为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,年平均降雨量 365~

413 mm,植被覆盖率 <0.30 ,土地利用类型为耕地的区域为阴山北麓地区高风险区。植被覆盖度在 <0.30 范围内为高风险区,结合土壤侵蚀分布情况以及植被覆盖度因子分布图可见,植物覆盖率越高对水土流失的抑制作用就越显著。在土地利用类型中耕地是最容易遭受土壤侵蚀侵害的类型,年均土壤侵蚀能力约为 $50.37\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。由于固土能力较差,雨水直接冲击地面,造成土壤侵蚀量的增大;阴山北麓地区主要以缓坡丘陵为主,当坡度处于 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,易发生土壤侵蚀;在降水比较充沛,植被覆盖率较低区域,流水对土地影响强烈,易引起水土流失现象。

表 5 土壤侵蚀影响因子交互作用下 q 值

| Table 5 The q value under interaction of soil erosion impact factors | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| 因 子 | 年均降水量 | 植被覆盖度 | 坡 度 | 土地利用类型 |
| 年均降水量 | 0.057 6 | 0.212 6 | 0.060 5 | 0.257 8 |
| 植被覆盖度 | | 0.144 6 | 0.149 1 | 0.334 0 |
| 坡 度 | | | 0.001 5 | 0.219 7 |
| 土地利用类型 | | | | 0.212 5 |

土地利用类型因素是造成本试验区内土壤侵蚀的最主要因素,各种土地利用类型土壤侵蚀强度的差异明显。对阴山北麓区域不同土地利用类型土壤侵蚀的模数和规模比例进行比较研究(表 6);按照平均侵蚀程度的多少,依次排列为林地、草地、未利用土地、耕地、建设用地、水域。草地面积比例为 68.54%,为阴山北麓的主要土地利用类型。水域和建筑用地因在 P 指标中的赋值都是零,故认定这 2 种在相当数量上对土壤侵蚀并无影响。未利用土地和耕地由于缺乏水土保持措施,侵蚀程度较强。耕地面积比例为 17.28%,土壤侵蚀平均模数为 $50.37\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,主要分布在阴山北麓北部。根据以上结果可知,退耕还林,植树造林是减少土壤侵蚀的关键。

表 6 阴山北麓地区不同土地利用类型土壤侵蚀平均模数及面积比例

| Table 6 Average soil erosion modulus and area proportion of different land use types in north piedmont of Yinshan Mountain | | | | | | |
|--|-------|--------|-------|------|------|-------|
| 土地利用类型 | 耕 地 | 林 地 | 草 地 | 水 域 | 建设用地 | 未利用土地 |
| 平均土壤侵蚀强度/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ | 50.37 | 145.86 | 98.15 | 0.00 | 0.00 | 97.34 |
| 面积比例/% | 17.28 | 2.54 | 68.54 | 1.34 | 2.35 | 7.96 |

3 讨论

本研究利用 GIS 技术与 RUSLE 模型计算出阴山北麓地区的土壤侵蚀量,以定量的形式,了解该地区在 2000—2020 年的土壤侵蚀情况。

2000—2020 年近 20 a 来阴山北麓区域水力侵蚀主要以微度侵蚀为主,轻度侵蚀为辅,而由于该研究

区气候类型为半干旱大陆性季风气候。因此,平均值降水量较低且降雨多聚集在夏季^[30,10]。从空间划分上考虑,在研究区内的南部土壤水力侵蚀率比较高,主要区域包括多伦县、太仆寺旗、察哈尔右翼中旗、武川县、四子王旗、乌拉特中旗等,其成因为植被覆盖程度较低及区域降雨特征。该区内年降雨量最南可能超过 400 mm,北部低于 100 mm^[31-32],从而造成了南

部区域的土壤水力侵蚀面积远超过北部区域,土壤侵蚀更严重,进一步增加了土壤侵蚀,植被覆盖降低。

从空间尺度上分析,察哈尔右翼中旗、太仆寺旗、多伦县地处阴山北麓南端,植被稀少,其土地利用方式以耕作居多,阵性降雨可产生明显水土流失。所以,在这些地方土壤侵蚀量超过了北部的其他旗县。对该地区各乡镇耕地进行统计,北部耕地面积占总耕地面积 28.73%,南部耕地占总耕地面积 71.27%。南部地区出现大规模高等级侵蚀,通过叠加土地利用数据可知,出现土壤侵蚀的南部地区主要是林区,因为这些地区植被覆盖度低,且受到人为不合理利用林木资源影响,易造成土壤侵蚀加重现象。乌拉特中旗和四子王旗,土地利用类型以草地为主。该地区植被覆盖率较低,由降水引发土壤侵蚀也更加剧烈。

