

吉林省水土流失与社会经济空间自相关性特征及影响因素

翟宇坤¹, 李永宏¹, 沈海鸥², 车晓翠²

(1.内蒙古大学 生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2.吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

摘要: [目的] 研究吉林省水土流失与社会经济空间自相关性特征及其影响因素, 为该省水土保持与绿色协调发展提供科学依据。[方法] 基于吉林省各县市水土流失面积, 结合相应年份社会、经济统计资料, 采用 GIS, GeoDa 与 OLS 等技术与方法, 对吉林省 2017—2021 年水土流失与社会经济空间自相关性进行系统研究, 并辨识了关键影响因素。[结果] ① 吉林省水土流失的 Moran's I 指数均为正数且最小值为 0.254 6, 水土流失在部分地区存在一定的集聚效应, 高一集聚区主要集中于吉林省西北地区, 低一集聚区主要分布在南部地区。② 吉林省社会经济指标中, 城市化率、建设用地比例、植被覆盖面积以及农业经济增长率的 Moran's I 值相对较高, 在空间上存在一定集聚特征。③ 水土流失与社会经济局部双变量空间自相关性中, 城市化率和林地面积的 Moran's I 值较大, 社会类型数据较人口类型数据和经济类型数据空间分布更集中。④ 农业 GDP、农业用地比例、植被覆盖比例和水土流失的相关性较高, 5 a 平均 Robust_Pr 值分别为 0.038, 0.003 和 0.154。[结论] 吉林省水土流失、社会经济及水土流失与社会经济双变量在空间上均具有较强自相关性, 城市化率和植被覆盖面积是引起水土流失的关键影响因素。

关键词: 空间自相关性; 社会经济; 水土流失; 影响因素; 吉林省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0144-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 翟宇坤, 李永宏, 沈海鸥, 等. 吉林省水土流失与社会经济空间自相关性特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 144-151. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.016; Zhai Yukun, Li Yonghong, Shen Haiou, et al. Spatial autocorrelation patterns and influencing factors of soil and water loss and socio-economic development in Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 144-151.

Spatial Autocorrelation Patterns and Influencing Factors of Soil and Water Loss and Socio-economic Development in Jilin Province

Zhai Yukun¹, Li Yonghong¹, Shen Haiou², Che Xiaocui²

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010021, China; 2. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] The spatial autocorrelation patterns and influencing factors of soil and water loss and socio-economic development in Jilin Province were analyzed to provide a scientific basis for soil and water conservation and the green coordinated development in Jilin Province. [Methods] The analysis was based on the area of soil and water loss in various counties and cities in Jilin Province, combined with the social and economic statistics in the corresponding period. Tools including geographic information system (GIS), GeoDa, and ordinary least squares (OLS) linear regression models were used to analyze the spatial autocorrelation patterns of soil and water loss and socio-economic development and to identify the key influencing factors in Jilin Province from 2017 to 2021. [Results] ① The index of Moran's I of soil and water loss in Jilin Province was positive with a minimum value of 0.254 6. Soil and water loss had an

收稿日期: 2024-06-20

修回日期: 2024-07-21

资助项目: 吉林省自然科学基金(优秀青年项目)“黑土区坡耕地浅沟侵蚀过程研究”(20240101024JJ); 吉林省“黑土粮仓”科技会战“揭榜挂帅”重点项目“吉林省黑土地秸秆覆盖还田措施的防蚀机理研究”(JJKH20240457HT)

第一作者: 翟宇坤(2001—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土流失遥感监测。Email: 2321324247@qq.com。

通信作者: 车晓翠(1979—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持效益评价相关方面的研究。Email: xiaocui@jlau.edu.cn。

agglomeration effect in certain areas. The high-high agglomeration areas were primarily concentrated in the northwest of Jilin Province, and the low-low agglomeration areas were primarily concentrated in the southern region. ② The values of Moran's I of urbanization rate, proportion of construction land, vegetation coverage area, and agricultural economic growth rate from the socio-economic indicators system of Jilin Province were relatively higher, and there were certain agglomeration characteristics in spatial. ③ The spatial autocorrelation analysis of soil and water loss and socio-economic reflected that Moran's I values of "urbanization rate" and "forest area" were relatively large, and the spatial distribution of social type data was more concentrated compared to population and economic type data. ④ A high correlation was observed between the agricultural GDP, agricultural land use ratio, vegetation coverage ratio, and soil and water loss. The five-year average results of the correlation were 0.038, 0.003, and 0.154, respectively. [Conclusion] The soil and water loss, socio-economic development, and the double variables of soil and water loss and socio-economic development in Jilin Province have strong autocorrelation in space, respectively. Urbanization rate and vegetation coverage area were determined to have the most significant impact on soil and water loss among all the influencing factors.

