

# 黑龙江省牡丹江市水土保持生态服务功能时空分异

刘沛显<sup>1</sup>, 刘莹<sup>1</sup>, 李铁男<sup>2</sup>, 李恩重<sup>3</sup>

(1.黑龙江大学 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2.黑龙江省水利科学研究所,  
黑龙江 哈尔滨 150080; 3.黑龙江省水投林海水库供水工程管理有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

**摘要:** [目的] 基于生态优先视角构建牡丹江市水土保持生态服务功能组成, 探究区域土壤保持、水土保持碳汇、水质净化能力的时空分异特征及权衡与协同关系, 核算区域水土保持生态服务强度, 为维持区域生态稳定、保障农业可持续发展、提升水文连通与水体质量等提供科学依据。[方法] 使用 SWAT 模型对牡丹江市进行主流域与子流域划分, 考虑土地利用变化驱动下通过 InVEST 模型对 2002, 2012 和 2022 年各流域水土保持生态服务功能(土壤保持、水土保持碳汇、水质净化)进行定量评价与时空变化分析, 使用 Geoda 软件在格网尺度下对土壤保持等功能进行双变量空间自相关分析, 研究各项服务功能间的权衡与协同及其时序变化, 最终结合数值与权重核算牡丹江市水土保持生态服务强度, 并利用地理探测器解释降水、DEM 等因素对各项服务功能的贡献。[结果] 牡丹江市土壤保持与水土保持碳汇成协同关系, 水质净化与水土保持碳汇、土壤保持均呈权衡关系, 研究时段内区域水土保持生态服务强度各年均值为 0.327 5, 0.325 6 和 0.332 7, 呈先微降后上升趋势。[结论] 牡丹江市水土保持生态服务功能较研究初期得到提升, 绥芬河水系区域均值表现优于其他区域, 牡丹江水系区域对总量贡献上最大, 服务功能的时空分异特性受降水、地形、土地利用变化、植被覆盖等多因素影响。

**关键词:** 水土保持生态服务功能; InVEST 模型; 权衡与协同; 聚类分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0357-13

中图分类号: X196, S157.1

**文献参数:** 刘沛显, 刘莹, 李铁男, 等. 黑龙江省牡丹江市水土保持生态服务功能时空分异[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 357-369. Liu Peixian, Liu Ying, Li Tienan, et al. Spatiotemporal differentiation of soil and water conservation ecological service function in Mudanjiang City, Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 357-369. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.037; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.037.

## Spatiotemporal differentiation of soil and water conservation ecological service function in Mudanjiang City, Heilongjiang Province

Liu Peixian<sup>1</sup>, Liu Ying<sup>1</sup>, Li Tienan<sup>2</sup>, Li Enzhong<sup>3</sup>

(1.College of Water Resources and Electric Power, Heilongjiang University,

Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2.Heilongjiang Provincial Water Conservancy

Science Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 3.Heilongjiang Water Investment

Linhai Reservoir Water Supply Engineering Management Company Ltd., Mudanjiang, Heilongjiang 157000, China)

**Abstract:** [Objective] The functional composition of the soil and water conservation ecological services in Mudanjiang City, Heilongjiang Province, China, was constructed from the perspective of ecological priority. The spatiotemporal differentiation characteristics, tradeoffs and synergies of regional soil conservation, carbon sink of soil and water conservation, and water purification capacity were explored, and the intensity of regional soil and water conservation ecological services was calculated, providing scientific basis for maintaining regional ecological stability, ensuring the sustainable development of agriculture, and improving hydrological connectivity and water quality. [Methods] The main watershed and sub-watershed of Mudanjiang City were divided using the SWAT model, and the soil and water conservation ecological service functions (soil conservation,

收稿日期: 2024-08-08

修回日期: 2024-10-17

采用日期: 2024-10-18

资助项目: 2022 年度黑龙江省经济社会发展重点研究课题“黑龙江实现‘幸福河湖’目标路径研究”(22241); 横向课题“黑龙江省牡丹江市林海水库工程林海水库水文预报与风险调控关键技术研究”(LHSK-KYHT02-2024)

第一作者: 刘沛显(2002—), 男(汉族), 黑龙江省伊春市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、水生态价值转换。Email: liupeixian298@163.com.

通信作者: 刘莹(1980—), 女(满族), 黑龙江省哈尔滨市人, 副教授, 主要从事水文水资源方向研究。Email: liuyingzjb@163.com.

carbon sink of soil and water conservation, and water quality purification) were quantitatively evaluated and analyzed in terms of space and time in each watershed for 2002, 2012, and 2022 using the InVEST model. The soil conservation function was analyzed using bivariate spatial autocorrelation analysis at the grid scale based on the Geoda software. We studied the tradeoff and synergistic relationships between the different service functions and their temporal changes and calculated the ecological service intensity of soil and water conservation in Mudanjiang City by combining numerical and weighting methods. The contributions of rainfall and the digital elevation model to each service function were explained using geographic detectors. [Results] The soil conservation and soil and water conservation carbon sink functions in Mudanjiang City exhibit a synergistic relationship, whereas the water quality purification function exhibits tradeoff relationships with both the soil and water conservation carbon sink and soil conservation functions. The average ecological service intensities of soil and water conservation in 2002, 2012, and 2022 were 0.327 5, 0.325 6, and 0.332 7, respectively, showing a slight decrease followed by an increase. [Conclusion] The soil and water conservation ecological service functions in Mudanjiang City improved compared to the case in the initial study period, with the average value in Suifenhe River basin being better than those in other regions and Mudanjiang River basin contributing the most to the total. The spatiotemporal heterogeneity characteristics of the service functions are affected by precipitation, topography, land use change, and vegetation coverage.

