

栗珂珂,周詹杭,王真. 中国土壤侵蚀的社会经济空间驱动因素研究:基于多尺度地理加权回归模型的分析[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(6): 29-38. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.06.004

中国土壤侵蚀的社会经济空间驱动因素研究: 基于多尺度地理加权回归模型的分析

栗珂珂¹, 周詹杭^{2,3}, 王真^{1,3}

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070;
3. 华中农业大学国土空间治理与绿色发展研究中心, 武汉 430070

摘要 土壤侵蚀威胁粮食安全和生态系统服务,是中国面临的严峻环境问题之一,同时受到自然因素和人类活动的共同影响。目前国内已有大量研究关注社会经济因素对土壤侵蚀的驱动作用,但关于两者之间空间非平稳关系的探讨和影响因素作用尺度差异性的关注仍存在不足。为探究社会经济活动对土壤侵蚀的复杂驱动机制,以中国346个地级市为研究对象,以2017年为参考年,基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和多尺度地理加权回归(MGWR)模型,揭示中国各地级市土壤侵蚀的空间异质性,并探索社会经济因素对中国各地级市土壤侵蚀速率的空间驱动作用及因素间的作用尺度差异。研究显示:中国各地级市土壤侵蚀速率的空间分布具有明显的空间正相关性,侵蚀热点主要分布在西部地区、东北地区、云贵高原和四川盆地以及黄土高原;与基于全局回归的模型及传统的地理加权回归模型相比, MGWR可以大大提高社会经济变量对土壤侵蚀速率的解释程度,模型拟合优度达到0.87;从驱动因素来看,除人均地区生产总值外,各驱动因素对中国各地级市土壤侵蚀速率的影响方向会随着空间位置变化产生结构性差异;平均而言,人口密度是对中国各地级市土壤侵蚀速率贡献最大的因素;中国地级市土壤侵蚀速率在西部地区更容易受到复种指数的影响,在东部地区社会经济因素对土壤侵蚀速率的驱动机制更为复杂,不同驱动因素作用的空间尺度差异更明显。研究表明,决策者应充分考虑人类活动对土壤侵蚀影响的空间异质性,以实现水土保持的可持续发展。

关键词 土壤侵蚀; 土壤侵蚀预报; RUSLE; 多尺度地理加权回归模型; 社会经济因素; 空间非平稳性

中图分类号 K992.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)06-0029-10

土壤侵蚀不仅会造成土壤养分流失和土地退化^[1],还会带来一系列级联效应,制约多个可持续发展目标(包括零饥饿、清洁水和卫生设施、消除贫困和陆地生命)的实现^[2],已经成为世界范围内的一个难题。中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,根据水利部2022年度全国水土流失动态监测报告(<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/>)显示,2022年全国水土流失面积为265.34万km²,侵蚀强度在中度及以上的面积占水土流失总面积的35.28%,水力侵蚀面积占水土流失总面积的41.10%。水土流失是威胁中国粮食安全和社会经济可持续发展的重要因素之一。

目前,我国在关于土壤侵蚀发生机制和自然因素等方面已经积累大量经验^[3],然而社会经济发展也

会对土壤侵蚀的发生和防治产生重要影响,但其研究相对滞后。对土壤侵蚀社会经济影响因素的认识经历了从定性到定量的过程,早期侧重于定性研究,可以追溯至1830年代。Ananda等^[4]从理论角度对发展中国家的土壤侵蚀进行了社会经济方面的评估,总结出水土流失的程度受到制度条件、人口增长率和政策环境等多种因素的复杂相互作用。Stocking等^[5]指出尽管土地退化是一个物理过程,但其原因却深深植根于土地使用者所处的社会经济、政治和文化环境,如贫困、土地压力、经济发展、技术变革、劳动力供应情况等都会对水土流失造成影响。近年来,随着理论认识的加深和方法学的快速发展,学者们对土壤侵蚀与社会经济关系的研究进入定量分析阶段,大量经济学、统计学分析模型被用于揭示

收稿日期:2024-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(42077060;42377321)

栗珂珂, E-mail: Kekeli@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:王真, E-mail: sinoo@mail.hzau.edu.cn

社会经济因素与土壤侵蚀之间的潜藏关系,研究领域不断扩展并成为土壤侵蚀学科的新增长点^[6]。例如Wang等^[7]利用偏最小二乘回归研究了2005年至2015年中国南方丘陵红壤地区的人口和经济统计变量,发现人口密度、人均GDP、GDP年均增长率等社会经济决定因素对土壤侵蚀控制潜力产生显著影响;Wang等^[8]使用偏最小二乘结构方程模型和灰色关联分析探究了中国黄土高原地区土壤侵蚀对社会经济发展指标如人口密度、人均GDP、农业投入等的响应;王刚等^[9]对1987—2013年江西省水土流失的社会经济驱动机制进行探索,得出产业结构如农业GDP占比是影响江西省水土流失的主要因素之一;Wuepper等^[10]通过建模评估了不同国家土地管理制度对全球土壤侵蚀率的影响;Yu等^[11]使用结构方程模型评估了社会经济变量对土壤侵蚀的驱动作用,得出农业产出和过剩投入是土壤侵蚀的主要促进因素。Wang等^[12]和Cui等^[13]引入多区域投入产出模型在供应链层面上指出耕地水土流失与异地产业的生产与消费等多种社会经济因素通过贸易产生远程耦合;Li等^[6]从多种视角下揭示了土壤侵蚀与人类的供给和消费行为之间复杂且隐匿的联系。此外,逐步回归模型^[14]、多元回归模型^[15-16]、主成分分析模型^[17]等均被应用于探究土壤侵蚀的社会经济因素等研究方面。土壤侵蚀与其社会经济因素之间关系的定量研究逐渐得到丰富和拓展。

