

# 哈尔滨市土壤保持服务价值时空演变及其驱动力

祁玉馨, 赵聪聪, 申沛鑫, 任术, 胡远东

(东北林业大学 园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** [目的] 土壤侵蚀是全球性的重要环境问题, 严重制约了人类的生产和生活。定量研究土壤保持服务价值为区域水土保持措施的制定, 哈尔滨市水土保持功能分区规划提供科学依据。[方法] 基于InVEST模型泥沙输移比例模块, 对哈尔滨市2000, 2010, 2020年的土壤侵蚀量和土壤保持量进行评估, 借助空间自相关法分析土壤保持量的空间聚集类型, 并利用参数最优地理探测器揭示其空间异质性形成的驱动力。[结果] ①2000, 2010, 2020年哈尔滨市土壤保持量分别为 $2.18 \times 10^9$ ,  $2.07 \times 10^9$ ,  $2.77 \times 10^9$  t, 呈现先减少后增加的趋势, 整体呈现“西低东高”的空间分布格局; ②土壤保持量呈现强烈的空间正相关, 以低-低聚集和高-高聚集类型为主, 低-低聚集类型面积呈现下降趋势, 而高-高聚集类型则呈现先降低后上升的趋势; ③高程、降水量和坡度对哈尔滨市土壤保持量空间异质性的解释力最强, 平均解释力分别为0.225 9, 0.198 9, 0.180 4, 其中坡度和降水量与其他因子的交互作用, 是研究区解释力最强的交互因素。[结论] 哈尔滨市应加强对城市西部和松花江沿岸的水土治理, 同时维持城市北部和东部良好的水土状况, 避免大规模的人类干扰活动。

**关键词:** InVEST模型; 土壤保持; 地理探测器; 空间自相关; 哈尔滨市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0357-11

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 祁玉馨, 赵聪聪, 申沛鑫, 等. 哈尔滨市土壤保持服务价值时空演变及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 357-367. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230828.001; Qi Yuxin, Zhao Congcong, Shen Peixin, et al. Spatiotemporal evolution of soil conservation function value and its driving forces in Harbin City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 357-367.

## Spatiotemporal Evolution of Soil Conservation Function Value and Its Driving Forces in Harbin City

Qi Yuxin, Zhao Congcong, Shen Peixin, Ren Shu, Hu Yuandong

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** [Objective] Soil erosion is an important environmental problem of globality, which seriously restricts human production and life. Soil maintenance conservation function was quantitative studied to formulate the regional soil and water conservation measures, and provide scientific basis for the functional partition planning and governance of Harbin City. [Methods] Based on the InVEST model sediment delivery ratio module, this study evaluated the soil erosion and soil conservation in 2000, 2010 and 2020 in Harbin, analyzed the spatial aggregation type of soil conservation with the help of spatial autocorrelation, and used the optimal geographic detector to reveal the driving forces of spatial heterogeneity. [Results] ① In 2000, 2010 and 2020, the soil conservation in Harbin City was  $2.18 \times 10^9$ ,  $2.07 \times 10^9$ , and  $2.77 \times 10^9$  t, respectively, showing a trend of decreasing first and then increasing, and the overall spatial distribution pattern of “low in the west and high in the east”. ② The soil conservation amount showed a strong spatial positive correlation, mainly “low-low aggregation” and “high-high aggregation” types, the “low-low aggregation” type area showed a downward trend, while the “high-high aggregation” type showed a decreasing and then rising trend. ③ Elevation, precipitation and slope had the strongest explanatory power on the spatial heterogeneity

收稿日期: 2023-05-30

修回日期: 2023-07-25

资助项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目“黑龙江生态产品总值核算”(GZ20220117)

第一作者: 祁玉馨(1999—), 女(汉族), 山东省海阳市人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态系统服务。Email: qiyuxin@nefu.edu.cn.

通信作者: 胡远东(1977—), 男(土家族), 湖北省宜昌市人, 博士, 副教授, 主要从事区域景观规划与生态修复、城市生态系统服务等。Email: huyuandong@nefu.edu.cn.

of soil conservation in Harbin City, with average explanatory forces of 0.225 9, 0.198 9 and 0.180 4, respectively, and the interaction between slope and precipitation and other factors was the strongest explanatory interaction factor in the study area. [Conclusion] Water and soil management in the western part of Harbin City and along the Songhua River should be strengthened, while good water and soil conditions in the north and east of the city should be maintained to avoid large-scale human disturbance activities.

**Keywords:** InVEST model; soil conservation; Geodetector; spatial autocorrelation; Harbin City

土壤侵蚀造成生态环境恶化<sup>[1]</sup>,生态系统破碎化以及土地退化和洪水泛滥等自然灾害<sup>[2]</sup>,严重威胁区域生态安全<sup>[3]</sup>,已成为全球的重要生态环境问题<sup>[4]</sup>。土壤保持是生态系统提供的重要调节服务功能之一,为有效防止土地退化和降低洪涝灾害风险提供了重要保障<sup>[5]</sup>。因此,对区域土壤保持服务进行定量评估,深入探究土壤保持量的时空演变规律及其驱动力,对提升生态系统服务功能,增进人类福祉以及促进地区生态环境良性发展具有重要意义。

InVEST (the integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool) 模型由美国斯坦福大学、大自然保护协会 (The Nature Conservancy) 和世界自然基金会 (World Wide Fund For Nature; WWF) 联合开发,其泥沙输移比例模块 (sediment delivery ratio, SDR) 在区域土壤保持能力评估、土壤流失模拟等方面受到国内外的广泛应用<sup>[6]</sup>,其在 USLE (universal soil loss equation) 模型的基础上考虑了地块拦截上游沉积物的能力,提升了土壤保持服务评估的合理性和准确性<sup>[7-8]</sup>。目前 SDR 模块已应用在肯塔基州<sup>[9]</sup>、埃塞俄比亚<sup>[10-11]</sup>,以及巴林左旗<sup>[12]</sup>、横断山区等<sup>[13]</sup>区域。在探究影响因素方面,多采用地理探测器探测其时空变化的驱动力<sup>[14-16]</sup>。地理探测器对连续型自变量的分类方法会对计算结果产生较大影响,传统方法一般根据经验知识对连续型自变量分级,人为主观性较强,很大程度上会影响驱动因子的解释力,而借助 R 语言运用参数最优地理探测器进行计算,能够避免主观因素对结果的影响,更加精确地探测土壤保持量空间异质性的驱动力。