Keywords: autocorrelation patterns; socio-economic development; soil and water loss; influencing factors; Jilin Province

水土流失受气候、地貌、植被、土壤等自然因素和人类活动的影响^[1]。其中人类活动是最活跃的影响因素之一,土地利用结构的变化、经济发展、城镇化等都会加速水土流失^[2-4]。近年来,针对人类活动对水土流失的影响成为相关学者关注的热点问题,该研究能为区域生态环境保护与经济绿色高效可持续发展提供技术依据。研究尺度多以流域为对象,研究区域主要集中在黄河流域^[5-7]、长江流域^[8]及南方红壤区^[9],研究方法主要根据流域内相关时间序列水文气象数据,采用累积距平法、累积量斜率变化率法、Mann-Kendall 检验和有序聚类方法、弹性系数法和水文模拟法等定量评估人类活动对流域径流量的影响^[10-14]。已有研究成果缺乏对东北黑土区,特别是省域尺度的研究,运用 GIS,GeoDa 与 OLS 等技术与方法研究水土流失与社会经济相关性的成果也鲜有报道。

吉林省位于东北黑土区中部,是水土流失较为严重的省份之一^[15]。吉林省侵蚀类型主要以风力侵蚀和水力侵蚀为主,严重的水土流失造成土壤肥力下降,耕地面积减少,土地生产潜力下降,黑土资源严重损失^[16],水土流失已成为吉林省的主要环境问题,影响区域经济可持续发展。目前,已有学者从不同角度针对吉林省水土流失问题及防治做了研究。李志伟等^[17]基于 GIS 技术对吉林省水土流失生态敏感性进行了分区;赵峰等^[18]采用 GIS 技术,应用 TM 遥感影像提取土地利用和土壤侵蚀的相关信息,采用叠加分析法研究了吉林省中部不同土地利用状况的土壤侵蚀规律;刘会青等^[19]以 TM 数字影像为信息基础,对水土流失状况进行遥感调查,揭示了吉林省不同类型水土流失特点及空间分布特征;贯宏伟等^[20]分析了吉林省水土流失现状并提出了防治措施;刘艳军^[21]等在

现有技术和相关标准下提出吉林省各类型侵蚀沟汇水区域、沟头、沟岸、沟坡和沟底治理措施的配置体系。

已有研究对进一步分析吉林省水土流失特征及其与人类活动相关性具有重要指导意义,但关于社会经济发展、土地利用、城镇化发展等对水土流失影响的研究成果较少,且缺乏水土流失与社会经济空间自相关性研究。研究方法上主要采用 GIS 传统分析方法表达静态水土流失空间特征,对变量间的多重相关问题研究较少。GIS 方法可以精确定位和测量水土流失的空间分布^[22],实现水土流失面积数据与社会经济指标进行空间叠加分析。GeoDa 软件可以识别和量化水土流失空间上的自相关性以及各社会经济因子对水土流失空间集聚分布的影响^[23],从而揭示潜在的空间集聚模式和影响机制。普通最小二乘法回归模型(OLS)可以解决多自变量的回归问题^[24],可用于解释水土流失与各社会经济指标之间的线性关系。鉴于此,本文综合运用 GIS,GeoDa 与 OLS 等技术与方法,以吉林省各县市水土流失总面积为因变量指标,结合人口与社会经济发展相关指标,可实现对吉林省水土流失与社会经济指标空间自相关性特征及其影响因素进行多维度分析,可为吉林省水土保持与绿色协调发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林省地处东经 122°—131°,北纬 41°—46°之间,位于中纬度欧亚大陆东侧,属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,气温、降水、温度具有明显的季节变化和地域差异。多年平均气温 5.1~6.1℃,多年平均降雨量 400~600 mm,多年平均日照时数为

2 259~3 016 h。下辖 9 个地市(州),面积约 $1.87 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占全国国土面积的 2%。2021 年,吉林省总人口为 2 375.37 万人,城市化率为 63.36%,GDP 总量为 13 235.52 亿元,农业 GDP 总量为 1 604.18 亿元,占 GDP 总量的 12.12%,三次产业结构为 12.1:26.7:61.2。水土流失面积 $40 529.24 \text{ km}^2$,占全省总面积 21.30%,占全国水土流失总面积的 1.5%,位列全国第 12 位,属于水土流失较为严重的省份。其中,水蚀面积为 $28 794.29 \text{ km}^2$,占全省水土流失总面积的 71.05%,风蚀面积为 $11 734.95 \text{ km}^2$,占全省水土流失总面积的 28.95%。吉林省水土流失的分布根据地形地貌的变化呈规律性分布。水蚀区主要集中在该省的中东部地区,风蚀区主要集中在西

部平原区,风蚀强度自西南向东北部逐渐减弱。

1.2 数据来源

本研究数据包括两个部分:水土流失数据和社会经济数据。

1.2.1 水土流失数据 查阅吉林省水土保持公报(2017—2021 年),获取各县市的水土流失面积,时间步长为 1 a。对水土流失数据进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验,结果显示数据未能显著拒绝正态分布假设($p > 0.05$)。因此,在进行后续分析时,假定数据符合正态分布。