然而目前关注土壤侵蚀与社会经济驱动因素的研究大多是从全局的角度出发,研究尺度多集中于流域或区域尺度,尽管土壤侵蚀驱动机制和防治方面的相关经验呈现明显的区域化和地方性特征,但土壤侵蚀与社会经济驱动因素之间的空间非平稳关系尚未得到重视。地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型基于局部平滑的思想,是一种有效处理回归分析中空间非平稳性现象的建模工具,已经被广泛应用于多个研究领域^[17-18],但其基于所有影响因素带宽相同的假设,缺乏对不同影响因素间尺度效应差异的关注。多尺度地理加权回归(multiscale geographically weighted regression, MGWR)模型在传统GWR模型的基础上进行了改进,引入了多尺度的概念,允许模型在不同的空间尺度上对影响因素进行加权。这使得MGWR模型能够更好地捕捉不同尺度下影响因素的空间变化模式,提高了模型对空间异质性的适应能力。因此, MGWR模型更加全面地考虑了影响因素之间的尺

度效应差异,为研究人员提供了更精细和准确的空间分析工具。目前MGWR模型已经成功应用于解决多尺度空间数据分析中的问题,为深入理解影响因素的空间关系提供了有力支持^[18-20]。开展社会经济活动与土壤侵蚀之间关系的定量研究,深入挖掘不同地区土壤侵蚀背后的社会经济动因,不仅对中国土壤侵蚀问题的解决具有实际指导意义,同时也有助于区域经济的可持续发展。

修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)是一种广泛应用的土壤侵蚀预报模型,本研究采用RUSLE和MGWR模型,选取6个社会经济变量,结合空间自相关分析和GIS空间表达方法,以2017年为参考年探究各社会经济影响因素对中国346个地级市土壤侵蚀速率的影响,以期为中国的水土保持工作提供研究支撑和政策建议。

1 材料与方法

1.1 研究区及研究数据

本研究以中国地级市单元为研究对象(共346个地级市,受限于研究数据的可得性,本研究不包含港澳台地区)。中国地图来源为中国自然资源部官网(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号GS(2016)2923号。所采用的数据来源见表1。

1.2 研究方法

1)修正的通用土壤流失方程(RUSLE)。本研究采用的RUSLE模型由美国农业部自然资源保护局(NRCS)于1997年正式决定实施,并在世界范围内得到广泛认可及应用^[21],其表达式为:

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

式(1)中: A 为模型估算的年均土壤侵蚀模数,其单位取决于 R 因子和 K 因子, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为年均降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $(t \cdot hm \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L 为坡长因子(无量纲), S 为坡度因子(无量纲),根据李佳蕾等^[22]方法计算得到; C 为植被覆盖与管理因子(无量纲),根据Borrelli等^[23]方法计算得到; P 为水土保持措施因子(无量纲),赋值依据参考Xiong等^[24]研究。 R 因子的空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,其余各因子的空间分辨率均为 $30 m \times 30 m$ 。所有因子的空间分辨率根据最近邻法被统一至 $30 m \times 30 m$ 的网格单元下,并标准至相同投影坐标系Albers下,地理坐标系统均为GCS_Krasovsky_1940。地市级尺度上的土壤侵蚀速率取均值,土壤侵蚀量取加和。

表1 本研究采用数据来源
Table 1 Data sources of this study

数据类型 Data type	链接网址 Link of website
土地利用 Land use	https://data.apps.fao.org/catalog/dataset/
SRTM DEM数据 DEM	https://www.nasa.gov/
R因子 R-factor	http://clicia.bnu.edu.cn/data/erosivity.html
K因子 K-factor	http://loess.geodata.cn/
归一化植被指数 NDVI	参考文献[19] Reference [19]
人口密度数据 Population density	https://hub.worldpop.org/
地市级农作物播种面积 City-specific sown area of crops	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
地市级耕地面积 City-specific cropland area	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
人均地区生产总值 Gross regional products per capita	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
地区生产总值增长率 Growth rate of gross regional products	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
人均机械总动力 Mechanical power per capita	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
城镇化率 Urbanization rate	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/
中国行政区划数据 Administrative division	https://www.mnr.gov.cn/

2)空间自相关性分析。地理学第一定律指出,区域内相近的空间变量(本研究指土壤侵蚀模数)具有相似的特征,即空间自相关性。空间自相关性分析用于检验某种现象在空间上是否存在集聚。本研究选取经典的全局Moran's I 指数和局部Moran's I 指数^[25]用于检验中国土壤侵蚀模数在全局和局部的空间分布特征。其计算公式如下:

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

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / s^2}{\sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

式(2)~(3)中: I 表示全局Moran's I 指数, I_i 表示局部Moran's I 指数。 n 为研究单元(即地级市)数量, x_i 和 x_j 为地级单元 i 和 j 的年均土壤侵蚀模数, \bar{x} 为所有研究单元上土壤侵蚀模数的平均值; $W_{i,j}$ 为空间权重矩阵。Moran's I 指数介于-1至1之间,大于0表示研究单元的年均土壤侵蚀模数存在空间正相关,小于0表示空间负相关,等于0表示其分布为独立分布。对其进行 Z 值显著性检验的计算公式为:

$$Z(I) = [I - E(I)] / \sqrt{V(I)} \quad (5)$$

式(5)中: $Z(I)$ 表示衡量全局Moran's I 的显著性水平; $E(I)$ 表示Moran's I 的数学期望; $V(I)$ 表示Moran's I 的方差。当Moran's I 指数显著为正且 $Z(I)$ 大于0时,呈“高-高集聚”关系;当Moran's I 指数显著为正且 $Z(I)$ 小于0时,呈“低-低集聚”关系;当Moran's I 显著为负且 $Z(I)$ 大于0时,呈“高-低集