按时间顺序分析,2000—2020 年的水土流失程度在 2005 年达到历史最低点,之后又逐渐增加,在 2015 年达到最高点,到 2020 年有所好转,主要由于各年降水程度变化导致植被生长产生差异,影响植被覆盖度,导致土壤侵蚀模数产生差异。2020 年水土流失面积比 2000 年有了大幅上升,低程度侵蚀也逐步向高程度侵蚀转化,有 8 297.10 km² 微度侵蚀地区逐步转化为轻度侵蚀区域,有 370.41 km² 轻度侵蚀区域转变为中度侵蚀区域,有 114.03 km² 中度侵蚀区域转变为强烈侵蚀区域,有 46.71 km² 强烈侵蚀区域转变为极强烈侵蚀区域,有 16.99 km² 极强烈侵蚀区域转变为剧烈侵蚀区域,低等级侵蚀区域面积转化为高等级侵蚀区域面积达到了 306.42 km²。该区土壤侵蚀量也逐年上升,年均侵蚀模数从 2000 年 86.88 t/(km²·a) 上升到 2020 年 87.96 t/(km²·a)。

从地理探测器分析结果来看,影响阴山北麓地区土壤侵蚀的因素较多。多因子的协同效应构成了土壤侵蚀空间格局,其中土地利用类型是主控因素,其余因子起辅助作用。该区降水量较小,蒸发量大,同时降雨大多聚集于夏季,为阴山北麓区土壤侵蚀的内部因素。人为地毁坏当地植物,开荒,掠夺式放牧,开发矿藏资源等,造成了土壤退化与严重的土壤侵蚀为该地区外在因素。这两者联合作用造成了土壤侵蚀过程发生^[33]。

因为农田和草原所占比重都很大,所以农业在整个地区土壤侵蚀加剧的过程中所起到效果最为突出,但同时由于农田数量下降使粮食作物大幅减产,地方村民出于生计而被迫开荒,开荒或超载放牧导致草原大面积退化,环境条件更加低劣,极大加重了土壤侵蚀程度。水土流失带来了穷困,但同时贫乏也加速土壤侵蚀,这也是干旱贫乏的地区生态环境恶性循环基

本模式。根据地理探测器分析结果以及阴山北麓地区土地利用类型面积比例和分布情况,耕地地区为阴山北麓地区土壤侵蚀防治的重要地区,为改善土壤侵蚀现状可采取对耕地和森林进行生态恢复,植树造林种草,从而扩大林草覆盖面,改善植被覆盖率,降低地表径流速率,提高下渗能力,以控制土壤侵蚀发生^[18]。

阴山北麓属风蚀—水蚀复合侵蚀带,南部则以水蚀为主,并兼有大风侵袭;北部地区以风力侵蚀居多,兼有水力侵蚀,水力侵蚀大多出现在夏季,而风力侵蚀则大多出现在冬春二季,风蚀和水蚀在空间上和时间上交叉、重叠,导致地表土大幅度减少^[10]。修正土壤流失方程(RUSLE)为在水力土壤侵蚀研究领域应用的广泛经验模式,因此本研究计算结果仅是基于降雨、土壤性质、地貌、植被覆盖和管理因子的水土流失,并未将风力侵蚀问题计入其中,今后仍将研究该地区的复合侵蚀。此外,由于土壤流失方程在该地区使用较少,且不能完全按照实际状况和前人研究进行调整,所以计算结果可能出现了一些偏差,关于该方程运用情况还应进一步完善。

4 结论

(1) 2000—2020 年多年平均土壤侵蚀模数为 95.46 t/(km²·a),平均土壤侵蚀量为 9.14×10^6 t,其中又以微度和轻度侵蚀程度居多。土壤侵蚀最严重地区,主要分布于阴山山脉沿线和多伦县大部分地区。

(2) 2000—2020 年度平均土壤侵蚀模数,总体为上升趋势。其中 2015 年平均土壤侵蚀模数为最高,而 2005 年平均土壤侵蚀模数则最少。该过程为降雨可蚀性因子与植被覆盖程度因子共同作用引起,植被覆盖程度低与降水在一年中分布不均,且主要集中在夏季共同导致土壤侵蚀大幅增加。2020 年阴山北麓绝大部分地区土壤侵蚀强度较 2000 年程度进一步加深,总体上剧烈侵蚀面积逐渐扩大,由微度、轻度、中度侵蚀逐步向强烈、极强烈侵蚀转化,但轻度侵蚀面积扩大较多。

(3) 各因子解释量大小为:土地利用类型因子>植被覆盖度因子>降雨因子>坡度因子,土地利用类型因子 q 值最大,此为影响土壤侵蚀空间格局分布最主要原因;土地利用类型因子和其他综合因子的相互影响显著高于其他综合因子,土地利用类型差异明显影响了土壤侵蚀强度与空间分布;土地利用类型为耕地、植被覆盖度低于 0.30,土地坡度在 15°~20°和降雨量在 365~413 mm 之间地区为高风险侵蚀地区,应予以高度关注;植被覆盖度因子为该调查地区土壤侵蚀程度的重要因子,与土地利用类型因子交互作用