**Keywords:** soil and water conservation ecological service function; InVEST model; tradeoffs and synergies; cluster analysis

生态系统服务在保障人类正常生产生活、维持环境稳定、减缓人地冲突等方面具有不可替代的作用,其中调节服务的重要性显得尤为突出<sup>[1]</sup>。随研究领域的拓宽与深入,生态系统服务研究体现出由单项服务向综合服务<sup>[2]</sup>转变、由静态年向时空动态分析转变<sup>[3]</sup>、由实物量与价值量核算<sup>[4]</sup>向生态系统服务的权衡与协同<sup>[5]</sup>转变等特点,并在流域<sup>[6]</sup>、城市群<sup>[7]</sup>、县域<sup>[8]</sup>、特定地类单元<sup>[9]</sup>得到广泛应用。水土保持领域作为新时代水利工作重要组成部分,拥有不可忽视的生态服务能力,集成了多项调节服务功能,在现有研究中发展出相对成熟的以物联网技术、遥感测绘、大数据分析、机器学习等智能化和信息化为监测与核算的应用手段。

根据中国水土保持工作的基本情势,莫沫等<sup>[10]</sup>结合“加快发展水利新质生产力,拓展探索水生态产品价值实现路径”要求与水土保持工作现状,提出新时代水土保持工作领域应遵循可持续发展、绿色发展、循环发展的新发展理念,重点围绕水土流失规律与水沙关系、水土保持碳汇与减少面源污染等方向,加强水土保持基础研究和关键技术攻关。近年来,在水土保持各项生态服务方面,曹文洪等<sup>[11]</sup>针对内涵与测算方法进行了研究。李智广等<sup>[12]</sup>构建了区域水土保持碳汇能力评估指标体系。李威等<sup>[13]</sup>针对水质分析与污染物流向等领域的观察试验研究、景观变化与水质响应、机理模型(SWAT, HSPF, SPLM 等)等相关研究方法进行评述。

当前,水土保持所涉及的单项调节型生态服务已得到广泛研究。在各指标方面,土壤保持主要应用改进后土壤流失方程(RUSLE);水土保持碳汇量核算主要是基于地类划分下的固碳速率法,部分存在碳汇重复计量、因子未经修正、地类划分不易识别等导致的数据精度粗糙等问题;水质分析领域常用的机理模型克服了输出系数与经验型模型的缺陷,但在流域较广的评价尺度上,其普适性与非点源污染迁移机制上表现不足。

鉴于当前研究在特定区域集成多指标综合评价水土保持生态服务强度及各指标间的权衡与协同方向上较少,结合牡丹江市耕林交错地带广布,市域整体水土保持生态服务功能探索尚处于起步阶段,本文整合自然本底条件与人工修复成效,以土壤保持、水土保持碳汇、水质净化为水土保持生态服务指标,综合考量指标间的权衡与协同,选取 InVEST 模型下的泥沙输移比(SDR)、碳储存(CS)、养分输移比(NDR)3个计算模块<sup>[14-16]</sup>,经模型内参数修正等工作实现牡丹江市水土保持生态服务功能评价及时空动态分析,为全域水利工作建设与生态产品价值实现提供理论依据与科学参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

牡丹江市位于黑龙江省东南部,为省辖地级市,总面积  $3.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,市域地处长白山余脉老爷岭和张广才岭之间,火山岩、碎屑岩形成南北向断裂,

构成了主要贮水构造带。境内有三大水系,即牡丹江水系、穆稜河水系、绥芬河水系,该市多年平均地表水资源量为  $8.69 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,人均占有地表水资源量  $3\ 200 \text{ m}^3$ ,高于全国和黑龙江省的平均水平。区域属中温带大陆性季风气候,全年四季分明、空气湿润、植物茂盛,年平均气温  $5.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。主要土壤有暗棕壤、白浆土、黑土、草甸土、沼泽土、水稻土、火山灰土等 7 类,沿江河两岸的湿地多为腐殖质沼泽土。据国家水土保持分区与黑龙江省水土保持公报,牡丹江市在省水土保持区划三级区中属于东南部山地水源涵养减灾区与山地丘陵水质维护保护区,水土流失类型均为水力侵蚀。

## 1.2 数据来源

研究区数字高程模型(DEM)下载于地理空间数据云(www.gscloud.cn),空间分辨率为  $30 \text{ m}$ ,由高程数据在 InVEST 模型中生成坡度坡长( $LS$ )与连通性指数(IC)。降水数据来自中国  $1 \text{ km}$  分辨率逐月降水量数据集<sup>[17]</sup>,经裁剪与处理形成观测年降水量,用以计算降雨侵蚀力因子( $R$ )值。土壤数据结合中国特征土壤数据集(geodata.pku.edu.cn)建立牡丹江市土壤数据库,复合全国水利普查中土壤可蚀性栅格数据成果预处理获得。土地利用数据源于中国科学院空天信息创新研究院发布的土地覆盖动态监测数据集<sup>[18]</sup>,将研究区包含的 24 种地类重分类为 8 个地类,数据精度为  $30 \text{ m}$ ,满足本研究需要。