聚关系”;当Moran's I 显著为负且 $Z(I)$ 小于0时,呈“低-高集聚”关系,根据该指标可以绘制LISA(local indicators of spatial association)聚集图。

3)多尺度地理加权回归模型(MGWR)。传统的线性回归模型如最小二乘法(ordinary least square, OLS)基于空间平稳性关系的假设,即自变量与因变量的关系在空间上保持不变。然而很多情况下,变量之间的关系随位置的变化而变化,即变量之间存在空间非平稳性关系。GWR模型在OLS的基础上引入局部平滑的思想,基于局部和可变参数回归,弥补了全局回归模型的缺陷,但其局部回归模型的带宽设置恒定,忽略了不同自变量尺度作用的差异^[26]。在GWR的基础上,MGWR通过消除自变量的单一带宽假设,区分了不同因子间带宽的差异性,能够更好地适应不同尺度上的地理空间数据的异质性^[27-28]。本研究基于MGWR模型,分析全国地级市尺度上土壤侵蚀驱动因素的空间异质性。其表达式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_{b_w, k}(\mu_i, v_i) x_{i, k} + \epsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式(6)中: (μ_i, v_i) 是第 i 个研究单元的地理中心坐标, $x_{i, k}$ 表示研究单元 i 的自变量 k 的解释值, $\beta_{b_w, k}(\mu_i, v_i)$ 表示经过有效带宽校正后带宽为 b_w 时解释变量 k 的回归参数, $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 表示研究单元 i 处的截距, ϵ_i 表示随机误差项。与GWR中所有自变量带宽一致的设置不同,MGWR中每个回归系数 $\beta_{b_w, k}$ 均基于局部回归且获得各自的最优带宽。结合社会经济因素对土壤侵蚀的影响机制,在前人研究的基础上综合考虑因素选取的全面性和数据的可获取性,

本研究基于IPAT理论 $I=PAT$,从人口、经济、技术3个方面选取了6个影响因素作为因变量。人口方面选取人口密度(D_{POP})以反映人类活动密集程度,城镇化率(R_{URB})以反映城镇化水平;经济方面选取人均地区生产总值(P_{GRP})以反映当前经济发展水平,地区生产总值的增长率(G_{GRP})以反映经济发展水平的动态变化;技术方面选取人均农业机械总动力(P_{AGM})反映人均农机水平和农业集约化强度,复种指数(T_{MUI})反映耕地的密集化程度。式(6)中,因变量 y_i 在本研究中为中国各地级市平均土壤侵蚀速率。MGWR模型的核函数和带宽选择准则延续GWR模型,本研究分别采用常用的二次核函数和赤池信息准则(akaike information criterion, AICc), AICc取值越低代表模型的模拟效果越好。与广义加性模型类似^[29],MGWR模型采用后退拟合算法(back-fitting algorithm)^[19]对各个平滑项进行拟合。首先以GWR模型对各系数的估计作为初始设置,得到初始设置下的预测值与真实值之间的残差。然后根据GWR模型将该残差加上当前的 $\beta_{b_w, k}(\mu_i, v_i)x_k$ 与第1个自变量 x_0 进行回归,寻找 x_0 的最优带宽,之后依次更新参数直至获得所有自变量的最优带宽,最终完成多尺度的地理加权回归。

2 结果与分析

2.1 中国土壤侵蚀模数空间分布特征

中国在2017年土壤侵蚀估算总量达29.22亿t,其平均土壤侵蚀速率约为4.64 t/hm²。全国土壤侵蚀格局呈现高度的空间异质性,侵蚀量的热点地区主要集中在中国“黑河-腾冲线”附近及其以西。西部地区面积广袤导致其尽管侵蚀速率较低但土壤侵蚀量较高,其中新疆和西藏2个自治区土壤侵蚀总量分别为1.57亿t和3.45亿t,裸地上土壤侵蚀量的比例分别高达90.68%和91.53%,这一比例在青海也达到74.19%。其次是东北地区,东北是世界三大黑土区之一,主要分布在黑龙江、辽宁、吉林和内蒙古等省份,黑土拥有深厚的腐殖质层且富含有机质,是中国主要的商品粮生产基地。不合理的耕作方式以及持续的开垦导致东北黑土区耕地土壤侵蚀严重,达5.25亿t,占该地区土壤侵蚀总量的72.91%。位于西南部的云南、贵州和四川等地区地势陡峭且经常遭受降雨冲刷,土壤侵蚀程度剧烈,土壤侵蚀量达4.83亿t,其中造成耕地3.16亿t土壤侵蚀,占该地区土壤侵蚀总量的65.44%。黄土高原横跨山西、宁夏、陕