黑土具有深厚的腐殖质层,是中国重要的农业土壤资源,黑土区是中国重要的商品粮生产基地<sup>[17]</sup>。目前东北黑土区存在严重的水土流失问题<sup>[18]</sup>,黑土层面临变薄、变硬和丧失的危险<sup>[19]</sup>,如果不采取有效防治措施,大部分黑土层将会消失<sup>[20]</sup>,进而严重制约黑土区的经济和农业生产。作为黑龙江省省会城市,哈尔滨市耕地面积占全市总面积近半,且耕地资源大部分为养分丰富的黑土地<sup>[21]</sup>,加之其占据小兴安岭和张广才岭两大生态屏障区,在水土保持方面具有重要作用。据此,本文基于 InVEST 模型 SDR 模块探

究哈尔滨市 2000—2020 年土壤侵蚀量和土壤保持量的时间演变特征及空间分布格局,并借助参数最优地理探测器揭示了哈尔滨市土壤保持量空间异质性的驱动力,以期为哈尔滨市水土保持功能分区规划及治理措施提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

哈尔滨市 (44°04′—46°40′N, 125°42′—130°10′E) 位于中国东北平原东北部地区,总面积  $5.30 \times 10^4 \text{ m}^2$  左右 (图 1)。作为重要的国际性综合交通枢纽,哈尔滨市是哈长城市群的核心城市之一和第一批国家新型城镇化综合试点城市<sup>[22]</sup>,对东北城市群的可持续发展起着至关重要的作用。哈尔滨市属于中温带大陆性季风气候,四季分明,总体地貌为南高北低,西高东低,气候变化特征显著,且极端灾害天气频繁,土壤类型多种多样,土地肥沃,地域辽阔,适宜发展农业生产,是重要的粮食生产基地<sup>[23]</sup>。

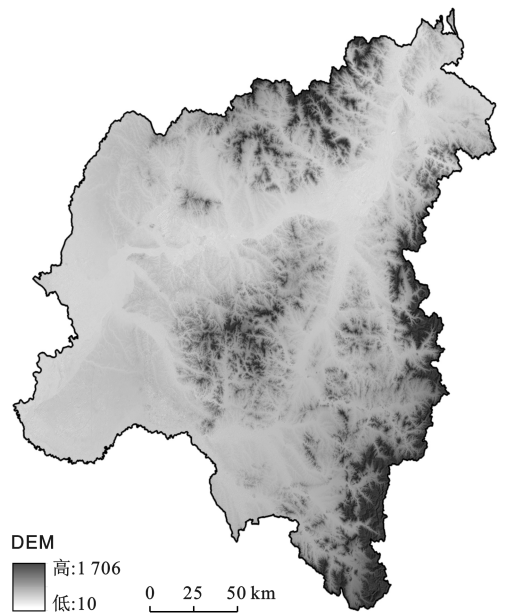


图 1 哈尔滨市地形图

Fig.1 Topographic map of Harbin City

### 1.2 数据来源

本文数据主要来源 (如表 1 所示)。

表 1 研究数据来源  
Table 1 Data sources of study

数据类型	数据形式	数据来源	分辨率/m	年份
土地利用类型		GlobeLand30 (http://www.globallandcover.com/)	30	2000,2010,2020
降水量		国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	1 000	2000,2010,2020
气温	栅	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	1 000	2000,2010,2020
DEM	格	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)	30	2009
归一化差值积雪指数(NDSI)		国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn/portal/)	500	2000,2010,2020
归一化植被指数(NDVI)		美国地质勘探局的 MOD13Q1 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13_q1_v061/)	250	2000,2010,2020
土壤数据		中国科学院南京土壤研究所 (https://soildata.issas.ac.cn/)	1 000	1995

## 2 研究方法

### 2.1 土壤保持量时空演变分析

#### 2.1.1 SDR 模块

(1) 模块原理及主要参数。InVEST 模型中 SDR 模块以基于像元尺度的 USLE 计算方法为基础<sup>[24]</sup>。土壤保持量计算公式为:

$$Q_{SC} = Q_{se_p} - Q_{se_a} \quad (1)$$

$$Q_{se_p} = R \times K \times L \times S \quad (2)$$

$$Q_{se_a} = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (3)$$

式中:  $Q_{sr}$  为年土壤保持量 [ $t/(hm^2 \cdot a)$ ];  $Q_{se_p}$  为潜在土壤侵蚀量 [ $t/(hm^2 \cdot a)$ ];  $Q_{se_a}$  为实际土壤侵蚀量 [ $t/(hm^2 \cdot a)$ ];  $R$  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

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.025 \cdot 6w_s \left( 1 - \frac{w_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \times \left[ \frac{w_{silt}}{w_{clay} + w_{silt}} \right]^{0.3} \times \left\{ 1 - \frac{0.25C_{org}}{[C_{org} + \exp(3.72 - 2.95C_{org})]} \right\} \times \left\{ 1 - \frac{0.7(1 - w_s/100)}{\{(1 - w_s/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - w_s/100)]\}} \right\} \quad (6)$$

式中:  $K$  为土壤可蚀性因子 [ $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ ];  $w_s$  为砂粒 ( $2 \sim 0.05$  mm) 含量 (%);  $w_{silt}$  为粉粒 ( $0.05 \sim 0.002$  mm) 含量 (%);  $w_{clay}$  为黏粒 ( $< 0.002$  mm) 含量 (%);  $C_{org}$  为有机碳含量 (%).

坡度因子 ( $L$ ) 和坡长因子 ( $S$ ) 是 USLE 方程最重要的临界参数之一<sup>[24]</sup>, 作为在 DEM 基础上形成的基础地形因子, 其能够反映坡度与地表的关系。InVEST 模型会自动完成坡度、坡长因子的计算。

植被覆盖与作物管理因子 ( $C$ ) 反映植被或作物管理措施对土壤侵蚀量的影响, 计算公式如下:

$$C = \exp \left[ -\alpha \cdot \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad (7)$$

[ $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ ];  $L$  为坡度坡长因子 (无量纲);  $S$  为坡度因子 (无量纲);  $C$  为植被覆盖和作物管理因子 (无量纲);  $P$  为水土保持措施因子 (无量纲)。

降雨侵蚀力因子 ( $R$ ) 体现了降雨对土壤侵蚀的能力, 采用章文波提出的简易算法模型计算<sup>[25]</sup>:

$$R_j = \alpha P_j^\beta \quad (4)$$

式中:  $R_j$  为第  $j$  年的降雨侵蚀力 [ $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ];  $P_j$  为第  $j$  年的降雨量 (mm);  $\alpha, \beta$  为模型参数。