## 1.3 研究方法

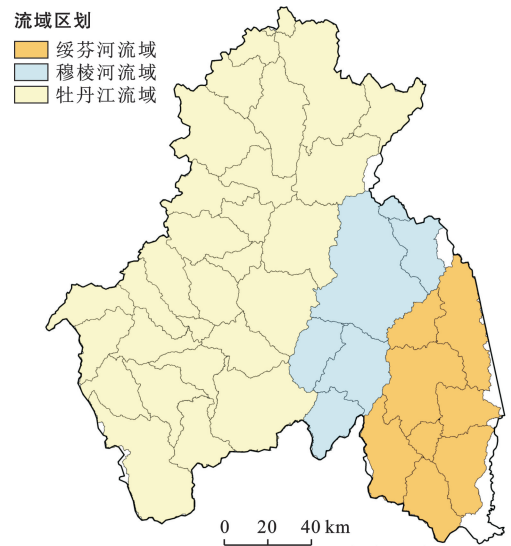
1.3.1 流域划分 对研究范围应用 SWAT 模型子流域划分模块,经过 DEM 数据导入、流向与流量确定、河网定义、进出水口确定等计算工作,将牡丹江市水文系统按实际域内 3 大流域(牡丹江、穆稜河、绥芬河)构建子流域边界。研究区内共划分 3 个主流域,为牡丹江流域牡丹江市段( $A_1$ )、穆稜河流域牡丹江市段( $A_2$ )、绥芬河流域牡丹江市段( $A_3$ ),以及 43 个子流域,同时按牡丹江市实际行政区划边界与流域边界进行复合,填补边界区空值,以划定的各子流域作为独立统计单元进行氮(N)与磷(P)的输出量表征(图 1)。

1.3.2 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵<sup>[19]</sup>是国土资源领域研究用地变化的基础方法,可以在一定地理空间范围内表征不同时期下的各地类时空演变过程,形式上用二维矩阵定量化描述初期与末期间地类面积固持与转移的动态转化情况。选取 2002, 2012, 2022 年 3 个观测时间断面(图 2),将获取的牡丹江市土地覆盖类型划分为 8 个一级地类(耕地、林地、草地、灌木、湿地、水域、裸地、建筑用地)并统计年

际变化,将其作为进一步 InVEST 模型的 SDR, CS, NDR 模块的基础数据,并为分析水土保持功能中的各变量演变规律提供支撑,辅助刻画在不同年份下的分布格局,其矩阵数学表达式为:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P$  为土地利用转移汇总; $n$  为土地利用类型数; $P_{ij}$  为第  $i$  类土地转化为第  $j$  类土地利用面积或百分比。



注:由于本研究流域边界与流域内县区边界不完全一致,导致图中的两类边界线条不完全重合。下同。

图 1 牡丹江市流域划分

Fig.1 Watershed division of Mudanjiang City

1.3.3 InVEST 模型 InVEST 模型自 2007 年研发面世后,被国内外学者广泛用于生态系统评估等方面的研究。模型基于 GIS 平台进行数据处理,模型内运行独立栅格数据并经空间统计工具整合,以栅格数据形式自动输出结果,具有数据需求量少,操作简便,输出数据量大,精度高等特点,是一种以地表覆盖变化为主要驱动的生态系统服务高效研究平台。

(1) 土壤保持模块。土壤保持模块以高程、降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、土地利用数据等作为驱动因子,利用修正后通用土壤流失方程(RUSLE)在像元尺度上进行核算,得到潜在与实际土壤流失量、连通性指数(IC)、泥沙输移比(SDR)等结果。土壤保持量的计算公式为:

$$S_C = S_{RKLs} - S_{USLE} + S_R \quad (2)$$

$$S_{RKLs} = R \cdot K \cdot LS \quad (3)$$

$$S_{USLE} = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4)$$

$$SDR = SDR_{\max} \times \left[ 1 + \exp\left(\frac{IC - IC_0}{k_1}\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

$$IC = \lg\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) \quad (6)$$

式中： $S_C$ 、 $S_{RKLS}$ 、 $S_{USLE}$ 、 $S_R$ 、 $SDR$  分别为土壤保持量、潜在土壤流失、实际土壤流失、泥沙持留量、泥沙输移比； $R$ 、 $K$  因子分别利用章文波等<sup>[20]</sup>提出的降雨量法

和 Williams 等<sup>[21]</sup>建立的 EPIC 模型进行整合计算， $LS$  数据由导入到 InVEST 模型中的 DEM 数据自动生成； $C$  因子为植被覆盖与作物管理因子，由归一化植被指数 (NDVI) 整合计算得来； $P$  为土壤保持措施因子； $D_{up}$ 、 $D_{dn}$  为地块上坡面积和距离最近溪流之间的流动路径； $IC_0$ 、 $k_1$  为模型内设置与调整参数。同时依据河流泥沙公报对参数进行校核。