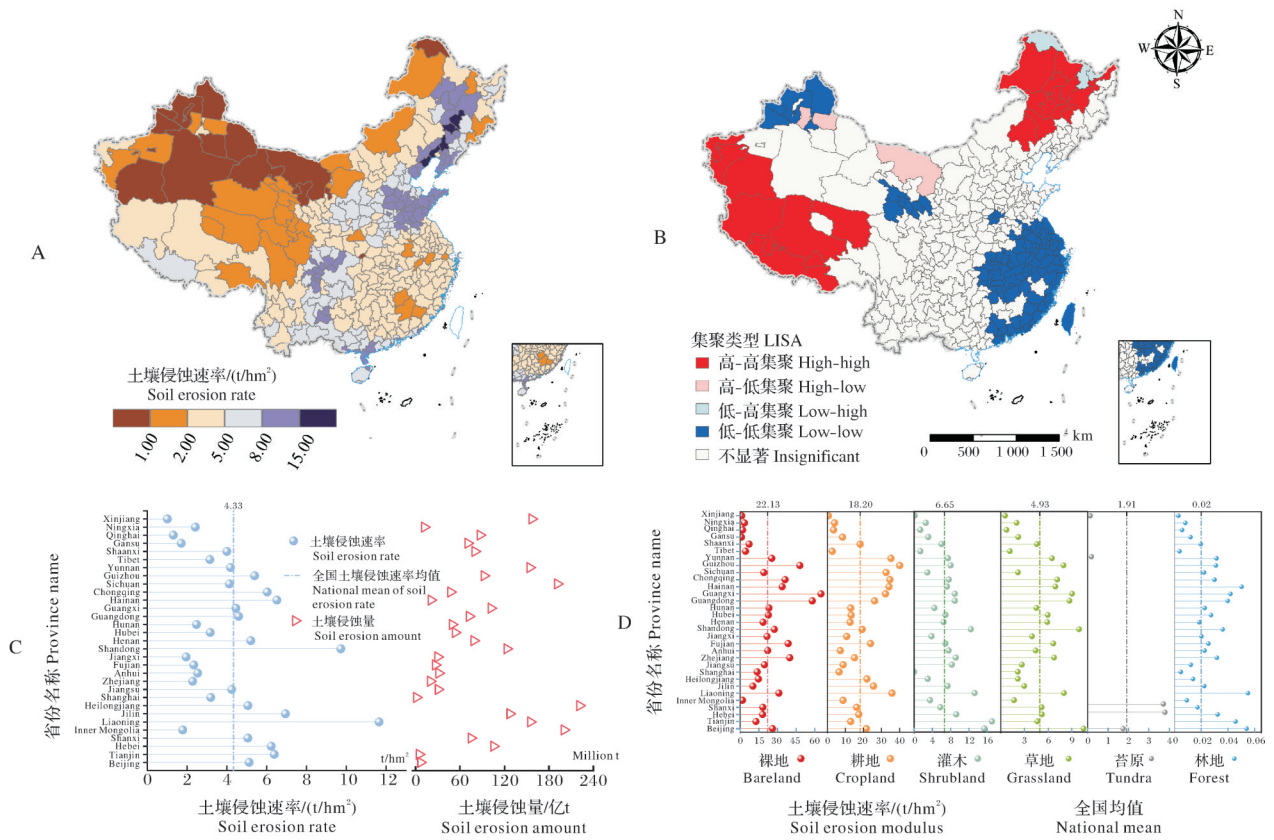
西、甘肃和青海等省(自治区),由于黄土土质疏松、植被易受破坏,生态环境本底脆弱,加之降雨集中,黄土高原2017年的土壤侵蚀总量达3.34亿t,其中耕地和裸地造成的土壤侵蚀分别占土壤侵蚀总量的44.69%和27.56%。黄淮海平原是中国的第一粮仓,该地区农业活动密集且耕层较浅,造成的土壤侵蚀量为3.13亿t,其中耕地土壤侵蚀占88.23%(图1)。

使用Moran's I 指数计算中国各地级市的土壤侵蚀速率的空间自相关性,其全局Moran's I 指数为0.53,标准化检验 $Z(I)$ 值为28.78($P=0.00^{***}$),表明各地级市土壤侵蚀速率集聚状态明显。为进一步确定空间集聚地区,本研究进一步根据各地级市土壤侵蚀速率计算局部Moran's I 指数,并绘制了其LI-SA集聚分布图(图1B)。结果表明,中国土壤侵蚀速率的“高-高”集聚主要分布在西藏和东北地区;而“低-低”集聚主要分布在东南部沿海地区。中国各地级市土壤侵蚀速率的空间特征表明其呈现显著的空间正相关性,因此使用传统的全局模型探索土壤侵蚀速率的社会经济驱动因素时会忽略数据本身的空间自相关性,而多尺度地理加权回归模型不仅基于局部回归的思想,并且考虑了各因素之间驱动过程的尺度效应差异,可以较好地处理各地级市与驱动因素间的空间非平稳关系。

2.2 多尺度地理加权回归结果分析

为探究不同社会经济因素影响下中国各地级市土壤侵蚀速率在空间分布上存在的差异,本研究选用多尺度地理加权回归模型分析其驱动因素的空间差异,共选取了6个社会经济变量探究不同社会经济因素影响下中国各地级市土壤侵蚀速率的空间差异。为了避免不同变量之间相互影响造成潜在的结果偏差,本研究首先使用方差膨胀因子(VIF)对选取的社会经济指标进行共线性检验(表2),VIF值大于7.5的情况下通常表明解释变量存在冗余。表2中各变量的VIF值均远小于7.5,表明本研究中模型不存在共线性问题。

相较于全局回归模型,基于局部平滑思想的GWR模型和MGWR模型均更加适用于解释本研究选取的6个社会经济变量对各地级市土壤侵蚀速率驱动作用的空间异质性问题。然而通过对比拟合结果,发现MGWR模型的拟合优度 R^2 达到0.87,略高于GWR模型的0.86。尽管2个模型从拟合优度来看差距较小,但MGWR模型的AICc值和残差平方和



A: 各地级市土壤侵蚀速率空间分布 Spatial distribution of soil erosion rate at prefecture-level city; B: 各地级市土壤侵蚀速率LISA 集聚类型图 LISA map of soil erosion rate at prefecture-level city; C: 各省平均土壤侵蚀速率和土壤侵蚀量总和 Average soil erosion rate and soil erosion amount at provincial level; D: 各省不同土地利用类型上的平均土壤侵蚀速率 Average soil erosion rate on different land use types at provincial level. 不含台湾省及港澳数据, 图2, 3同。 Excluding data from Taiwan Province, Hong Kong, Macau, Fig.2 and Fig.3 are the same.