程度高,根据地理探测器研究结论和对阴山北麓地区土地利用类型面积比例和平均土壤侵蚀模数分析,植被覆盖率较低的耕地和草原为阴山北麓地区土壤侵蚀防治的重要地区,应当进一步落实退耕还林还草措施。

[参 考 文 献]

- [1] 李锐,上官周平,刘宝元,等.近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):1-6.
- [2] Borrelli P R. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):1-13.
- [3] Zhang Hua, Lei Jinping, Wang Hao, et al. Study on dynamic changes of soil erosion in the north and south mountains of Lanzhou [J]. *Water*, 2022,14(15):23-88.
- [4] Eyasu T M. Assessment of spatial soil erosion using RUSLE model integration with GIS and RS tools a case study of Gojeb Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia [J]. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 2022,10(5):130-139.
- [5] Bufalin M, Materazzi M, Martinelli C, et al. Soil erosion and deposition rate inside an artificial reservoir in Central Italy: bathymetry versus RUSLE and Morphometry [J]. *Land*, 2022,11(11):19-24.
- [6] 杜梅,赵健赞,杨静,等.基于 MODIS 和 Landsat 数据的湟水河流域土壤侵蚀时空变化研究[J].水土保持通报,2022,42(3):131-138.
- [7] 高泗强,刘琪,罗歆.基于 RUSLE 模型的重庆土地利用变化及土壤侵蚀特征分析[J].中国水土保持,2022(11):32-36,7.
- [8] 王猛,王鹤松,姜超,等.基于 RUSLE 和地理探测器模型的西南地区土壤侵蚀格局及定量归因[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(6):1386-1402.
- [9] 牛丽楠,邵全琴,刘国波,等.六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1755-1767.
- [10] 王彦阁,胡晓海,孙海莲,等.阴山北麓农牧交错区 2000—2015 年土壤流失及保持量变化研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(2):127-135.
- [11] 朱丽,秦富仓,杨翠林,等.阴山北麓农牧交错带土壤侵蚀驱动机制研究[J].水土保持研究,2008,15(5):34-37.
- [12] 刘建宇,聂洪峰,宋保芳,等.内蒙古阴山北麓的风蚀沙化作用及其生态地质效应[J].中国地质,2023(1):1-16.
- [13] 秦新平.旱作农田土壤风力侵蚀研究[J].内蒙古水利,2014(1):11-12.
- [14] 邹春霞,申向东,李夏子,等.内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1172-1178.
- [15] Mhaske S N, Pathak K, Dash S S, et al. Assessment and management of soil erosion in the hilltop mining dominated catchment using GIS integrated RUSLE model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,294(5):112-187.
- [16] 王丰,刘金铜,付同刚,等.基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1064-1076.
- [17] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2021,35(2):31-37,46.
- [18] 李益敏,刘师旖,李盈盈,等.福贡县土壤侵蚀时空变化及其影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(3):57-63,70.
- [19] Sun Xiaohao, Miao Linchang, Yuan Junhao, et al. Application of enzymatic calcification for dust control and rainfall erosion resistance improvement [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,7(4):143-468.
- [20] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems[J]. *Ecosystems*, 1998,1(1): 416-426.
- [21] 高凡洁,张富,胡彦婷,等.基于 GIS 和 RUSLE 模型的定西市安定区土壤侵蚀时空变化[J].甘肃农业大学学报,2022,57(1):161-168.
- [22] 牛慧兰,任鸿瑞.青藏高原草地非光合植被覆盖度时空动态[J].草业科学,2022,39(8):1521-1530.
- [23] 刘英,魏嘉莉,岳辉,等.神东矿区土壤侵蚀时空特征及驱动力分析[J].测绘科学,2022,47(1):142-153.
- [24] 赵蒙恩,闫庆武,刘政婷,等.鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因素分析[J].干旱区研究,2022,39(6):1819-1831.
- [25] 高江波,张怡博,左丽媛.喀斯特山地土壤侵蚀和产水量的最优解释力[J].地理学报,2022,77(11):2920-2934.
- [26] Xiong Liwei, Li Shenxin, Zou Bin, et al. Long time-series urban heat island monitoring and driving factors analysis using remote sensing and geodetector [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022,51(9):721-759.
- [27] 朱永杰,王超,刘自强.降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2021,41(6):8-14.
- [28] 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.
- [29] 水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190-2007.[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [30] 李蕊.晋陕蒙神东矿区生态环境质量时空特征变化研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [31] 那木汗,阿如早,苏德苏日古格.基于 Logistic 回归模型的阴山北麓农牧交错区耕地资源潜力研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(4):19-24.
- [32] 谢航宇,江怡,陈麒,等.2007—2020 年白沙河流域土壤水力侵蚀时空变化[J].水土保持通报,2022,42(4):74-81,89.
- [33] 李森,李凡,孙武,等.黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制[J].地理科学,2004,24(1):61-67.