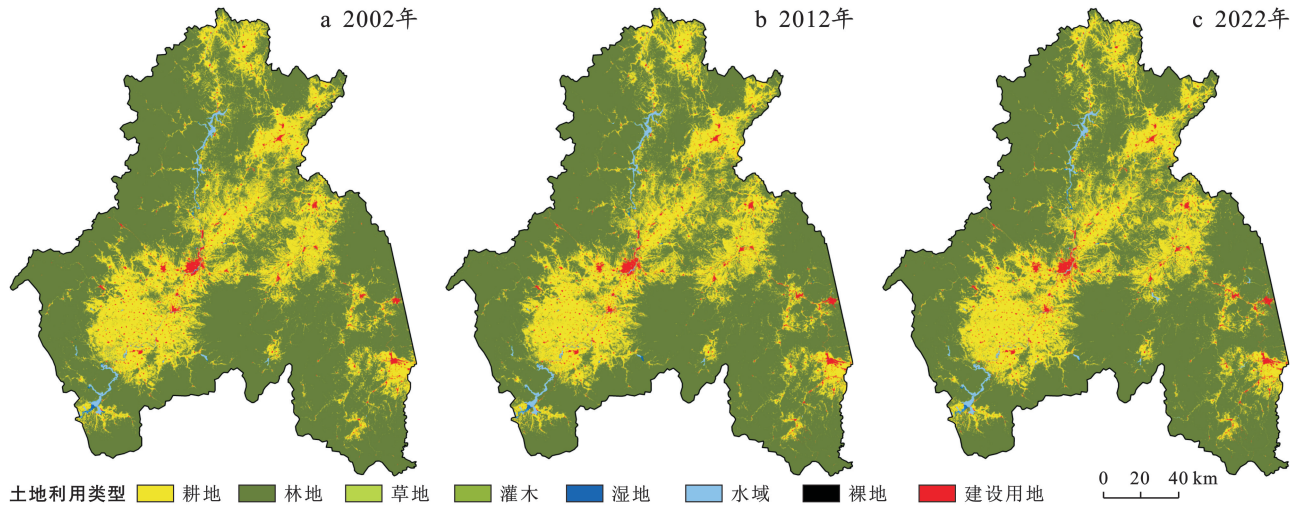


图 2 牡丹江市土地利用类型分布

Fig.2 Distribution of land use types in Mudanjiang City

(2) 碳储存模块。碳储存模块通过输入核算年土地覆盖分布与建立的本地碳库，对该年度区域总碳储量进行定量评估计算。区域碳储量计算包含地上碳储量(土层上部植被躯干与凋落的部分)、地下碳储量(根系)、土壤与凋亡有机质碳储量。通过数据收集与文献查阅，利用年降雨量对全国均值修正后的松花江流域生物碳密度与土壤碳密度值进行计算(表 1)。针对文献中缺失的湿地碳密度，引用李朝晖与邢伟等<sup>[22-23]</sup>对黑龙江省典型泥炭沼泽碳储量研究成果，使用位于牡丹江的小北湖湿地斑块碳密度进行补充。基于此计算方法，引入定量分析的土壤保持能力，利用土地利用数据包含的耕地、林草、水域等各地类，在涵盖植被与耕地碳汇过程同时，表征出水土保持对区域保土固碳与减蚀成效对土壤碳汇的贡献。计算公式为：

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (7)$$

$$C_{SC} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + I_{SC} \times C_{\text{soil}} \quad (8)$$

$$I_{SC} = \frac{S_C}{S_{RKLS}} \quad (9)$$

式中： $C$  为流域生态系统总碳储量； $C_{SC}$  为水土保持碳汇量； $C_{\text{above}}$ 、 $C_{\text{below}}$ 、 $C_{\text{soil}}$ 、 $C_{\text{dead}}$  分别为地上碳储量、地下碳储量、土壤与凋亡有机质碳储量； $I_{SC}$  为定量分析下的土壤保持能力。

表 1 牡丹江市各土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of land use types in Mudanjiang City

土地利用类型	碳密度/(t·hm <sup>-2</sup> )			
	地上	地下	土壤	凋亡有机质
耕地	7.32	34.73	101.87	4.23
林地	18.24	49.87	149.24	6.07
草地	15.19	37.22	93.89	3.13
灌木	3.42	1.62	91.70	3.48
湿地	10.25	24.37	254.46	1.57
水域	0.13	0	0	0
裸地	0.56	0	20.30	0
建筑用地	1.08	11.83	0	0

(3) 水质净化模块。水质净化模块广泛用于研究陆源 N、P 通过地表与地下水水力输移排放至河湖库区的动态过程模拟，输出结果含该流域 N、P 总负负荷量、对两种元素的截留能力以及迁移过程。径流输送能力通过年降雨量表征，元素负荷系数与截留效率结合牡丹江流域水质前人<sup>[24]</sup>研究成果与模型用户指南数据给定，由于研究区缺乏地下径流营养输移的科学系数(表 2)，研究过程中默认 N、P 均通过地表径流入河，计算公式为：

$$X_{\text{exptot}} = \sum_i X_{\text{exp},i} \quad (10)$$

$$X_{\text{exp},i} = \text{load}_{\text{surf},i} \times \text{NDR}_{\text{surf},i} \quad (11)$$

$$\text{NDR}_{\text{surf},i} = \text{NDR}_{0,i} \left[ 1 + \exp\left(\frac{\text{IC}_i - \text{IC}_0}{k_2}\right) \right]^{-1} \quad (12)$$

式中:  $X_{\text{exptot}}$  为流域营养元素总输出量;  $X_{\text{exp},i}$ ,  $\text{load}_{\text{surf},i}$ ,  $\text{NDR}_{\text{surf},i}$  分别为独立栅格单元元素输出量、地表元素负荷量与输移效率;  $\text{NDR}_{0,i}$  为元素最大持留率;  $\text{IC}_0$ ,  $k_2$  为模型输入校正系数;  $\text{IC}$  为连通性指数。

表 2 牡丹江市各土地利用类型 N, P 负荷系数与截留效率  
Table 2 N, P load coefficient and interception efficiency of each land use type in Mudanjiang City

土地利用类型	TN 负荷/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	TN 截留 效率 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	TP 负荷/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	TP 截留 效率
耕地	24.70	0.25	4.32	0.48
林地	6.50	0.35	0.76	0.60
草地	2.23	0.40	0.87	0.67
灌木	3.30	0.37	0.79	0.64
湿地	2.70	0.25	0.35	0.48
水域	0.01	0.05	0.01	0.40
裸地	6.20	0.12	0.55	0.26
建筑用地	8.50	0.12	3.20	0.26

1.3.4 空间自相关分析与地理探测器 空间自相关分析可以通过数据单元表征变量在固定的分布区域中潜在的空间联系,常用全局莫兰指数与局部莫兰指数对变量在空间上聚合与离散程度进行定量化描述,可以深度挖掘数据的趋同性与异质性并进行空间可视化,其中局部与 Moran' $I$  通过 LISA 聚类分布图进行刻画,分布图满足  $z$  检验 ( $\alpha = 0.05$ )。本文对土壤保持、碳储存、水质净化 3 项分别进行双变量空间自相关分析并生成聚类与 Moran' $I$ , 利用 Geoda 软件实现,并以相关系数为基础对 3 项生态服务功能进行赋权,组合形成水土保持生态服务强度,相关计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{S^2 (\sum_i \sum_j \omega_{ij})} \quad (13)$$

$$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j \omega_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (15)$$