图1 中国土壤侵蚀现状的空间分布特征

Fig.1 The spatial distribution characteristics of soil erosion in China

表2 多尺度地理加权回归模型诊断信息

Table 2 Multiscale geographically weighted regression model result summary

模型 Model	R^2	Adjusted R^2	AICc	σ^2	变量 Variables	带宽 Bandwidth	系数 Coefficients			VIF
							均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	
OLS	0.37	0.36	691.44			346				
GWR	0.86	0.80	524.93	0.20		59				
MGWR	0.87	0.84	463.62	0.16	D_{POP}	38	0.67	-0.03	1.55	1.82
					R_{URB}	179	-0.33	-0.46	-0.17	2.70
					P_{GRP}	346	0.06	0.01	0.06	2.18
					G_{GRP}	94	-0.09	-0.86	0.77	1.06
					P_{AGM}	197	0.09	-0.01	0.21	1.47
					T_{MUI}	48	-0.09	-0.40	0.37	1.09
					$P_{intercept}$	30	-0.02	-2.14	0.95	

均小于GWR模型,说明MGWR模型对中国各地级市土壤侵蚀速率及其驱动因素的解释效果更好。此外, MGWR模型放宽了对传统GWR模型在进行局部回归时各自变量均在相同尺度范围内执行的假

设,可以直接反映不同影响因素差异化的作用尺度。表2中GWR模型所有自变量均具有相同最优带宽设置59,即每个局部回归方程的相邻要素数量,但MGWR模型中各因素具有各自不同的最优带宽,呈

现了不同社会经济影响因素在驱动中国各地级市土壤侵蚀速率空间异质性格局时作用尺度的差异。结果表明,相较于其他变量,中国各地级市土壤侵蚀速率对人口密度和复种指数等因素较为敏感,其作用尺度较小(相应带宽分别为38和48),反映了各地级市在不同人口密度和复种指数的背景下,其土壤侵蚀速率变化程度差异较大。相比之下,地区生产总值增长率和农业机械化水平的作用尺度较大,其带宽分别为346和197,表明这些因素对各地级市土壤侵蚀速率的驱动作用在较大尺度上相似。

多尺度地理加权回归模型得到的决定系数 R^2 的空间分布(图2)显示, MGWR模型在中国大部分地区解释程度都较高, R^2 均在0.54以上。但在东北地区和西南地区模型拟合优度相对较低, 该部分地区 R^2 在0.33~0.40。这是因为土壤侵蚀速率同时受到

自然和社会经济因素影响,本研究基于研究目的仅使用了社会经济因素解释其空间变异,且受限于数据可得性,可能忽略了一些重要因子。表2展示了MGWR模型结果中各变量的系数。为了更好地探究不同社会经济因素对土壤侵蚀速率的贡献程度,本研究在进行多尺度地理加权回归之前将解释变量和因变量的值在进行了对数化处理后,均缩放为平均值为0且标准差为1的标准化变量,因此各变量的回归系数可用于比较不同变量对土壤侵蚀速率的相对贡献程度。从各系数的平均值来看,人口密度对土壤侵蚀速率的贡献程度最大。而各变量系数范围均覆盖了正负值,这表明不同变量对于土壤侵蚀速率的影响因素会随着空间位置的变化而变化。

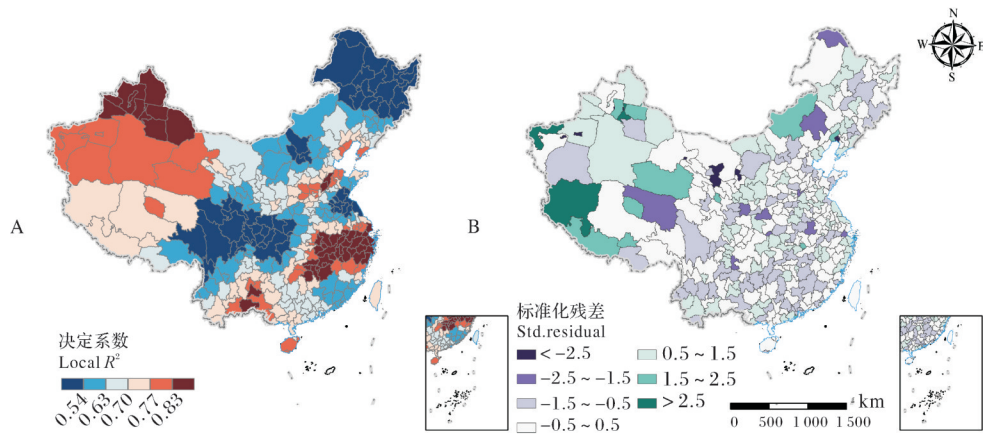


图2 多尺度地理加权回归模型中决定系数(A)和标准化残差的空间分布(B)