1.2.2 社会经济数据 收集《吉林统计年鉴(2018—2022 年)》相关数据,计算吉林省各区县的具体社会经济指标。各指标及其含义详见表 1。

表 1 社会经济数据及其指标含义

Table 1 Socio-economic data and its indicator meanings

类型	指标	指标含义
人口	人口数量	各区县人口数量
	人口密度	单位国土面积年末总人口数量
经济	第一产业增长率	第一产业增加值与上个清算周期总值之间的比值
	第二产业增长率	第二产业增加值与上个清算周期总值之间的比值
	第三产业增长率	第三产业增加值与上个清算周期总值之间的比值
	GDP	地区单位在一定时期内生产活动的最终成果
	GDP 密度	地区生产总值与产生这些 GDP 的土地面积之比
社会	GDP 增长率	本期 GDP 与上一个周期 GDP 的比较
	农业经济增长率	本期农业总产值与上一个周期的比较
	建设用地面积比例	地区建设用地面积占地区总面积的百分比
	农业用地面积比例	地区农业用地面积占地区总面积的百分比
	植被覆盖面积比例	地区植被覆盖面积占地区总面积的百分比
	城市化率	城镇人口占总人口的比重

注:对社会经济指标进行了 Shapiro-Wilk 正态性检验,结果显示数据未能显著拒绝正态分布假设($p > 0.05$)。

1.3 研究方法

1.3.1 全局空间自相关分析 自相关是指一些变量在同一个分布区的观测数据之间潜在的相互依赖性^[25]。基于 Moran's I 指数的全局空间自相关计算公式:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

式中: z_i, z_j 为要素 x_i 与要素 x_j 均值的差; w_{ij} 为空间权重; n 为要素数量,通过计算将得到取值区间为 $[-1, 1]$ 的统计量 I , I 值越大即表示空间聚集越明显;相反, I 值越小,则表示空间离散程度越高^[26]。

1.3.2 局部空间自相关分析 通过对局部数据的空间自相关统计量进行分析得到局部的空间分布特征。基于局部莫兰(local Moran's I)指数的局部空间自相关分析计算公式:

$$I_i = \frac{Z_i \sum_{j \neq i}^n \omega_{ij} Z_j}{S^2} \quad (2)$$

式中: Z_i 为标准差的倍数,用于检验空间自相关性, S 是所有空间权重的聚合。下同。

局部空间自相关在全局空间自相关基础上解释了空间数据具体的空间位置分布和聚集的显著程度,且通过 Z 指数检验可以对结论进行验证,在此基础上绘制 LISA 聚集图则可以更直观地表示其聚集关系^[27]。局部空间自相关的检验公式为:

$$Z_i = \frac{I_i - E(I_i)}{\sqrt{\text{var}(I_i)}} \quad (3)$$

式中: $E(I_i)$ 为统计观测属性的期望; $\text{var}(I_i)$ 为观测属性的方差。

1.3.3 普通最小二乘法回归模型(Ordinary least squares, OLS) 一般情况下,对于解决较多自变量的回归问题,通常首选一般线性回归模型来表达。回

归模型的一般表达式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \epsilon \quad (4)$$

式中: Y 为模型因变量(水土流失面积); $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_m$ 为回归模型中的参数; x_1, x_2, \dots, x_m 为影响吉林省水土流失的各个自变量; ϵ 为随机误差。

本研究中运用 OLS 回归模型来拟合吉林省水土流失及各个自变量之间的关系并计算预测值。

1.3.4 方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)

主要验证是否存在多重共线性。VIF 值大于 7.5, 表明该变量有可能存在多重共线性, 计算公式为:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (5)$$

式中: R_j 为第 i 个变量 $X_j (i=1, 2 \dots k; i \neq j)$ 的复相关系数; R_j^2 以 X_j 做因变量, 对其他变量 $X_j (i=1, 2 \dots k; i \neq j)$ 做新的回归后得到的可决系数^[28-29]。

2 结果与分析

2.1 吉林省水土流失及社会经济指标空间自相关性

2.1.1 水土流失空间自相关性 2017—2021 年吉林省水土流失面积的 Moran's I 指数均为正数且数值范围为 0.254 6~0.347 6(表 2), 近 5 a 间吉林省水土流失面积在空间上均存在自相关性, 水土流失情况会受到临近位置其他因素影响。水土流失高一高集聚区主要集中于吉林省西北地区。由于该地区平原分布较广, 地形平坦, 植被覆盖率低, 成为水土流失的重灾区^[15], 包括洮南市, 大安市, 通榆县和长岭县; 紧邻高一高集聚区的乾安县表现出一定的低一高集聚效应。水土流失低一低集聚区主要分布在吉林省南部地区。由于该地区降水量较高, 森林覆盖率较高, 水土流失程度较低^[30], 包括柳河县, 白山市, 临江市, 通化县和集安市。吉林省东部也表现出较小范围的集