土壤可蚀性因子 ( $K$ ) 反映了土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度。计算公式如下:

$$K = (-0.013 \ 83 + 0.515 \ 75 K_{EPIC}) \times 0.131 \ 7 \quad (5)$$

式中:  $C$  为植被覆盖与作物管理因子 (无量纲); NDVI 为归一化植被指数;  $\alpha, \beta$  为模型参数。结果结合 InVEST 模型用户指南和前人经验<sup>[26-27]</sup> 进行修正。

水土保持措施因子 ( $P$ ) 主要参考前人经验<sup>[3, 27-28]</sup> 赋值, 并结合研究区实际情况进行校正。

(2) 模型校验。将模型输沙量与《中国河流泥沙公报》<sup>[29]</sup> 输沙模数对比, 验证模型结果可靠性。根据《中国河流泥沙公报》可知<sup>[29]</sup>, 松花江干流 (哈尔滨站) 多年平均输沙模数为  $14.6 t/km^2$ , 对比模型计算结果多年平均输沙模数为  $14.2 t/km^2$ , 误差控制在 3% 以内。由此可见, 土壤保持量得到较好模拟。

2.1.2 空间自相关 空间自相关分析方法可以表示事物或现象之间在空间上的依赖关系<sup>[30]</sup>。本文利用 GeoDa 软件计算哈尔滨市土壤保持量全局与局部空间自相关,进而分析其的空间聚集类型。

(1) 全局空间自相关。用于表示土壤保持量在总体研究空间内是否存在相互影响以及土壤保持量的相关程度。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中: $I$  为全局空间自相关指数; $n$  为区域个数; $x_i$  和  $x_j$  分别为样本  $i, j$  的指数值; $\bar{x}$  为样本指数平均值; $w_{ij}$  为空间关系权重矩阵。

$I$  取值范围位于  $[-1, 1]$  之间,如果  $0 < I \leq 1$ , 则表示研究区内土壤保持量整体趋于空间正相关;如果  $-1 \leq I < 0$ , 则表示土壤保持量呈整体趋于空间负相关;当其趋于或等于 0 时,则说明研究区土壤保持量不存在空间自相关。

(2) 局部空间自相关

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S_x^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (9)$$

式中: $I_i$  为局部空间自相关指数; $S_x^2$  为观测单元  $x_j$  的方差。

局部空间自相关将土壤保持量的空间格局分为 5 类,即高一高聚集、高一低聚集、低一高聚集、低一低聚集和不显著,其中,高一高和低一低为正相关类型,高一低和低一高为负相关类型。

## 2.2 土壤保持量驱动力分析

2.2.1 驱动因子选择 基于对土壤保持量有可能产生影响的相关因素以及研究区数据的可获取性,本研究从气候、植物、地形地貌、土地利用和土壤 5 方面共选择 8 个驱动因子进行分析(表 2),深入探究寒区省会城市土壤保持量空间异质性的驱动力。为防止影响因素之间存在共线性,影响地理探测结果,因此利用 SPSS 进行多重共线性检验,运用逐步回归方法将多余自变量删除,从而确定最终驱动因子。

2.2.2 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法<sup>[31]</sup>。本研究利用 R 语言 GD 包筛选出地理探测最优参数。

因子探测器主要计算因变量的空间异质性,评估研究区不同驱动因子对土壤保持量空间分异的解释能力,用  $q$  值表示,其取值范围为  $[0, 1]$ ,数值越大,解释能力越强,其计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\sigma_{SSW}}{\sigma_{SST}} \quad (10)$$

$$\sigma_{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \sigma_{SST} = N \sigma^2 \quad (11)$$

式中: $h=1, 2 \dots L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层(Strata),即分类或分区; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差; $\sigma_{SSW}$  为层内方差之和(within sum of squares); $\sigma_{SST}$  为全区总方差(total sum of squares)。

交互探测则主要评估两个不同驱动因子同时作用于同一空间事物时,对其空间异质性的交互解释力。

表 2 哈尔滨市土壤保持量空间分异的影响因素  
Table 2 Influencing factors of spatial differentiation of soil conservation in Harbin City

影响因素	驱动因子	编号
气候	降水量	$X_1$
	气温	$X_2$
	积雪指数(NDSI)	$X_3$
植物	植被指数(NDSI)	$X_4$
地形地貌	高程	$X_5$
	坡度	$X_6$
土地利用	土地利用类型	$X_7$
土壤	土壤类型	$X_8$

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤侵蚀量时空演变分析

3.1.1 土壤侵蚀量时空变化分析 时间上,2000, 2010 和 2020 年哈尔滨市土壤侵蚀量分别为  $2.62 \times 10^7$ ,  $2.68 \times 10^7$  和  $2.24 \times 10^7$  t, 呈现先增加后减少的趋势(图 2)。空间上,土壤侵蚀量整体分布格局基本保持一致,且 2020 年的高侵蚀区域相较于 2000 和 2010 年明显减少。高值区多分布于东南部的尚志市。2010—2020 年土壤侵蚀量的显著减少可能与当地退耕还林政策有关。虽然近年哈尔滨市的土壤侵蚀面积有所减少,但是仍然需要对侵蚀量较高的区域实施合理有效的水土保持政策。

3.1.2 土壤侵蚀强度等级统计分析 根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》(SL 446—2009)<sup>[32]</sup> 中对土壤侵蚀强度等级的划分,得到哈尔滨市的各等级土壤侵蚀强度面积及其占比(图 3)。哈尔滨市不同等级的土壤侵蚀占比差异较大,其中微度和轻度侵蚀的土壤面积占比在 3 个年份中均远高于其他等级,2000,2010 和 2020 年二者面积之和占全市总面积的 90% 以上。微度侵蚀的面积逐年增多,由 2000 年的  $29\,571.93 \text{ km}^2$  增加至 2020 年的  $32\,149.52 \text{ km}^2$ , 而

轻度侵蚀面积比例则呈现下降趋势,由 2000 年的 34.59% 下降至 2020 年的 31.65%。这说明哈尔滨市水土保持状况整体呈现良性发展,水土流失的现象有