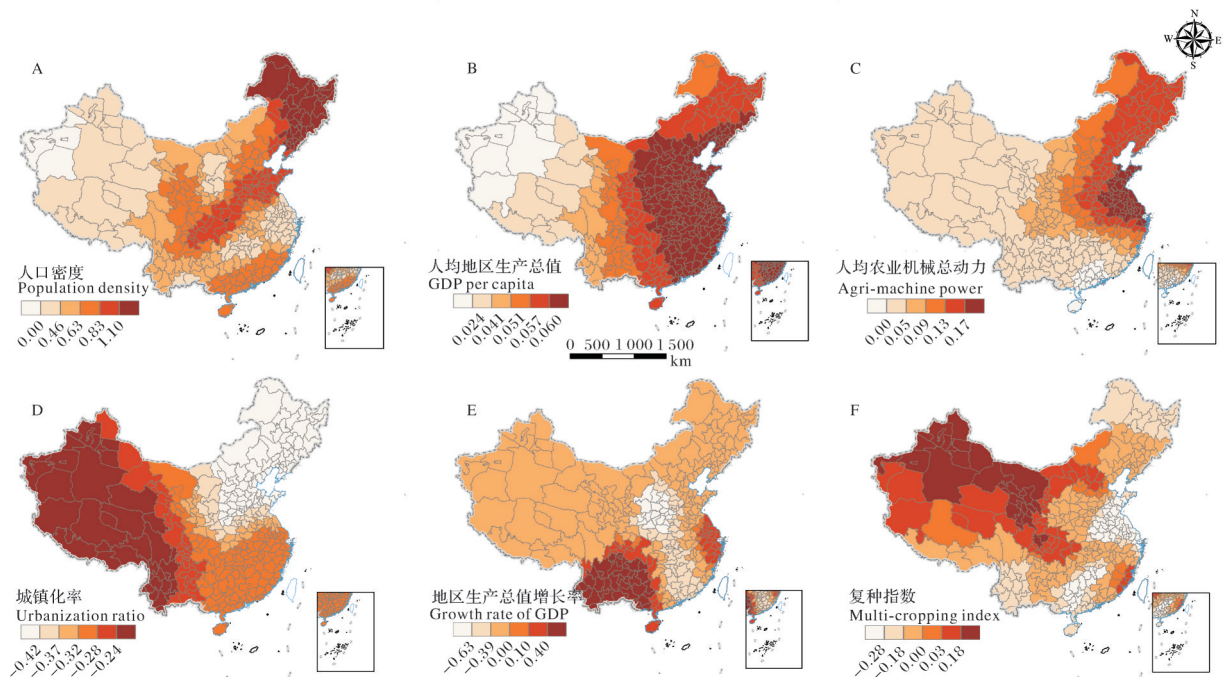
Fig.2 The spatial distribution of local R^2 (A) and standardized residual in MGWR model (B)

2.3 驱动因素的空间异质性分析

图3展示了MGWR模型中各个社会经济驱动因素空间回归系数。从农业活动相关的驱动因素来看,复种指数和人均机械总动力表征的农业集约化程度几乎在全国范围内均对土壤侵蚀速率呈现正向驱动作用,这表明了农业活动对土壤侵蚀起到加速作用。具体而言,复种指数在中国西部地区对土壤侵蚀速率的正向作用更为明显。较高的复种指数反映了农作物种植面积的增加和耕作频率的提高,这可能会导致土壤结构的破坏,增加土壤水蚀风险,但其原因进一步受区域自然条件、政策等因素的交互影响,呈现复杂分异。人均农业机械总动力表征的农业集约化程度对土壤侵蚀速率的正向驱动作用主要表现在中国东部地区如华北平原或东北地区。东北地区和华北平原作为中国的重要农业生产基地,

农业集约化程度较高,由于大型农机在耕作过程中可能会对土壤进行压实^[30],降低土壤孔隙度和透水性,导致土壤抗水蚀能力的下降,从而增加土壤侵蚀。此外,依赖机械化进行大面积翻耕会增加对土壤的扰动程度,破坏土壤团聚体,从而增加土壤侵蚀的风险。

在人口因素方面,人口密度在中国大部分区域对土壤侵蚀速率呈现正向驱动作用。本研究中东北地区、位于华北平原的山东河南等省份以及西南地区等地,人口密度的驱动作用更为明显。这些地区耕地利用更为集约化,农业活动更为频繁,土地利用压力较大。相反,城镇化对土壤侵蚀速率的作用在中国几乎所有地区均呈现负向作用,这是因为城镇化过程中会造成大量地表硬化,抑制了水土流失。从经济方面来看,人均地区生产总值在所有地区均



A:人口密度 Population density; B:人均地区生产总值 GDP per capita; C:人均农业机械总动力 Agricultural machine power per capita; D:城镇化率 Urbanization ratio; E:地区生产总值增长率 Growth rate of GDP; F:复种指数 Multi-cropping index.

图3 多尺度地理加权回归模型中各社会经济因素回归系数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of regression coefficients of variables in the MGWR model

对土壤侵蚀呈现正向的驱动作用。较高的人均地区生产总值反映了人们对产品和服务需求的增加,增加了土地压力,导致土地资源的利用和开发程度加剧,从而加剧了水土流失和土壤侵蚀的风险。根据环境库兹涅茨理论和前人的研究成果^[31],经济增长与环境之间的关系呈现“倒U型”曲线,本研究发现类似的结果,即经济增长到一定程度会减少土壤侵蚀。地区生产总值增长率在中国西南部地区对各地级市的土壤侵蚀速率起到明显的正向作用,表明经济的增长会拉动产品和服务需求增加,从而增大土壤侵蚀的风险,然而在位于京津冀地区的河北及其周边等经济高度发达的地级市,地区生产总值的增长会减少土壤侵蚀。此外,黄土高原地区经济的增长对土壤侵蚀也呈现明显的负向作用,可能的原因是这些地区属于环境脆弱地区,生态本底较差,土壤侵蚀风险较大,因此受到了水土保持相关部门的大量关注。该地区已经先后采取了多种水土保持措施,并且其中部分地区已经实施了生态补偿政策^[32],因此地区生产总值增长率在这些地区表现出对土壤侵蚀速率的抑制作用。

3 讨论

目前,传统的水土流失治理方案如植被恢复、坡

改梯工程、土地整治和改良等措施虽然有效缓解了土壤侵蚀问题,但其边际效益开始呈现下降趋势。本研究结合多源遥感数据和社会经济统计数据,估算了中国各地级市的土壤侵蚀速率,揭示了其较高的空间正相关性,并利用MGWR模型揭示了不同社会经济因素对土壤侵蚀速率驱动作用的异质性及作用尺度的差异性。