聚效应, 主要表现在图们市和龙井市地区。LISA 聚类地图体现了吉林省水土流失情况在部分地区存在一定的集聚效应, 水土流失情况在空间上存在相关性(图 1)。

表 2 2017—2021 年吉林省水土流失空间自相关 Moran's I 指数
Table 2 Moran's I index of spatial autocorrelation of soil and water loss in Jilin Province from 2017 to 2021

年份	2017	2018	2019	2020	2021
Moran's I	0.339 1	0.346 6	0.347 6	0.341 8	0.254 6

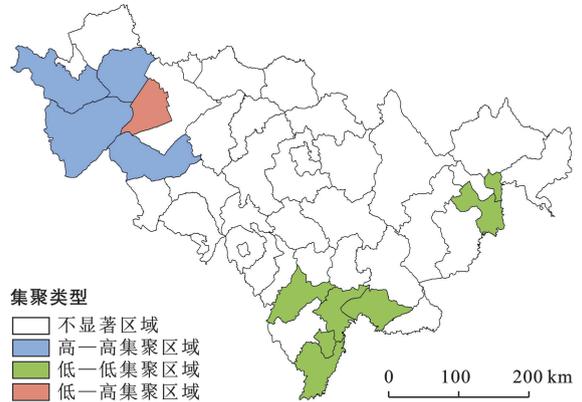


图 1 2018 年吉林省水土流失 LISA 聚类图(审图号 GS(2019)1822)
Fig.1 LISA cluster map of soil and water loss in Jilin Province in 2018 [Map Approval Number: GS(2019)1822]

2.1.2 吉林省社会经济指标全局空间自相关性 Moran's I 指数显示, 除了人口密度、GDP 和 GDP 密度外, 其余指标均呈显著的空间正相关特性。13 个变量中, 城市化率、建设用地比例、植被覆盖面积以及农业经济增长率的 Moran's I 值, 与其他变量相比较, 5 a 平均值分别为 0.6, 0.448 6, 0.586 和 0.112 8, 这表明这 4 个变量在空间分布上具有较强的依赖性, 而它们的随机分布性则较低(表 3)。

表 3 2017—2021 年吉林省社会经济指标全局空间自相关 Moran's I 值

Table 3 Moran's I values of global spatial autocorrelation of socio-economic indicators in Jilin Province from 2017 to 2021

指标	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	5 a 平均
人口增长率	0.356	0.322	0.271	-0.005	-0.034	0.182 0
人口密度	-0.039	-0.039	-0.039	-0.049	-0.055	-0.044 2
GDP	-0.024	-0.023	-0.039	-0.031	-0.032	-0.029 8
GDP 增长率	-0.034	0.096	0.523	-0.21	-0.068	0.061 4
GDP 密度	-0.053	-0.058	-0.063	-0.069	-0.07	-0.062 6
第一产业增长率	0.395	-0.033	0.502	0.010	-0.02	0.170 8
第二产业增长率	-0.081	0.029	0.740	-0.137	-0.16	0.078 2
第三产业增长率	0.060	0.051	0.362	-0.176	0.204	0.100 2
城市化率	0.716	0.413	0.719	0.718	0.434	0.600 0
建设用地比例	0.461	0.457	0.43	0.448	0.447	0.448 6
农业用地比例	0.579	0.583	0.587	0.586	0.585	0.584 0
植被覆盖面积	0.594	0.584	0.584	0.584	0.584	0.586 0
农业经济增长率	0.118	0.106	0.118	0.118	0.104	0.112 8

2.1.3 局部双变量空间自相关性 GDP 增长率、第二产业增长率、城市化率和植被覆盖面积呈负相关关系,其他指标均呈明显正相关关系(表 4)。呈负相关的指标中,城市化率和林地面积的 Moran's I 值较大,5 a 平均值分别为 -0.3146 和 -0.2858 ,说明其对水土流失的影响作用更强,城市化率和林地面积对吉林省水土流失情况产生明显的抑制作用。从数据类型上来看,人口类型数据,经济类型数据的 Moran's I 指数数值绝对值整体低于社会类型数据,说明社会类型数据与其余两种类型数据相比空间分布更加集中,出现随机分布的可能性更小,空间依赖性更高。

表 4 2017—2021 年吉林省社会经济指标双变量空间自相关 Moran's I 值

Table 4 Moran's I values of bivariate spatial autocorrelation of socio-economic indicators in Jilin Province from 2017 to 2021