所改善。为保持哈尔滨市水土状况的良好发展,应着重关注高侵蚀区域,将强度、极强度和剧烈侵蚀地区作为水土流失的重点治理区域。

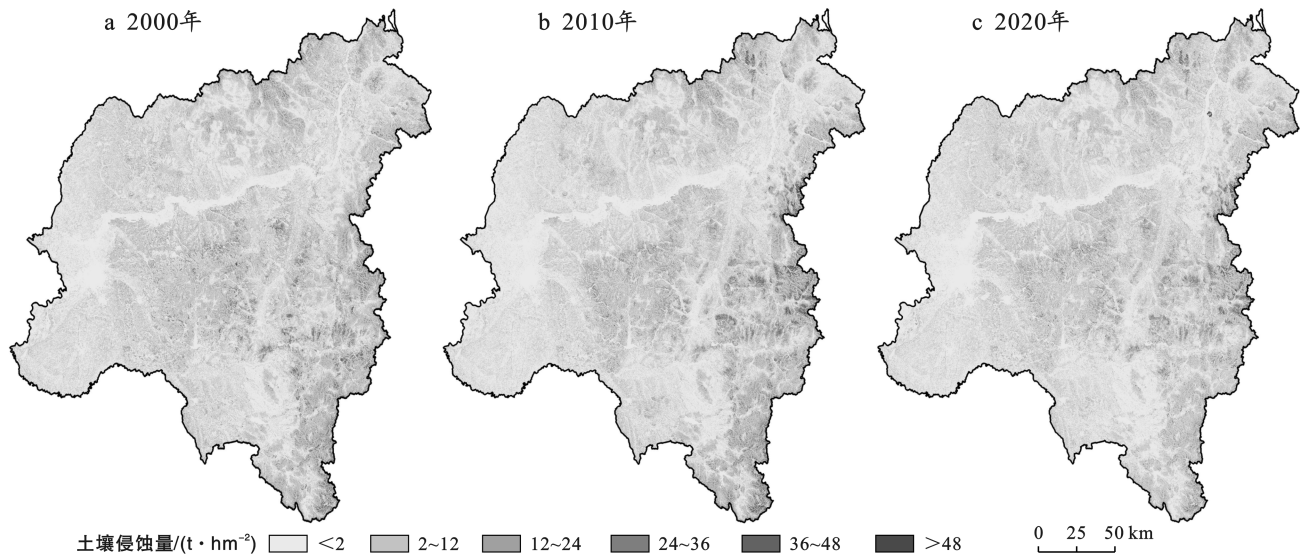


图 2 哈尔滨市不同年份土壤侵蚀量的空间分布格局

Fig.2 Spatial distribution pattern of soil erosion in different years in Harbin City

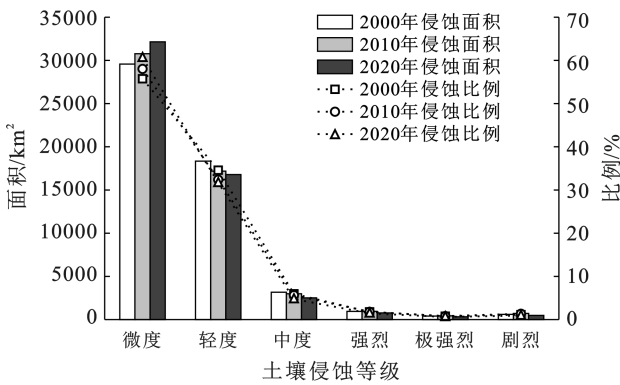


图 3 哈尔滨市不同年份土壤侵蚀等级

Fig.3 Soil erosion grades in different years in Harbin City

### 3.2 土壤保持量的时空演变分析

3.2.1 土壤保持量的时空变化分析 哈尔滨市 2000, 2010 和 2020 年土壤保持量的空间变化见图 4。土壤保持总量分别为  $2.18 \times 10^9$ ,  $2.07 \times 10^9$  和  $2.77 \times 10^9$  t, 整体呈现先减少后增加的趋势。2010 年相较于 2000 年土壤保持量降低了 5.13%, 而 2020 年相较于 2010 年则增加了 33.83%, 土壤保持水平显著提高。从空间分布上看, 哈尔滨市 2000, 2010 和 2020 年土壤保持强度分布较为一致, 整体呈现“东高西低”的空间分布格局, 西部市区土壤保持强度明显低于位于中部和东南部的张广才岭生态屏障区以及北部的小兴安岭生态屏障区。自然生态系统的土壤保持状况显著优于人为干扰程度较大的城市生态系统。

为 0.854, 0.853, 0.850, 此时  $p = 0.001$ , 通过显著性检验, 说明哈尔滨市土壤保持量空间格局的分布存在强烈的正向空间关联性。

局部空间自相关情况见图 5。哈尔滨市土壤保持量以低—低聚集和高—高聚集类型为主, 低—低聚集主要集中在城市西部, 松花江区域呈连续线状分布, 聚集程度较为明显, 2000 年占全市面积的 28.32%, 2020 年则下降至 27.47%, 表明哈尔滨市土壤保持量整体低值区在减少; 高—高聚集则分布在城市北部和东部, 以小兴安岭生态屏障区和张广才岭生态屏障区最为明显, 呈连片分布, 由 2000 年占全市总面积的 11.03% 上升至 2020 年的 11.92%; 低—高聚集占比较小, 且无明显集中分布; 哈尔滨市无高—低聚集类型。

3.2.2 不同土地利用类型的土壤保持强度比较 从不同土地利用类型来看(图 6), 除未利用地外, 2000, 2010 和 2020 年不同土地利用类型的土壤保持强度整体均呈现先降低后增加的趋势。林地的土壤保持强度最高, 平均土壤保持强度为  $929.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 而未利用地最低, 平均土壤保持强度仅有  $0.37 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 土壤保持能力较弱。2000—2020 年各土地利用类型平均土壤保持强度从大到小依次为林地 [ $929.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 草地 [ $511.74 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 耕地 [ $132.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 建设用地 [ $78.49 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 水体 [ $42.08 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 湿地 [ $41.65 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] > 未利用地 [ $0.37 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]。