式中:  $n$  为数据单元总数;  $x_i$  ( $x_j$ ) 为独立数据单元  $i$  ( $j$ ) 的测度值;  $(x_i - \bar{x})$  与  $(y_i - \bar{y})$  为第  $i$  个单元上测度值与平均值的偏差;  $\omega_{ij}$  为标准化的空间权重矩阵;  $S^2$  为方差。

地理探测器是针对类别型变量,探测其自变量对因变量的解释力或不同自变量间的交互作用,相较常规的线性相关分析方法,可以明确各变量的重要程度

以及揭示各变量间的非线性关系,在减少冗余变量的同时更利于发现复杂的因果关系结构,具体原理方法参见文献<sup>[25]</sup>。本文应用因子探测器与交互探测器,引入 SDR, NDR-P, NDR-N, Cs, IC, LS, R, DEM 共 8 项指标为自变量,以水土保持生态服务强度为因变量,对其空间分异特性进行解释。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤保持服务时空动态

利用 InVEST 模型对 2022 年数据输出结果调整参数,当流量阈值输入为 1 200,  $k_1$  (调整系数) 为 0.8 时,按 SDR 进行总量分配,显示数值模拟中研究区牡丹江水系泥沙入河量为  $1.75 \times 10^6$  t, 与中国河流泥沙公报 2022 中显示的牡丹江水文站实测值  $1.67 \times 10^6$  t 对比,相对误差小于 5%,将参数与各年数据分别输入模型中,生成区域 2002—2022 年土壤保持强度分布(图 3)。从时间尺度上,牡丹江市土壤保持强度呈现为先北后南再全局的动态特征,空间上至 2022 年全域土壤保持呈现西北—东南对角区域高值分布,表现为明显的区域不均衡性,总体为山地高于平原、林地高于耕地,且受降雨时空分配不均影响。3 a 间区域土壤保持强度均值分别为 73.39, 60.12 和 112.14 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 呈先微减后强增趋势。域内牡丹江水系区域 ( $A_1$  区) 变化趋势与总体一致,穆棱河水系区域 ( $A_2$  区) 与绥芬河水系区域 ( $A_3$  区) 呈逐年上升,  $A_1$ — $A_3$  区年平均土壤保持强度表现为 80.92, 67.85 和 86.17 t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。

### 2.2 水土保持碳汇时空动态

近 20 a 牡丹江市区域碳储量成微降趋势(图 4), 总量以 1.2%/10 a 递减,地类上碳储存能力体现为: 林地 > 草地 > 耕地,对全域碳储量贡献方面,林地 > 耕地 > 草地,湿地碳储能力显著,主要集中于西南部小北湖湿地斑块。区域水土保持碳汇变化与土壤保持强度分布一致,表现为小幅度先增后减,减幅小于增幅,2022 年土壤保持强度较 2002 年提升 1%,水土保持碳汇增量  $1.21 \times 10^5$  t。流域分区上,  $A_1$  区水土保持碳汇能力呈逐年增长状态,至 2022 年达到 169.38 t/ $\text{hm}^2$ ,  $A_2$ — $A_3$  区域碳储量表现为逐年微量下降,但在区域年均每 1  $\text{hm}^2$  碳储量表现为:  $A_3 > A_2 > A_1$ 。总量方面  $A_1$  区对牡丹江市整体贡献度最大,  $A_3$  区强于  $A_2$  区。

### 2.3 水质净化时空动态

利用 InVEST 模型结合子流域分区结果,使用总氮(TN)与总磷(TP)的入河量表征区域水质净化能力的强弱,入河量数值越高,水质净化能力越差,反之同理,并从流域单元视角解释 N, P 元素入河的时空分异。

牡丹江市 3 个观测年 TN 先减后增,与土壤保持情况相符,分别为 14 166.27,14 004.08 和 14 205.84 t,TP 变化趋势与 TN 一致,分别为 1 405.72,1 385.94 和 1 410.38 t。主流域 A<sub>1</sub>—A<sub>3</sub> 区年均 TN 排放强度分别为 3.887 2,3.738 1 和 2.915 9 kg/hm<sup>2</sup>,TP 年均排放强度分别为 0.393 1,0.373 5 和 0.263 2 kg/hm<sup>2</sup>。可见牡丹江市绥芬河水系在总区域内水质净化能力较

强。子流域分区方面,由图 5 可显示 TN 与 TP 排放高值区集中位于牡丹江市中部地区,以 A<sub>1</sub> 与 A<sub>2</sub> 区所含子流域为主,比对土地利用可知高值区与耕地、建设用地分布高度吻合。时间尺度变化下,牡丹江市西南部 TN 与 TP 排放减弱,中西部地区排放增强,显著高值区在行政区划上属宁安市东北部与林口县南部,均为耕地密集区域。