指标	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
人口	0.047	0.047	0.042	0.044	0.040
人口增长率	0.241	0.236	0.183	0.03	-0.085
人口密度	0.015	0.015	0.013	0.017	0.016
GDP	0.036	0.036	0.018	0.024	0.024
GDP 增长率	0.047	-0.040	-0.262	0.028	0.022
GDP 密度	0.015	0.015	0.006	0.012	0.011
第一产业	0.094	0.093	0.091	0.092	0.096
第二产业	0.031	0.030	0.010	0.017	0.016
第三产业	0.034	0.034	0.012	0.018	0.019
第一产业增长率	0.063	-0.051	0.155	-0.006	-0.004
第二产业增长率	0.04	-0.044	-0.294	-0.03	0.019
第三产业增长率	0.050	0.011	-0.203	-0.032	0.200
城市化率	-0.343	-0.237	-0.351	-0.350	-0.292
建筑面积	0.342	0.348	0.341	0.344	0.344
农业面积	0.379	0.387	0.391	0.390	0.391
林地面积	-0.278	-0.285	-0.289	-0.288	-0.289
农业 GDP	0.088	0.100	0.090	0.091	0.090

利用 Geoda 软件对 2020 年吉林省水土流失和社会经济指标进行局部双变量空间自相关分析,并绘制双变量 LISA 图,以此说明各社会经济因素对水土流失的影响情况(图 2)。2020 年,吉林省社会经济指标的空间自相关性相对于其他指标较为显著。社会类型影响因素中,“建设用地比例”和“农业用地比例”在吉林省西北部呈现出高一高集聚,在吉林省东南部呈现出低—低集聚;而“植被用地比例”和“城市化率”则表现出相反的集聚特征,在东北部呈低—低集聚,在东部呈高一高集聚。对吉林省 2017—2021 年水土流失和社会影响因素进行双变量空间自相关分析,结果显示 5 a 间整体变化较小。其中,人口增长率、城市

化率、建设用地面积、农业用地面积和植被覆盖面积等影响因素的双变量 Moran's I 值较高。具体分布特征为:人口增长率、建设用地面积和农业用地面积在吉林省西北部呈现出高一高集聚特征,在东南部呈现出低—低集聚特征;城市化率在吉林省中部地区呈现出高一低集聚特征,在东北部呈现出低—高集聚特征;植被覆盖面积在吉林省东北地区呈现出高一低特征,在吉林市地区呈现出高一高集聚特征,在抚松市、敦化市、安图县等地区呈现出低—高集聚特征。

2.2 吉林省水土流失关键影响因素

使用 ArcGIS 软件建立各影响因素的 OLS 线性回归模型,探究 2020 年吉林省水土流失的关键影响因素。结果显示,人口数量、人口密度、GDP、GDP 密度和 GDP 增长率的方差膨胀因子(VIF)过高,均大于 7.5,表明其具有多重共线性,后续分析不再考虑这些变量的作用。农业 GDP 和农业用地比例的 Robust_Pr 值分别为 0.047 和 0.003,说明其与水土流失相关性显著。通过比较 Coef 值的绝对值大小,可知第一产业增长率、第二产业增长率和第三产业增长率的绝对值相对较高,说明其对水土流失情况具有一定的影响(表 5)。2020 年 OLS 线性回归模型分析显示,建设用地比例、农业用地比例、植被覆盖比例和农业 GDP 的 Robust_SE 值较低,模型拟合度较高。农业 GDP、农业用地比例和植被覆盖比例的 Robust_Pr 值低于其他影响因素,5 a 平均结果为 0.038,0.003 和 0.154,说明这 3 种影响因子与吉林省水土流失有较高的相关性,吉林省农业和林业发展受水土流失程度影响较大。可见,吉林省在进行水土流失防治过程中,需多关注农业和林业对生态环境方面的影响。

3 讨论

(1) 本研究中 LISA 和 Moran's I 提供了全局和局部的空间自相关分析,但它们主要适用于探讨线性关系。实际上,水土流失和社会经济指标之间的关系可能是非线性的或更复杂的,社会经济指标除了影响水土流失面积,还影响水土流失强度等。未来研究可以考虑使用其他空间统计方法,如地理加权回归(GWR)^[31]等,以更好地捕捉这些复杂的空间关系。

(2) 本研究以吉林省各区县为研究区域,未进一步细分到更小的空间单元。这种区域划分的局限性可能影响分析的精度和细节展现。未来研究可以考虑采用更高分辨率的数据和更小的空间单元,以便更准确地捕捉水土流失与社会经济因素之间的复杂关系。