2000, 2010 和 2020 年全球 Moran's I 指数分别

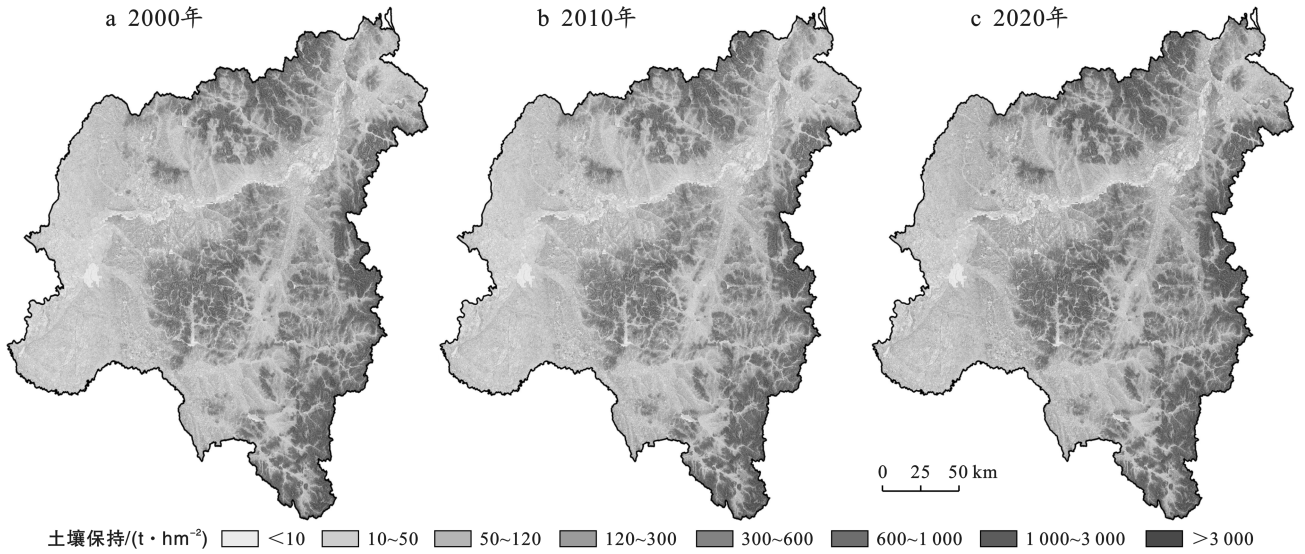


图 4 哈尔滨市不同年份土壤保持量的空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of soil conservation in different years in Harbin City

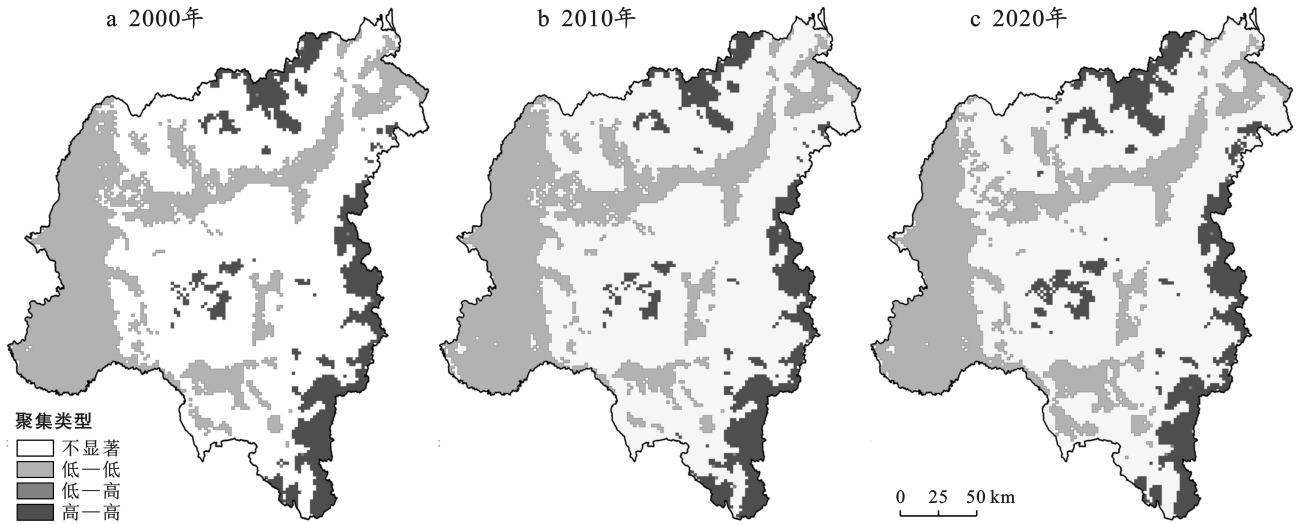


图 5 哈尔滨市土壤保持量空间分异特征

Fig.5 Spatial differentiation of soil conservation in Harbin City

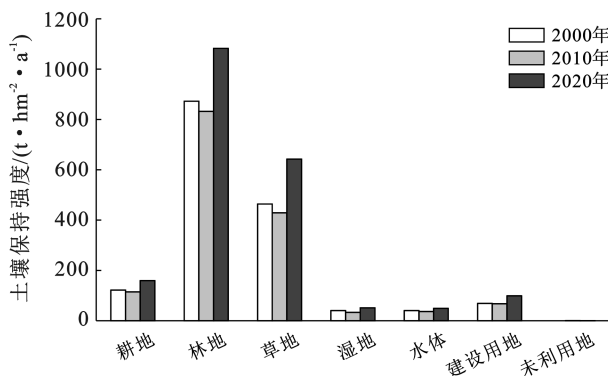


图 6 哈尔滨市不同年份各土地利用类型的土壤保持强度

Fig.6 Soil conservation intensity of various land use types in different years in Harbin City

3.2.3 不同区县的土壤保持强度比较 从各区县来看(图 7),除五常市呈现增长趋势外,2000,2010 和 2020 年各区县的土壤保持强度整体均呈现先降低后增加的趋势。尚志市土壤保持强度远高于其他区县,平均土壤保持强度为  $802.30 t/(hm^2 \cdot a)$ 。其次为通河县,平均土壤保持强度为  $636.49 t/(hm^2 \cdot a)$ 。该地区地处张广才岭生态屏障区和小兴安岭生态屏障区,土地利用类型以林地为主。而木兰县、市区和巴彦县土壤保持强度较低,分别为  $282.09, 157.03, 130.57 t/(hm^2 \cdot a)$ ,其土地利用类型以耕地为主,土壤保持能力较低。

### 3.3 土壤保持量驱动力探测分析

3.3.1 因子探测分析 8 个驱动因子都通过了多重

共线性检验,采用参数最优地理探测器的因子探测识别单因子对哈尔滨市土壤保持量空间异质性的解释力(图 8),单因子探测  $q$  值均小于 0.001,其中高程、降水量和坡度对土壤保持量空间异质性解释力最强,2000,2010 和 2020 年平均解释力为 0.225 9,0.198 9,0.180 4,最低的因子为积雪指数(NDSI),平均解释力仅有 0.044 6,对土壤保持量空间格局的解释力极为有限。各驱动因子按  $q$  值大小降序排列为:高程>降水量>坡度>气温>INDV>土壤类型>土地利用类型>NDSI。

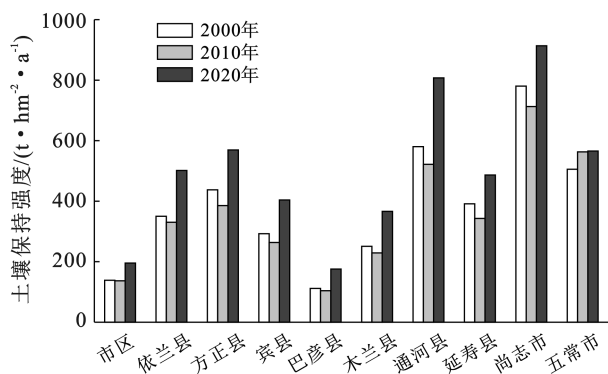


图 7 哈尔滨市不同年份各区县土壤保持强度

Fig.7 Soil retention intensity of various districts and counties in different years in Harbin City