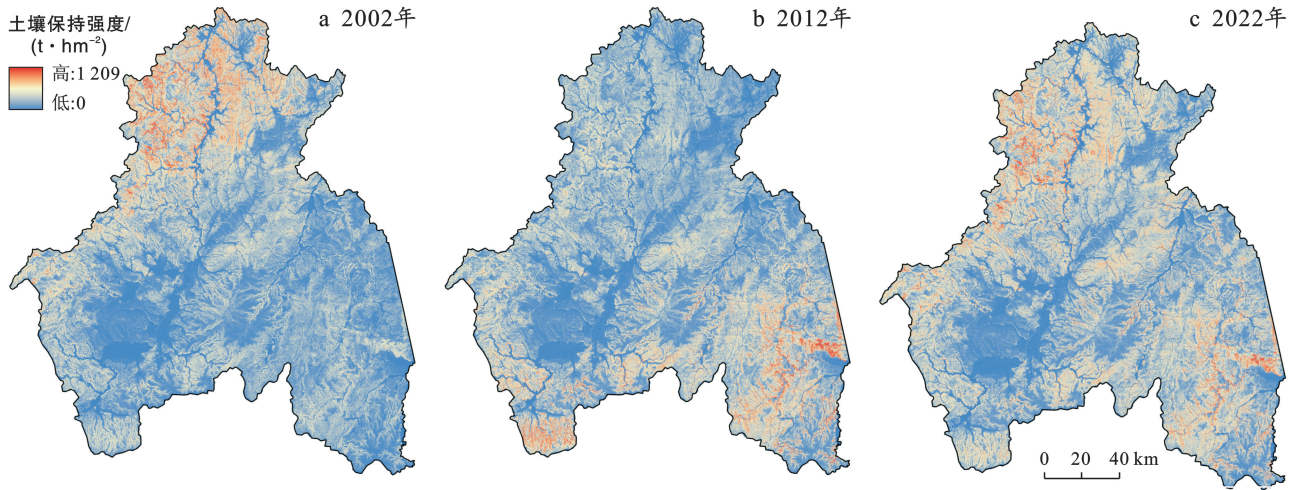


图 3 牡丹江市土壤保持强度分布

Fig.3 Distribution of soil conservation intensity in Mudanjiang City

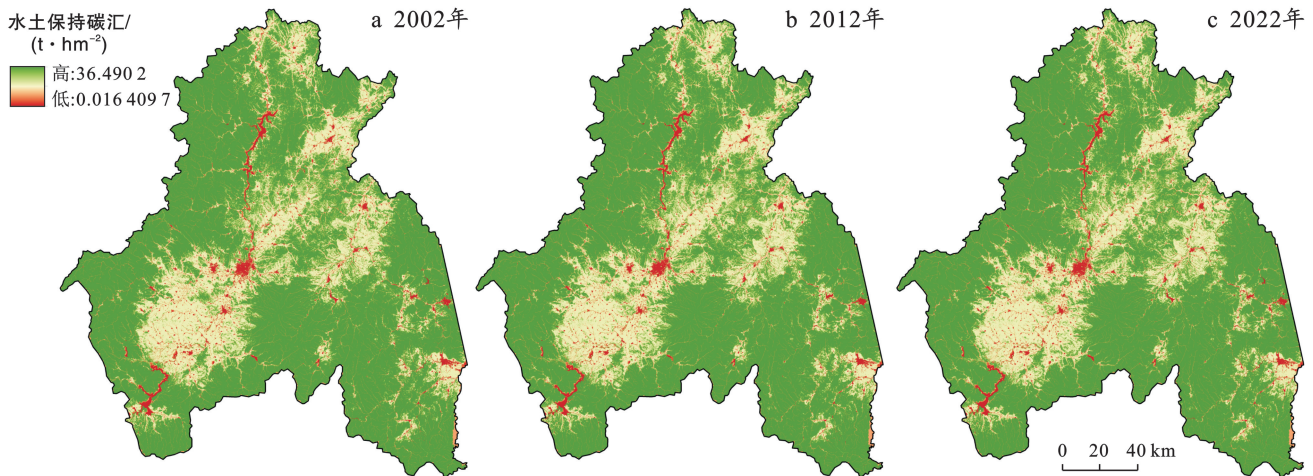


图 4 牡丹江市水土保持碳汇分布

Fig.4 Carbon sink distribution of soil and water conservation in Mudanjiang City

## 2.4 水土保持生态服务功能时空动态分析

2.4.1 土地利用转移分析 从各地类总体变化上来看,耕地面积逐年下降,2022 年现值对比 2002 年累计减少约 2.1%;林地面积先升后微降,总量较初始年略微上升;草地、灌木、水域、裸地与建设用地逐年上升,建设用地变化最为显著,2002—2012 年面积增长约 10.7%,2012—2022 年增幅下降为 3.9%,总增长面积达到 86.58 km<sup>2</sup>;湿地面积萎缩明显,萎缩率约

19.1%,呈下降后基本稳定状态。由表 3 和图 6 可见,牡丹江市林地、耕地、建设用地间的转化较为显著,生产生活空间与生态空间的冲突依然存在,不容忽视。在总研究时段内,牡丹江市近 20 a 生态地类面积增加 99.72 km<sup>2</sup>,人造地表面积减少 116.41 km<sup>2</sup>,各地类面积与分布变化受经济社会发展(人口、三产等)与生态保护政策(退耕还林还草、禁止围垦等)共同作用,体现出较强的时空分异特性。