研究表明,土壤侵蚀的治理是一个系统的工程,不能局限于单一的工程视角,通过调整社会经济系统辅助治理土壤侵蚀可以提高土壤侵蚀防治效率^[6]。在中国东部发达地区如江苏、浙江等地,城市化过程中侵占了大量优质农田,在当前保证粮食安全的背景下造成了优质农田向边际土地转移的现象^[33],从而增加了土壤侵蚀的风险,因此建议在城市扩张过程中应注意避免侵占并严格保护优质耕地^[34],划分出永久农田并限制开发,加大力度严格禁止耕地占优补劣现象。此外,在生态脆弱的热点地区如黄土高原、云贵高原和四川盆地等区域,应该调整其产业结构避免其对农业的过度依赖,禁止在这些区域进行大规模的土地开垦和农用地扩张。在高度依赖农业的区域如东北地区、黄淮海平原等区域,建议进行土地整治^[35],发展大规模农业,避免农田分散和碎片化,进一步提高劳动力效率和资源利用效率,推动实

现可持续集约化。大规模耕作节省的农业劳动力将需求允许更多的劳动力投入土地规划和环境保护,在绿色道路下发展经济水平,从而进一步增加环境保护的财政投入。然而,由于社会经济数据在研究尺度下的可得性受到限制,本研究未考虑水利投入、林业投入以及小流域治理方面的更多潜在社会经济指标。这一局限性有望在未来更多地级市尺度上统计数据公开后得到解决。

综上所述,不同地区的经济产业结构、城镇化程度、农业生产方式和生态环境特征对土壤侵蚀具有显著影响。为了减少土壤侵蚀风险,需要加强科学的土地利用规划和管理,推广环保型农业生产方式,提高城市化过程中的土地保护意识,促进农业机械化与土壤保护的有机结合。考虑到不同地区土壤侵蚀存在的空间差异,未来的研究可以深入挖掘各地区的特点,充分考虑其独特的自然条件和社会经济结构差异。在制定土壤侵蚀防治措施时,应从传统的工程视角出发,同时兼顾社会经济系统的因素。这样的综合考虑能够制定更具针对性的政策,有助于缓解中国土壤侵蚀问题。

参考文献 Reference

- [1] MONTGOMERY D R. Soil erosion and agricultural sustainability[J]. PNAS, 2007, 104(33): 13268-13272.
- [2] QUINE T A, VAN OOST K. Insights into the future of soil erosion[J]. PNAS, 2020, 117(38): 23205-23207.
- [3] 张启旺, 安俊珍, 王霞, 等. 中国土壤侵蚀相关模型研究进展[J]. 中国水土保持, 2014(1): 43-46. ZHANG Q W, AN J Z, WANG X. Progress of study on China soil erosion correlation models[J]. Soil and water conservation in China, 2014(1): 43-46(in Chinese with English abstract).
- [4] ANANDA J, HERATH G. Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal[J]. Journal of environmental management, 2003, 68(4): 343-353.
- [5] STOCKING M A, MURNAGHAN N. A Handbook for the field assessment of land degradation[M]. London: Routledge, 2002.
- [6] LI K K, WANG L, WANG Z, et al. Multiple perspective accountings of cropland soil erosion in China reveal its complex connection with socioeconomic activities[J/OL]. Agriculture, ecosystems & environment, 2022, 337: 108083[2024-02-20]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108083>.
- [7] WANG L, YAN H, WANG X W, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, Southern China[J/OL]. CATENA, 2020, 194: 104678[2024-02-20]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104678>.
- [8] WANG B, ZENG Y, LI M J, et al. Evaluation of the driving effects of socio-economic development on soil erosion from the perspective of prefecture-level[J/OL]. Frontiers in environmental science, 2022, 10: 1066889[2024-02-20]. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1066889>.
- [9] 王刚, 张秋平, 郑海金, 等. 1987—2013年江西省水土流失趋势及其社会经济驱动力分析[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 115-120. WANG G, ZHANG Q P, ZHENG H J, et al. Temporal variation of soil and water loss and its social-economic driving forces in Jiangxi Province from 1987 to 2013[J]. Ecological science, 2017, 36(3): 115-120(in Chinese with English abstract).
- [10] WUEPPER D, BORRELLI P, FINGER R. Countries and the global rate of soil erosion[J]. Nature sustainability, 2020, 3: 51-55.
- [11] YU S X, XIE C Y, ZHAO J S, et al. Socioeconomic development mitigates runoff and sediment yields in a subtropical agricultural watershed in Southern China[J/OL]. Environmental research letters, 2021: 024053[2024-02-20]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdd5a>.
- [12] WANG Z, ZENG Y, LI C, et al. Telecoupling cropland soil erosion with distant drivers within China[J/OL]. Journal of environmental management, 2021, 288: 112395[2024-02-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112395>.
- [13] CUI H W, WANG Z, YAN H, et al. Production-based and consumption-based accounting of global cropland soil erosion[J]. Environmental science & technology, 2022, 56(14): 10465-10473.
- [14] ISTANBULY M N, KRÁSA J, JABBARIAN AMIRI B. How socio-economic drivers explain landscape soil erosion regulation services in Polish Catchments[J/OL]. International journal of environmental research and public health, 2022, 19(4): 2372[2024-02-20]. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042372>.
- [15] BHANDARI K P, ARYAL J, DARNSAWASDI R. A geo-spatial approach to assessing soil erosion in a watershed by integrating socio-economic determinants and the RUSLE model[J]. Natural hazards, 2015, 75(1): 321-342.
- [16] LIGONJA P J, SHRESTHA R P. Soil erosion assessment in *Kondoa* eroded area in Tanzania using universal soil loss equation, geographic information systems and socioeconomic approach[J]. Land degradation & development, 2015, 26(4): 367-379.
- [17] HALIM R, CLEMENTE R S, ROUSTRAY J K, et al. Integration of biophysical and socio-economic factors to assess soil erosion hazard in the Upper Kaligarang Watershed, Indonesia[J]. Land degradation & development, 2007, 18(4): 453-469.
- [18] 祝新明, 宋小宁, 冷佩, 等. 多尺度地理加权回归的地表温度降尺度研究[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1749-1766. ZHU X M, SONG X N, LENG P, et al. Spatial downscaling of land surface temperature with the multi-scale geographically