3.3.2 交互探测分析 土壤保持量的空间格局实际是由多种驱动因子之间复杂的相互作用而共同形成

的。从交互作用探测结果来看(图 9),研究区域内驱动因子交互作用的解释力明显高于单个因子对土壤保持量空间分布格局异质性的解释力。

作为影响土壤保持量空间异质性的主导因素,坡度和降水量与其他因子的交互作用,是研究区最重要的交互影响因素。2000 年降水量和坡度的交互作用解释力最强,为 0.31。2010 和 2020 年坡度和气温的交互作用解释力最强,分别为 0.31,0.32。二者的交互作用在极大程度上影响了土壤保持量的空间格局形成;而土地利用类型与 NDSI 交互作用的解释力最弱,仅有 0.13 左右。

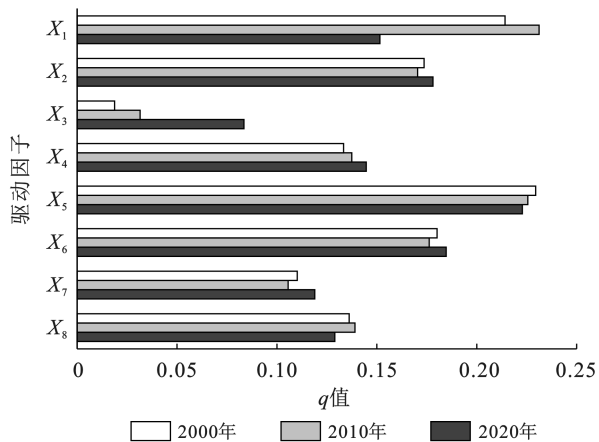


图 8 哈尔滨市单因子对土壤保持量空间异质性的解释力 ( $q$ )

Fig.8 Explanatory power ( $q$ ) of single factor on spatial heterogeneity of soil retention in Harbin City

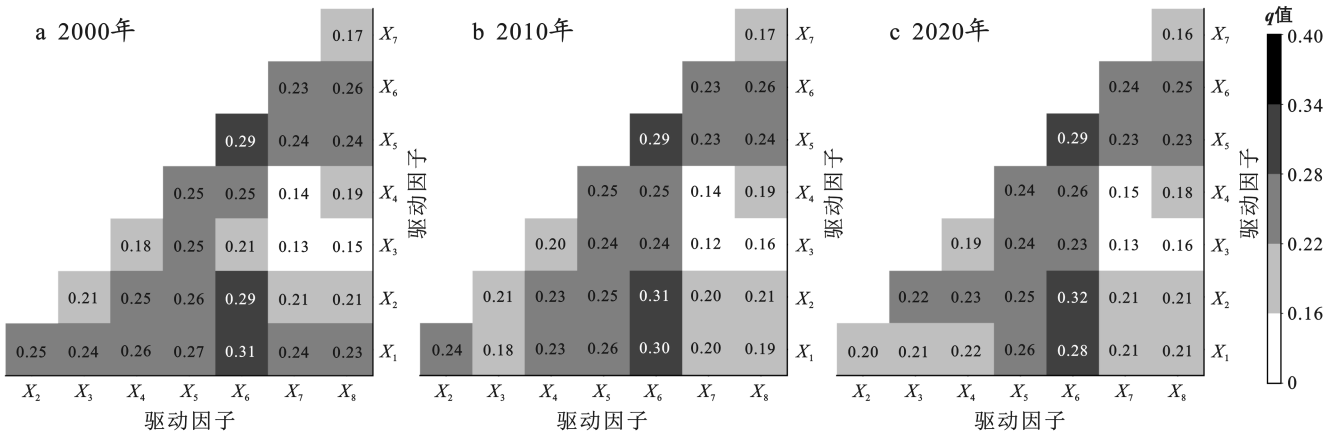


图 9 不同年份哈尔滨市土壤保持量驱动因子的交互作用探测结果

Fig.9 Interaction detection results of soil conservation driving factors in Harbin City in different years

## 4 讨论

### 4.1 基于 InVEST 模型的土壤保持量时空演变分析

本研究利用 InVEST 模型 SDR 模块量化了哈尔滨市土壤保持服务。结果表明,2000—2020 年哈尔滨市土壤侵蚀量呈现先增加后减少的趋势;土壤保持

量呈现先减少后增加的趋势,整体呈现“西低东高”的空间分布格局;林地的土壤保持强度最高,其次是草地和耕地,未利用地最低。这与前人的结果研究一致<sup>[28,33]</sup>。总体来说,林地由于植被覆盖度较高,地形起伏度较大,人为活动干扰最少,因此土壤保持量最高;耕地人为干扰较多、植被覆盖较低,且大面积位于

地势平坦的平原地区,因此土壤保持能力较低;未利用地地表裸露度较高,对降水的截留能力较弱,地表径流较大,因此土壤保持能力最低。

哈尔滨市土壤保持量的空间分布格局可以为规划重点水土保持功能区提供科学依据。例如,位于城市西部以耕地为主要土地利用类型的木兰县、市区和巴彦县处于土壤保持低值区,可以作为水土保持的重点关注区域,开展综合防治水土流失的工程,采取农业耕作措施、林草措施与工程措施相结合的方法,保护稀有黑土资源;在松花江沿岸开展湿地开发保护与治理工程,注重湿地的稀有价值,重点保护湿地生态系统;在小兴安岭生态屏障区和张广才岭生态屏障区等土壤保持量高值区,应维持现状良好的生态环境,在对城市进行整体规划时以保护为主。

#### 4.2 基于地理探测器的土壤保持量驱动力研究

作为一种常用的探究空间异质性的统计方法,数据离散化的分类方法是地理探测最重要的环节之一。国内常规方法主要根据研究人员主观判断进行分类,分类具有不确定性,很大程度上会影响探测结果。本文则通过 R 语言 GD 包,筛选出地理探测的最优参数,该方法增强了结果的科学性和可信度。