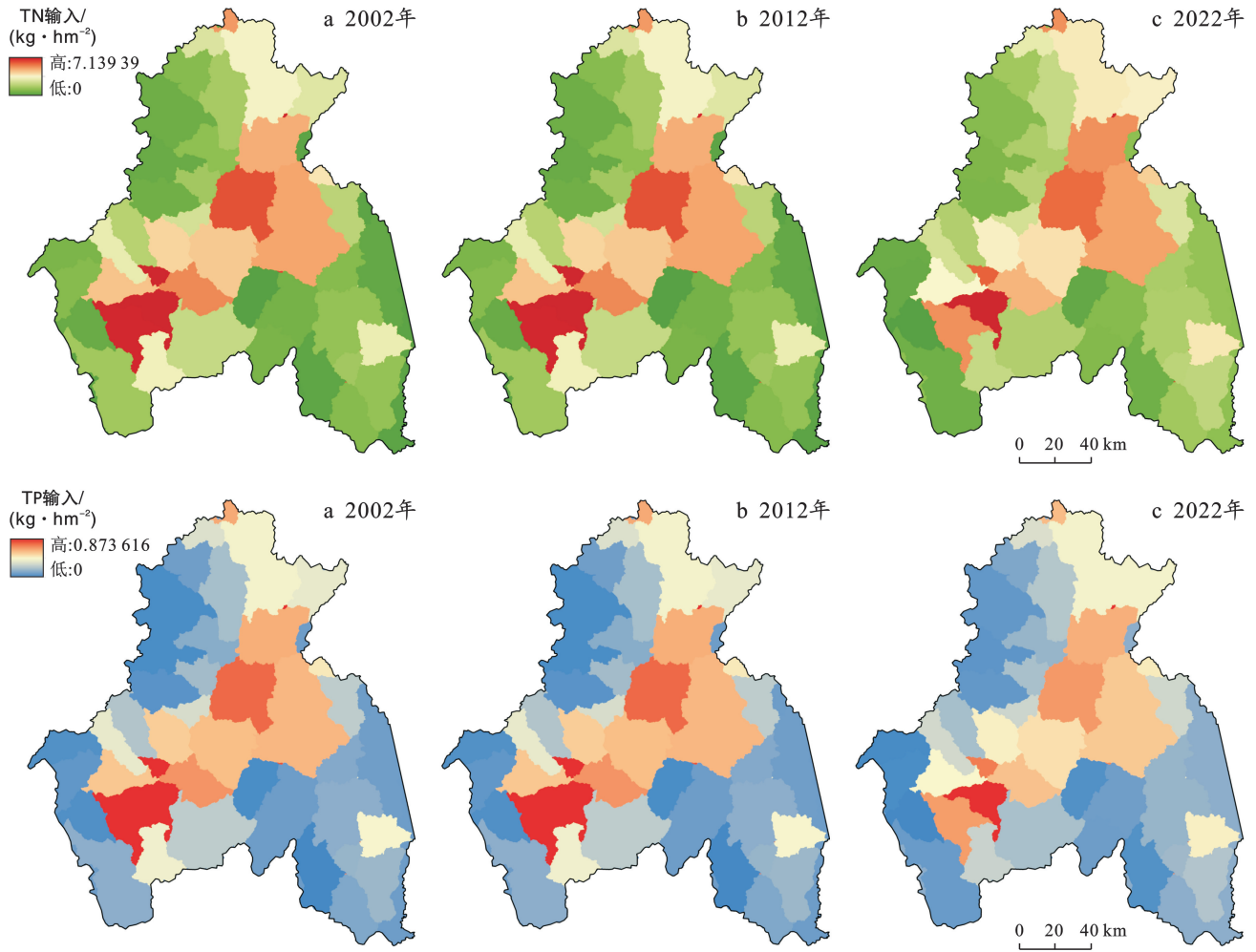


图 5 基于流域视角的牡丹江市 TN, TP 排放强度分布

Fig.5 Total N and total P emission intensity distribution from perspective of watersheds in Mudanjiang River basin

表 3 牡丹江市 2002—2022 年土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix of Mudanjiang City from 2002 to 2022

km<sup>2</sup>

土地利用类型	2022 年面积								
	耕地	林地	草地	灌木	湿地	水域	裸地	建筑用地	合计
耕地	8 840.20	587.03	17.19	1.58	6.13	15.63	0.82	139.73	9 608.30
林地	460.16	27 720.44	17.90	1.37	3.40	7.25	0.42	17.24	28 228.19
草地	6.71	13.32	19.08	0.11	0.12	0.06	0	0.15	39.56
灌木	0.37	0.55	0.15	0.71	0	0.01	0	0.01	1.79
湿地	21.87	4.72	0.35	0	47.61	21.64	0.20	1.65	98.05
水域	5.66	1.65	0.06	0	21.03	239.61	0.17	1.48	269.67
裸地	0.35	0.13	0	0	0.24	0.56	0.49	0.04	1.81
建筑用地	70.03	1.60	0.06	0.01	0.75	1.26	0.04	503.21	576.96
合计	9 405.35	28 329.45	54.79	3.79	79.29	286.00	2.14	663.52	38 824.33

2.4.2 权衡与协同分析 在牡丹江市区划范围内使用 ArcGIS 10.8 中渔网工具划分 3.5 km×3.5 km 尺度网格 3 170 个,将水土保持功能所属的土壤保持、水土保持碳汇、水质净化能力(总负荷量与入河量差值)分别赋值给网格单元,其中由于 N, P 的时空演变规律基本一致,以 N 的固持能力统一体现区域水质

净化能力,以此研究三者间双变量下的全局自相关与局部聚类情况,各年份的功能间的 Moran'I 与聚类分析结果如表 4 与图 7 所示。高高聚集与低低聚集分别表示双变量同增与同减,低高聚集与高低聚集分别代表双变量间此消彼长与此长彼消。

研究表明土壤保持与水土保持碳汇总体呈协同

关系,随时序变化下逐年增强,高高聚集在区域西部呈现为沿边界范围的密集状态,聚集强度呈先降后升,土地利用类型为海拔较高的林地,近 20 a 内增量主要在  $A_3$  区,体现为总体由权衡向协同转变,低高聚集减少,高高聚集增加, $A_2$  区与  $A_3$  表现趋势相同。低低聚集主要集中于中北部地区,地类表现为耕地与部分建设用地;水质净化与水土保持碳汇总体呈权衡关系,权衡强度逐年下降,分布随年际变化不大。林草区 N, P 元素的基底值弱于耕地,在总固持量上相比强度较弱,而其碳储量均值高于耕地,导致权衡关系分布体现为低高聚集的区域主要为海拔较高的山地林区,高低聚集区域主要为地势平坦的耕作区;水土保持与水质净化总体呈权衡关系,在区域内部体现