(3) 本研究未能提出具体的水土保持工程的有

效解决方案或政策建议。未来研究应在分析相关性的基础上,进一步探索和提出针对性的水土保持措施

和政策,以便更有效地应对水土流失问题,促进区域可持续发展。

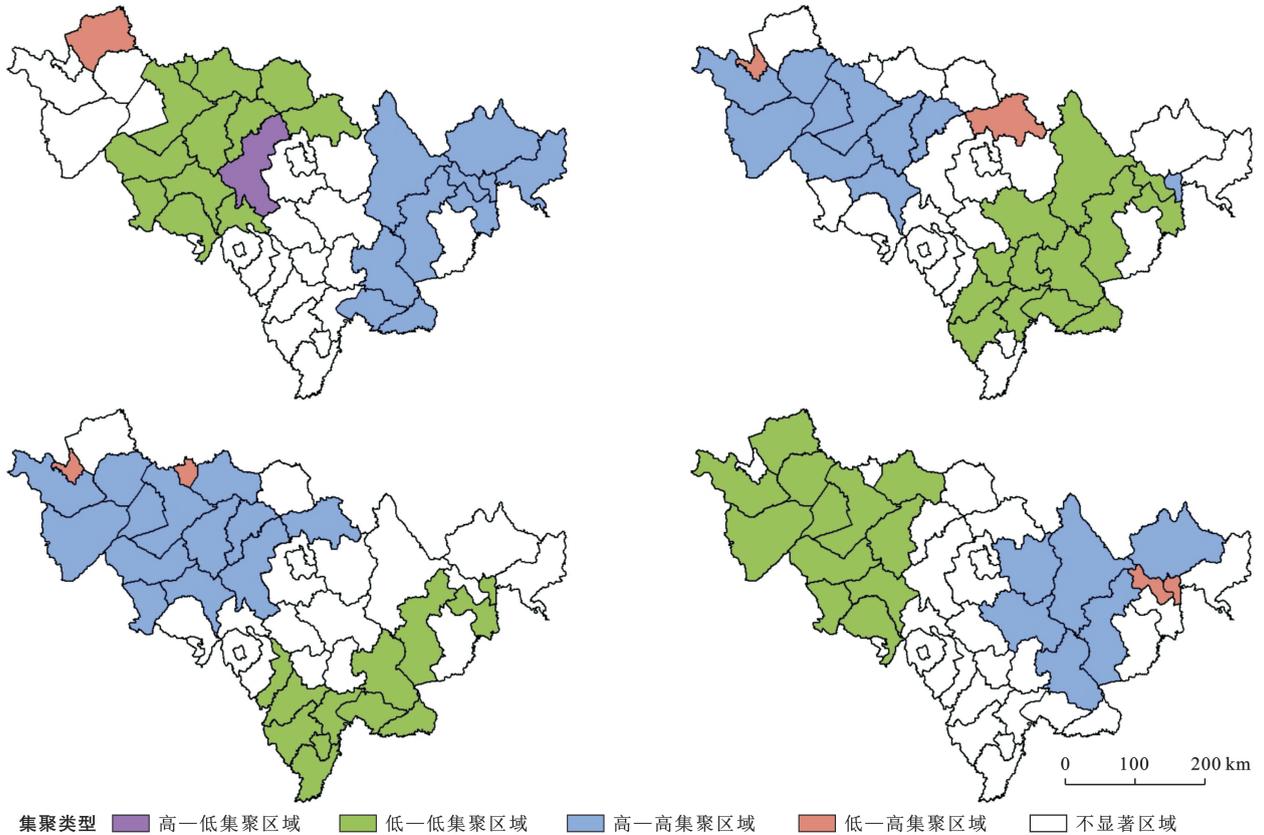


图 2 2020 年吉林省社会类型影响因素双变量空间自相关 LISA 集聚图〔审图号 GS(2019)1822〕

Fig.2 Bivariate spatial autocorrelation LISA clustering map of social type influencing factors in Jilin Province in 2020

表 5 2020 年吉林省水土流失影响因素 OLS 线性回归模型

Table 5 OLS linear regression model for influencing factors of soil and water loss in Jilin Province in 2020

变量	Coef	StdError	t_Stat	Prob	Robust_SE	Robust_t	Robust_Pr
第一产业增长率	486.999	1 073.372	0.454	0.653	542.225	0.898	0.375
第二产业增长率	393.018	550.288	0.714	0.480	545.680	0.720	0.476
第三产业增长率	-773.874	1 326.851	-0.583	0.563	1 007.641	-0.768	0.447
建设用地比例	0.237	0.964	0.246	0.807	1.051	0.226	0.823
农业用地比例	0.355	0.099	3.588	0.001	0.112	3.163	0.003*
植被覆盖比例	0.024	0.042	0.565	0.576	0.026	0.920	0.364
农业 GDP	-0.001	0.000 4	-1.319	0.195	0.000 3	-2.054	0.047*

注:Coef 表示解释变量与因变量之间的关系强度和方向;StdError 是标准误差,值越小,表示系数估计值越精确;t_Stat 检验每个解释变量的系数是否显著;Prob 值用于检验解释变量的系数为 0 的假设;Robust_SE 来估计系数的标准误差,如果其与 OLS 回归的标准误差有显著不同,则表明需要更好的空间回归模型来拟合数据;Robust_Pr 的值代表经过稳健性调整后的 p 值,用于评估变量的统计显著性。* 表示该自变量的系数在统计上具有显著性, $p < 0.05$ 。