根据探测结果可知,高程、降水量和坡度是对哈尔滨市土壤保持量空间异质性解释力较高的驱动因子,与前人研究结果相似<sup>[14]</sup>,而土地利用类型解释力较低,这与前人研究结果相悖<sup>[16,34]</sup>,其主要原因在于,东北黑土区水土流失的原因错综复杂,既与降雨强度、土壤类型和地形地貌等自然因素有关,又与人为耕垦等社会因素有关<sup>[35,36-37]</sup>。东北黑土区农业开垦对土壤侵蚀产生的影响主要有两点:①降低了黑土区生态系统对降雨、径流、风等自然侵蚀营力的抵抗力;②增加了自然侵蚀营力的有效性<sup>[38]</sup>。因此虽然东北黑土区水土流失的主要原因之一为农耕导致的土地利用类型的改变,但在进行地理探测时,其直接表现在对降雨等自然因素的抵抗力上,而不是简单地依据耕地、林地、草地等土地利用类型不同而发生变化。加之复杂的地形地貌和多样的土壤类型等因素的综合作用,使得仅有 7 类的土地利用类型在驱动因子中排名较为靠后。

#### 4.3 政策与建议

哈尔滨市土壤保持服务水平的上升,与当地政策密不可分。近年来,黑龙江省在水土流失预防与治理方面出台了各项法规与政策,积极开展水土治理工作,颁布《黑龙江省水土保持条例》,划定水土流失重点预防区和重点治理区,建立健全水土保持监测网络,对全省水土流失进行动态监测。“十三五”期间,

全省共治理水土流失面积  $2.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,水土流失面积和强度呈现出“双下降”的良好态势。根据《黑龙江省水土保持公报》,2020 年哈尔滨市水土流失治理面积为  $586.42 \text{ km}^2$ ,治理任务完成率为 104.14%,水土保持状况呈现良好发展趋势,这与本文研究结果一致。同时,本研究也可以为相关政策提供一定的科学依据。例如划定城市西部和松花江沿岸为水土保持重点治理区,并对西部大面积的耕地实施修建梯田,坡面水系整治,蓄水保土耕作等措施,在保证粮食生产的基础上,严格防治和监测水土流失状况。

2000—2020 年黑龙江省积极推行“退耕还林”政策,其有利于提升土壤保持水平,很大程度上减少了水土流失面积,但随着近年来“三区三线”的划定,加之可退耕空间不足等问题的出现,目前国家已暂缓安排新增退耕还林还草任务,进而严格保护基本农田,出现“退林还耕”的现象。因此,如何协调推进“退耕还林”和“退林还耕”政策,同时对城市水土流失进行合理有效地治理和预防,成为未来需要重点思考的问题。

## 5 结论

本研究基于 InVEST 模型 SDR 模块,对哈尔滨市 2000—2020 年的土壤侵蚀量和土壤保持量进行评估,借助空间自相关分析了土壤保持量的空间相关性,利用参数最优地理探测器揭示了土壤保持量空间异质性的驱动力。

(1) 2000,2010 和 2020 年哈尔滨市土壤侵蚀量分别为  $2.62 \times 10^7$ ,  $2.68 \times 10^7$  和  $2.24 \times 10^7 \text{ t}$ ,呈现先增加后减少的趋势。而土壤保持量分别为  $2.18 \times 10^9$ ,  $2.07 \times 10^9$  和  $2.77 \times 10^9 \text{ t}$ ,呈现先减少后增加的趋势,整体呈现“西低东高”的空间分布格局。林地的土壤保持强度最高,平均值为  $929.04 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,其次为草地 [ $511.74 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ],耕地强度较低 [ $132.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ],未利用地最低,仅有  $0.37 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 哈尔滨市土壤保持量呈现强烈的空间正相关,以低—低聚集和高—高聚集类型为主。低—低聚集主要集中在城市西部及松花江沿岸,2000 年占全市面积的 28.32%,2020 年则下降至 27.47%;高—高聚集则分布在城市北部和东部,2000 年占全市总面积的 11.03%,2020 年上升至 11.92%。

(3) 土壤保持空间格局的形成是多种复杂因素共同作用的结果,不同驱动因子对哈尔滨市土壤保持量空间异质性的解释能力存在明显差异,同一驱动因子在不同研究区的解释力也具有较大差异。高程、降

水量和坡度对哈尔滨市土壤保持量空间异质性解释力最强,平均解释力分别为 0.225 9,0.198 9,0.180 4, NDSI 平均解释力最低,仅有 0.044 6。坡度和降水量与其他因子的相互作用,是研究区重要的交互驱动因子。

本研究以 2000,2010,2020 年 3 个不同时期为例,以 10 a 作为时间跨度,探究哈尔滨市 2000—2020 年土壤侵蚀和土壤保持量的变化趋势。由于时间跨度较大,因此连续年份之间的细微变化无法分析,在后续研究中,会尽可能缩小时间跨度,充分分析连续年份的土壤保持量演变规律。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 史志华,蔡崇法,丁树文,等.基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究[J].农业工程学报,2002,18(4):172-175.  
Shi Zhihua, Cai Chongfa, Ding Shuwen, et al. Soil conservation planning at small watershed level using GIS-based revised universal soil loss equation(RUSLE) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(4):172-175.
- [2] Xiao Qiang, Hu Dan, Xiao Yang. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges reservoir region of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,163:S172-S180.
- [3] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):188-197.  
Yan Lingling, Gong Jie, Xu Caixian, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil conservation service in Ziwuling area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):188-197.
- [4] 余恩旭,张明芳,蒋志魏,等.岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-10.  
Yu Enxu, Zhang Mingfang, Jiang Zhiwei, et al. Spatiotemporal dynamics of soil erosion and associated influencing factors in the Upper Minjiang River watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):1-10.
- [5] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.  
Liu Yue, Zhao Wenwu, Jia Lizhi. Soil conservation service: concept, assessment, and outlook [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(2):432-440.
- [6] 朱捷缘,卢慧婷,郑天晨,等.南水北调中线工程水源区水土保持治理成效[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):310-320.  
Zhu Jieyuan, Lu Huiting, Zheng Tianchen, et al. Effectiveness of soil and water conservation in the water
- source area of middle route of south-north water diversion project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(2):310-320.
- [7] 韩晶,崔金芳,杨威,等.基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):32-39.  
Han Jing, Cui Jinfang, Yang Wei, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):32-39.
- [8] 刘晓娜,裴夏,陈龙,等.基于 InVEST 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究[J].水土保持研究,2018,25(6):168-176.  
Liu Xiaona, Pei Sha, Chen Long, et al. Study on soil conservation service of ecosystem based on InVEST model in Mentougou District of Beijing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(6):168-176.
- [9] Bai Yang, Ochuodho T O, Yang Jian. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. Ecological Indicators, 2019,102:51-64.
- [10] Yohannes H, Soromessa T, Argaw M, et al. Spatiotemporal changes in ecosystem service bundles and hotspots in Beressa watershed of the Ethiopian Highlands: Implications for landscape management [J]. Environmental Challenges, 2021(5):100324.
- [11] Yohannes H, Soromessa T, Argaw M, et al. Impact of landscape pattern changes on hydrological ecosystem services in the Beressa watershed of the Blue Nile Basin in Ethiopia [J]. Science of the Total Environment, 2021,793:148559.
- [12] Xue Chenli, Chen Xinghua, Xue Lirong, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China [J]. Science of the Total Environment, 2023,855:158834.
- [13] Wang Yahui, Dai Erfu. Spatial-temporal changes in ecosystem services and the trade-off relationship in mountain regions: A case study of Hengduan Mountain region in Southwest China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264:121573.
- [14] 廖雯,胡砚霞,于兴修,等.丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素[J].水土保持通报,2021,41(6):288-294.  
Liao Wen, Hu Yanxia, Yu Xingxiu, et al. Spatiotemporal variation and influence factors of soil conservation function in Danjiangkou Reservoir area during 2010—