- weighted regression [J]. *National remote sensing bulletin*, 2021, 25(8): 1749-1766 (in Chinese with English abstract).
- [19] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83. SHEN T Y, YU H C, ZHOU L, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity[J]. *Economic geography*, 2020, 40(3): 75-83 (in Chinese with English abstract).
- [20] 乔磊, 张吴平, 黄明镜, 等. 基于MGWRK的土壤有机质制图及驱动因素研究[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(9): 1830-1844. QIAO L, ZHANG W P, HUANG M J, et al. Mapping of soil organic matter and its driving factors study based on MGWRK [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2020, 53(9): 1830-1844 (in Chinese with English abstract).
- [21] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. New York: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [22] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐, 等. 基于RUSLE模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3473-3485. LI J L, SUN R H, XIONG M Q, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China [J]. *Acta ecologica sinica*, 2020, 40(10): 3473-3485 (in Chinese with English abstract).
- [23] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J/OL]. *Nature communications*, 2017, 8(1): 2013 [2024-02-20]. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- [24] XIONG M Q, SUN R H, CHEN L D. Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling [J]. *Progress in physical geography: earth and environment*, 2019, 43(3): 391-409.
- [25] MORAN P A P. Notes on continuous stochastic phenomena [J]. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [26] FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C, CHARLTON M. *Quantitative geography: perspectives on spatial data analysis* [M]. London: Sage Publications, 2000.
- [27] FOTHERINGHAM A S, YANG W B, KANG W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) [J/OL]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265 [2024-02-20]. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1352480>.
- [28] YU H C, FOTHERINGHAM A S, LI Z Q, et al. Inference in multiscale geographically weighted regression [J]. *Geographical analysis*, 2020, 52(1): 87-106.
- [29] HASTIE T J. *Generalized additive models* [M]. London: Statistical Models in Routledge, 2017: 249-307.
- [30] SONDEREGGER T, PFISTER S. Global assessment of agricultural productivity losses from soil compaction and water erosion [J]. *Environmental science & technology*, 2021, 55(18): 12162-12171.
- [31] CAO B W, YU L, NAIPAL V, et al. A 30 m terrace mapping in China using Landsat 8 imagery and digital elevation model based on the Google Earth Engine [J]. *Earth system science data*, 2021, 13(5): 2437-2456.
- [32] 何琴. 跨省流域生态补偿法律制度探究: 以赤水河流域治理为例 [J]. *四川环境*, 2023, 42(3): 249-256. HE Q. Research on the legal system of ecological compensation in cross-provincial watershed: taking the Chishui River Basin management as an example [J]. *Sichuan environment*, 2023, 42(3): 249-256 (in Chinese with English abstract).
- [33] KUANG W H, LIU J Y, TIAN H Q, et al. Cropland redistribution to marginal lands undermines environmental sustainability [J/OL]. *National science review*, 2022, 9(1): nwab091 [2024-02-20]. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab091>.
- [34] KONG X B. China must protect high-quality arable land [J/OL]. *Nature*, 2014, 506(7486): 7 [2024-02-20]. <https://doi.org/10.1038/506007a>.
- [35] DUAN J K, REN C C, WANG S T, et al. Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China [J]. *Nature food*, 2021, 2: 1014-1022.

Analyzing socio-economic spatial factors driving soil erosion in China based on multi-scale geographically weighted regression model

LI Keke¹, ZHOU Zhanhang^{2,3}, WANG Zhen^{1,3}

1. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

3. *Interdisciplinary Research Center for Territorial Spatial Governance and Green Development, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Soil erosion poses a threat to food security and ecosystem services, and is one of the severe environmental problems facing China. It is affected by both natural factors and human activities. At present, a large number of studies in China have focused on the driving effect of socio-economic factors on soil erosion, but there are still insufficient in studying the spatial non-stationary relationship between the two and paying attention to the scale differences of affecting factors. 346 prefecture-level cities in China were used to study the complex driving mechanisms of socio-economic activities on soil erosion. The soil erosion prediction (RUSLE) model and multiscale geographically weighted regression (MGWR) model were used to investigate the spatial heterogeneity of soil erosion in various cities in China using 2017 as a reference year. The spatial driving effects of socio-economic factors on rates of soil erosion in prefecture-level cities across China and the differences in the scale of action between factors were studied. Results showed that the spatial distribution of the rate of soil erosion in various prefecture-level cities in China had a significant positive spatial correlation. Hotspots of soil erosion were mainly distributed in the west, northeast, the Yunnan-Guizhou Plateau, Sichuan Basin and the Loess Plateau. Compared with models based on global regression and traditional geographically weighted regression models, MGWR significantly improved the explanatory power of socio-economic variables on the rate of soil erosion, with a model fitting goodness of 0.87. From the perspective of driving factors, the direction of the effect of each driving factor on the rate of soil erosion in various prefecture-level cities in China had structural differences with changes of spatial location except for the factor of regional gross domestic product per capita. On average, population density was the factor contributing the most to the rate of soil erosion in various prefecture-level cities in China. The rate of soil erosion in prefecture level cities in China was more susceptible to the influence of multiple cropping indices in the western region, while the driving mechanism of socio-economic factors on the rate of soil erosion in the eastern region was more complex, and the spatial scale differences of different driving factors were more obvious. It is indicated that decision makers should fully consider the spatial heterogeneity of the impact of human activities on soil erosion to achieve the sustainable development of soil and water conservation.

Keywords soil erosion; soil erosion preparation model; revised universal soil loss equation; multiscale geographically weighted regression model; socio-economic factors; patial non-stationarity

(责任编辑:陆文昌)