4 结论

(1) 2017—2021 年吉林省水土流失的 Moran's I 指数均为正数且最小值为 0.254 6,表明吉林省水土流失面积在空间上具有一定的自相关性。水土流失在洮南市、大安市、通榆县和长岭县呈现出高一高聚集的现象。吉林省水土流失较轻的区域主要位于柳河县,白山市,临江市,通化县和集安市。

(2) 城市化率、建设用地比例、植被覆盖面积和农业经济增长率的 Moran's I 值相对较高,表明这些指标在空间分布上呈现出显著的集聚特征。局部双变量空间自相关分析结果显示多数社会经济指标与水土流失面积之间存在正相关关系,其中城市化率和植被覆盖面积对水土流失的影响尤为显著。此外,与人口和经济数据相比,社会类型数据展现出更高的空间依赖性,其分布更为集中,这进一步强化了城市化

与植被覆盖等要素在吉林省空间布局中的重要作用。

(3) 2017—2021 年农业 GDP、农业用地比例和植被覆盖比例的 Robust_Pr 值低于其他影响因素, 5 a 平均结果为 0.038, 0.003 和 0.154, 说明这 3 种影响因子和水土流失的相关性较高。

参考文献 (References)

- [1] 孟祥冬, 曾奕, 方怒放. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀速率的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 25-32.
Meng Xiangdong, Zeng Yi, Fang Nufang. Effects of topography and land use on soil erosion rate in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 25-32.
- [2] 倪晋仁, 李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 610-620.
Ni Jinren, Li Yingkui. Dynamic assessment for soil erosion based on land use-structure change [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5): 610-620.
- [3] 姜德文. 城镇化进程中的水土流失与生态环境新问题[J]. 中国水土保持, 2014(1): 1-3.
Jiang Dewen. Soil erosion and new problems of ecological environment in the process of urbanization [J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(1): 1-3.
- [4] Tan Xuezhi, Gan T Y. Contribution of human and climate change impacts to changes in streamflow of Canada [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17767.
- [5] 王淑媛, 李晓丹, 刘学录, 等. 黄河流域甘肃段主要一级支流水土流失与社会经济发展的关系研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(5): 202-208.
Wang Shuyuan, Li Xiaodan, Liu Xuelu, et al. Research on the relationship between soil erosion and socio-economic development of the main first-class tributary of the Gansu section of the Yellow River basin [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(5): 202-208.
- [6] 刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 黄河中游龙潼区间水沙变化特征及其对降水和人类活动的响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 555-568.
Liu Qiang, Yu Feihong, Chang Kangfei, et al. Variation character of water and sediment and its response to rainfall and human activities in longtong region of the middle Yellow River [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 555-568.
- [7] Yuan Shuang, Xu Qiang, Zhao Kuanyao, et al. Dynamic analyses of soil erosion and improved potential combining topography and socio-economic factors on the Loess Plateau [J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111814.
- [8] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6.
Xia Jun, Ma Xieyi, Zou Lei, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6.
- [9] 史志华, 于书霞, 王玲. 南方红壤区水土流失与社会经济的耦合关系[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 69-74.
Shi Zhihua, Yu Shuxia, Wang Ling. Exploring coupling relationship between soil erosion and socioeconomic from multiple perspectives in red soil region of Southern China [J]. Yangtze River, 2023, 54(1): 69-74.
- [10] 许炯心. 人类活动影响下的黄河下游河道泥沙淤积宏观趋势研究[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 8-16.
Xu Jiongxin. Tendency of sedimentation in the Lower Yellow River influenced by human activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 8-16.
- [11] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3): 395-402.
Wang Suiji, Li Ling, Yan Ming. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River basin [J]. Geographical Research, 2013, 32(3): 395-402.
- [12] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2256-2262.
Zhang Tiaofeng, Zhu Xide, Wang Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River basin [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2256-2262.
- [13] 夏伟, 周维博, 李文溢, 等. 气候变化和人类活动对泮河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 47-52.
Xia Wei, Zhou Weibo, Li Wenyi, et al. Quantitative evaluation on the impact of climate variability and human activities on runoff changes in the Fenghe River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 47-52.
- [14] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 488-497.
Dai Wen, Lü Dianqing, Li Jingbao, et al. The effect of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 488-497.
- [15] 王彬彬, 金凯. 吉林省水土流失概况及生态修复探讨[J]. 吉林水利, 2018(4): 45-47.
Wang Binbin, Jin Kai. Discussion on the overview of water and soil loss and ecological restoration [J]. Jilin Water Resources, 2018(4): 45-47.
- [16] Li Xiaoyan, Shi Zhenyu, Xing Zihan, et al. Dynamic