- 2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(6):288-294.
- [15] 邵志豪, 牟风云, 黄洪, 等. 重庆市土壤保持服务空间分布及影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2023,23(1):100-108.
- Shao Zhihao, Mou Fengyun, Huang Qi, et al. Spatial distribution and influencing factors analysis of soil conservation services in Chongqing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023,23(1):100-108.
- [16] 张薇, 王凤春, 万虹麟, 等. 基于 InVEST 模型的土壤保持服务时空变化及其影响因素分析: 以密云水库上游流域河北张承地区为例[J]. *地球物理学进展*, 2022,37(6):2339-2350.
- Zhang Wei, Wang Fengchun, Wan Honglin, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil conservation service based on InVEST model: A case study of Miyun Reservoir upstream basin of Zhangcheng area in Hebei [J]. *Progress in Geophysics*, 2022,37(6):2339-2350.
- [17] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. *地理科学*, 2006,26(6):687-692.
- Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, Shen Yan, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006,26(6):687-692.
- [18] Fang Haiyan, Sun Liying. Modelling soil erosion and its response to the soil conservation measures in the black soil catchment, Northeastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017,165:23-33.
- [19] 谢云, 高燕, 顾治家, 等. 东北黑土区坡耕地水土流失危险程度评价[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020,18(6):105-114.
- Xie Yun, Gao Yan, Gu Zhijia, et al. Potential hazard assessment of slope farmland soil erosion in black soil region of Northeastern China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(6):105-114.
- [20] 贾洪雷, 马成林, 李慧珍, 等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. *农业机械学报*, 2010,41(10):28-34.
- Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(10):28-34.
- [21] Bai Yujing, Guo Rong. The construction of green infrastructure network in the perspectives of ecosystem services and ecological sensitivity: The case of Harbin, China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021,27:e01534.
- [22] 丛东来, 于少鹏, 陈曦, 等. 哈尔滨市水资源开发利用与城镇化发展的响应关系[J]. *水土保持通报*, 2020,40(1):269-275.
- Cong Donglai, Yu Shaopeng, Chen Xi, et al. Response relationship between water resources utilization and urbanization in Harbin City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(1):269-275.
- [23] 龚文峰, 蔡体久, 范文义. 松花江流域哈尔滨城区段土壤侵蚀时空格局及动态变化研究[J]. *水土保持通报*, 2009,29(5):56-60.
- Gong Wenfeng, Cai Tiju, Fan Wenyi. Spatiotemporal pattern and dynamic changes of soil erosion in Harbin region of Songhuajiang watershed [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009,29(5):56-60.
- [24] 何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(2):426-439.
- He Shasha, Zhu Wenbo, Cui Yaoping, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe watershed in Taihang Mountains based on the InVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019,28(2):426-439.
- [25] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003,25(1):35-41.
- Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resources Science*, 2003,25(1):35-41.
- [26] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. *水土保持通报*, 1992,12(4):1-9.
- Zhang Xiankui, Xu Jinghua, Lu Xiuqin, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992,12(4):1-9, 18.
- [27] 盛美玲, 方海燕, 孙亚茹, 等. 东北黑土区小流域侵蚀产沙影响因素分析[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015,43(1):86-92.
- Sheng Meiling, Fang Haiyan, Sun Yaru, et al. Analysis of factors affecting soil erosion and sediment yield at catchments in the black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2015,43(01):86-92.
- [28] 刘孟竹, 张红娟, 任贺宇, 等. 退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J]. *水土保持研究*, 2021,28(5):172-178.
- Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Ren Heyu, et al. Spatiotemporal variations of the soil conservation in the agro-pastoral ecotone of Northern China under grain for green program [J]. *Research of Soil and Water*

- Conservation, 2021,28(5):172-178.
- [29] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2020[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China [M]. China River Sediment Bulletin 2020. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [30] 朱增云,阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟[J].生态与农村环境学报,2019,35(12):1531-1540.  
Zhu Zengyun, Alimujiang K. Analysis and simulation of the spatial autocorrelation pattern in the ecosystem service value of the Oasis Cities [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(12):1531-1540.
- [31] 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 Jingfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [32] 中华人民共和国水利部. 黑土区水土流失综合防治技术标准:SL 446-2009[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Techniques standard for comprehensive control of soil erosion in the black soil region: SL 446-2009 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [33] 罗诚康,杜思敏,郑博福,等.赣南地区土壤保持功能的时空变化特征[J].水土保持通报,2022,42(3):57-65.  
Luo Chengkang, Du Simin, Zheng Bofu, et al. Temporal and spatial change characteristics of soil conservation function in Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):57-65.
- [34] 王鹭,高建恩,龙韶博,等.延河流域典型治理阶段的土壤保持功能时空变化及驱动因素分析[J].水土保持研究,2023,30(3):94-102.  
Wang Lu, Gao Jian'en, Long Shaobo, et al. Temporal and spatial variation of soil conservation function and its driving factors in typical reclamation stage in Yanhe River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):94-102.
- [35] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境 [J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.  
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Wang Hongshan. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(2):66-70.
- [36] 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.  
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.
- [37] 王世豪,徐新良,曹巍.2000—2020 年东北黑土地土壤侵蚀时空演化特征[J].资源科学, 2023,45(5):951-965.  
Wang Shihao, Xu Xinliang, Cao Wei. Spatial and temporal changes of erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2020 [J]. Resources Science, 2023,45(5):951-965.
- [38] 李发鹏,李景玉,徐宗学.东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J].水土保持研究,2006,13(3):50-54.  
Li Fapeng, Li Jingyu, Xu Zongxue. The status quo of black soil degradation and water and soil loss in Northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006,13(3):50-54.