- evaluation of cropland degradation risk by combining multi-temporal remote sensing and geographical data in the black soil region of Jilin Province, China [J]. *Applied Geography*, 2023, 154:102920.
- [17] 李志伟, 吴绍洪, 赵东升. 吉林省水土流失敏感性分区研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(15): 6488-6489.
Li Zhiwei, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng. Study on sensitive division of soil and water loss in Jilin Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(15):6488-6489.
- [18] 赵峰, 范海峰, 田竹君, 等. 吉林省中部不同土地利用类型的土壤侵蚀强度变化分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(5):661-666.
Zhao Feng, Fan Haifeng, Tian Zhujun, et al. Analysis of different land use patterns and soil erosion change in the middle of Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(5):661-666.
- [19] 刘会青, 年吉刚, 赵兰坡. 吉林省水土流失遥感调查与分析[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(3):328-333.
Liu Huiqing, Nian Jigang, Zhao Lanpo. Remote sensing investigation and analysis of soil and water losses in Jilin Province [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(3):328-333.
- [20] 贯宏伟, 张文. 吉林省水土流失现状及防治措施[J]. *吉林水利*, 2009(4):52-54.
Guan Hongwei, Zhang Wen. The present states of soil erosion and control measures in Jilin Province [J]. *Jilin Water Resources*, 2009(4):52-54.
- [21] 刘艳军, 张瑜, 崔斌. 吉林省侵蚀沟治理措施体系配置研究[J]. *中国水土保持*, 2020(5):28-30.
Liu Yanjun, Zhang Yu, Cui Bin. Study on allocation of control measures system of eroded gullies in Jilin Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2020(5):28-30.
- [22] 邹霓霄, 冯世盛, 李华孝. 基于 GIS/RS 的寻乌县水土流失敏感性评价[J]. *测绘与空间地理信息*, 2024, 47(5):83-86.
Zou Nixiao, Feng Shisheng, Li Huaxiaoyang. Sensitivity evaluation of soil and water loss in Xunwu County based on GIS and RS [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2024, 47(5):83-86.
- [23] 黄启芬. 贵州省水土流失与社会经济相关性分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):72-78.
Huang Qifen. Correlation analysis on soil erosion and socioeconomic development in Guizhou [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4):72-78.
- [24] 曹聪, 郭泽鑫, 郭彦青, 等. 基于地理加权回归模型的珠三角森林碳储量空间分布[J]. *林草资源研究*, 2023(6):98-104.
Cao Cong, Guo Zexin, Guo Yanqing, et al. Spatial distribution of forest carbon storage in the Pearl River Delta based on geographically weighted regression model [J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2023(6):98-104.
- [25] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砂岩区小流域土壤侵蚀空间自相关特征及影响因素[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):58-65.
Yang Zhenqi, Guo Jianying, Qin Fucang, et al. Spatial autocorrelation patterns and influencing factors of soil erosion of small watershed in bare feldspathic sandstone region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):58-65.
- [26] Srejc T, Manojlovic S, Sibinovic M, et al. Agricultural land use changes as a driving force of soil erosion in the Velika Morava River basin, Serbia [J]. *Agriculture*, 2023, 13(4):778.
- [27] 刘卉, 齐实, 张海龙. 基于空间自相关法的水土保持区划研究: 以东北黑土区为例[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1):321-326.
Liu Hui, Qi Shi, Zhang Hailong. Research on soil and water conservation zonation based on method of spatial autocorrelation: A case study in black soil region of Northeast China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1):321-326.
- [28] 刘海英. 我国个人所得税收入实现的影响因素分析[J]. *大连理工大学学报(社会科学版)*, 2015, 36(1):45-50.
Liu Haiying. Analysis of influencing factors for individual income tax in China [J]. *Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences)*, 2015, 36(1):45-50.
- [29] Meng Xiao, Cao Jiannong, Wang Xiaofeng, et al. Spatial characteristics of the human factors of soil erosion at the boundary of political divisions: A spatial approach [J]. *CATENA*, 2021, 201:105278.
- [30] 周雪岩, 李红, 尹婧博. 吉林省乡村地域系统脆弱性演变及其成因类型划分研究[J]. *农业现代化研究*, 2022, 43(4):679-690.
Zhou Xueyan, Li Hong, Yin Jingbo. Research on the evolution of rural territorial system vulnerability in Jilin Province and its genetic classification [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022, 43(4):679-690.
- [31] 王怡菲, 姚顺波, 邓元杰. 渭河流域水土流失治理效率的时空格局演化与影响因素[J]. *地理科学*, 2019, 39(5):836-846.
Wang Yifei, Yao Shunbo, Deng Yuanjie. Spatio-temporal pattern evolution and influencing factors of governance efficiency of soil and water loss in the Weihe River catchment [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(5):836-846.