出微量协同关系,低低聚集沿边界范围集中在山地丘陵区与平原区交错地带,为地形变化与土地利用共同作用,高高聚集主要体现耕地范围内部,可能与区域种植结构调整、坡耕改良等措施有关。

表 4 水土保持生态服务功能的权衡与协同  
Table 4 Trade-off and synergy of ecological service function of soil and water conservation

年份	水土保持与 水土保持碳汇	水质净化与 水土保持碳汇	水土保持与 水质净化
2002	0.339	-0.637	-0.341
2012	0.435	-0.626	-0.416
2022	0.474	-0.620	-0.423

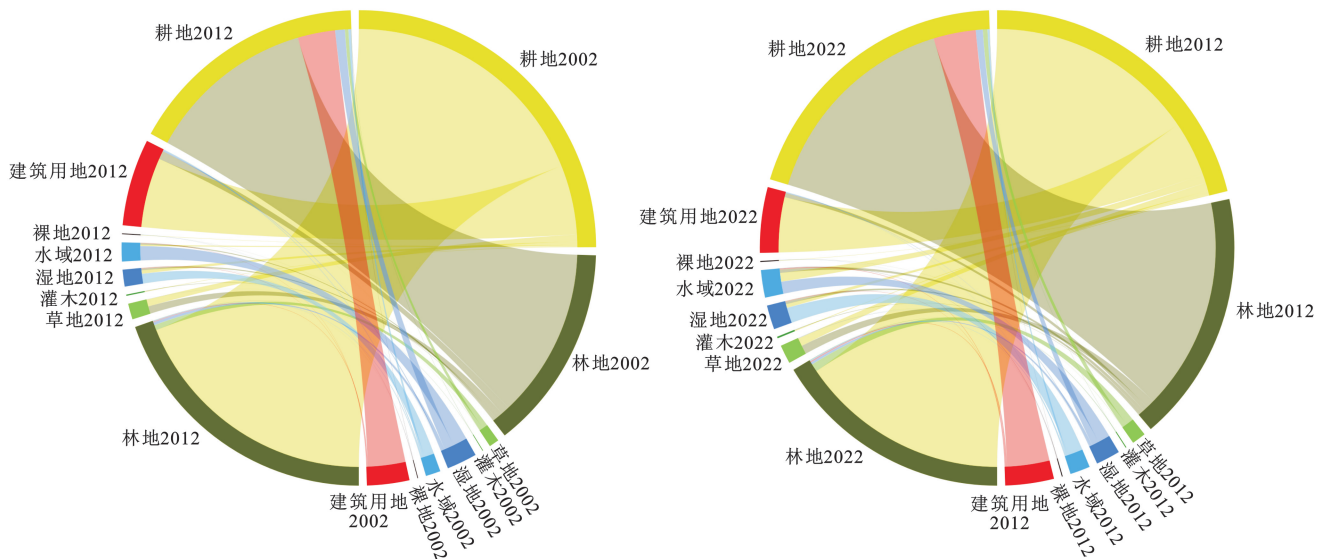


图 6 牡丹江市 2002—2022 年土地利用转移强度

Fig.6 Land use transfer intensity in Mudanjiang City from 2002 to 2022

2.4.3 水土保持生态服务强度 结合水土保持、水土保持碳汇、水质净化 3 种服务功能间的权衡与协同关系,对相关系数与功能数值分别进行标准化与归一化处理,得到水土保持生态服务功能中水土保持、水土保持碳汇、水质净化的权重分别为 0.421 8, 0.381 4 和 0.196 8,利用 GIS 平台对 3 个观测年份的各功能数值进行赋权加和计算,核算得出 2002—2022 年牡丹江市水土保持生态服务强度,像元视角理论值域为  $[0, 1]$ , 2002—2022 年区域水土保持生态服务强度均值分别为 0.327 5, 0.325 6, 0.332 7。为直观展示数据分布,以流域视角进行分区统计,结果如图 8 所示。由图 8 可知,时序变化至 2022 年显示高值区分布于牡丹江市西北部与东南部,中值与低值主要集中于中部地区,综合对比可知,水土保持生态服务功能  $A_3$  区优于其他主流域。

2.4.4 单因子与交互探测 利用 GIS 在牡丹江市区

划范围内随机生成 1 000 个点位并呈正态分布,利用提取栅格数据至点工具,将 SDR, CS, NDR 等自变量与水土保持生态服务强度 3 期观测年均值数据提取至随机点,使用自然间断点法对数据进行预处理后进行地理探测器分析,结果如图 9 所示。各因素重要程度占比由高到低排序为:  $LS > CS > DEM > NDR-p > NDR-N > SDR > IC > R$ , 除  $R$  外均满足  $p < 0.05$  检验。交互探测结果显示各因素间交互作用均表现为双因子增强或非线性增强,其中  $CS$  与  $LS$  间交互  $q$  值最高,达到约 0.94,充分表明了地形与植被空间分布对区域水土保持生态服务强度的重要影响。据《黑龙江省水利统计年鉴 2022 年》,截至 2022 年末牡丹江市实施小流域治理、水土保持林、封禁治理等措施累计治理覆盖各程度水土流失面积 6 196.7  $\text{km}^2$ ,取得了显著成效。综合土地利用与实际高程可见在牡丹江市海拔较高地区林草广泛分布,降雨是支撑其生

态系统服务的关键因素,相关研究<sup>[26]</sup>表明适量降雨可以增加其植被盖度与生物量,从而提高碳汇能力,但由于水土保持生态服务结构相对复杂且降雨强度

变化及其时空分配与微气候响应系统较为繁复,导致降雨因素在衡量生态系统服务或土地利用结构演变时往往体现为不显著相关<sup>[27]</sup>。

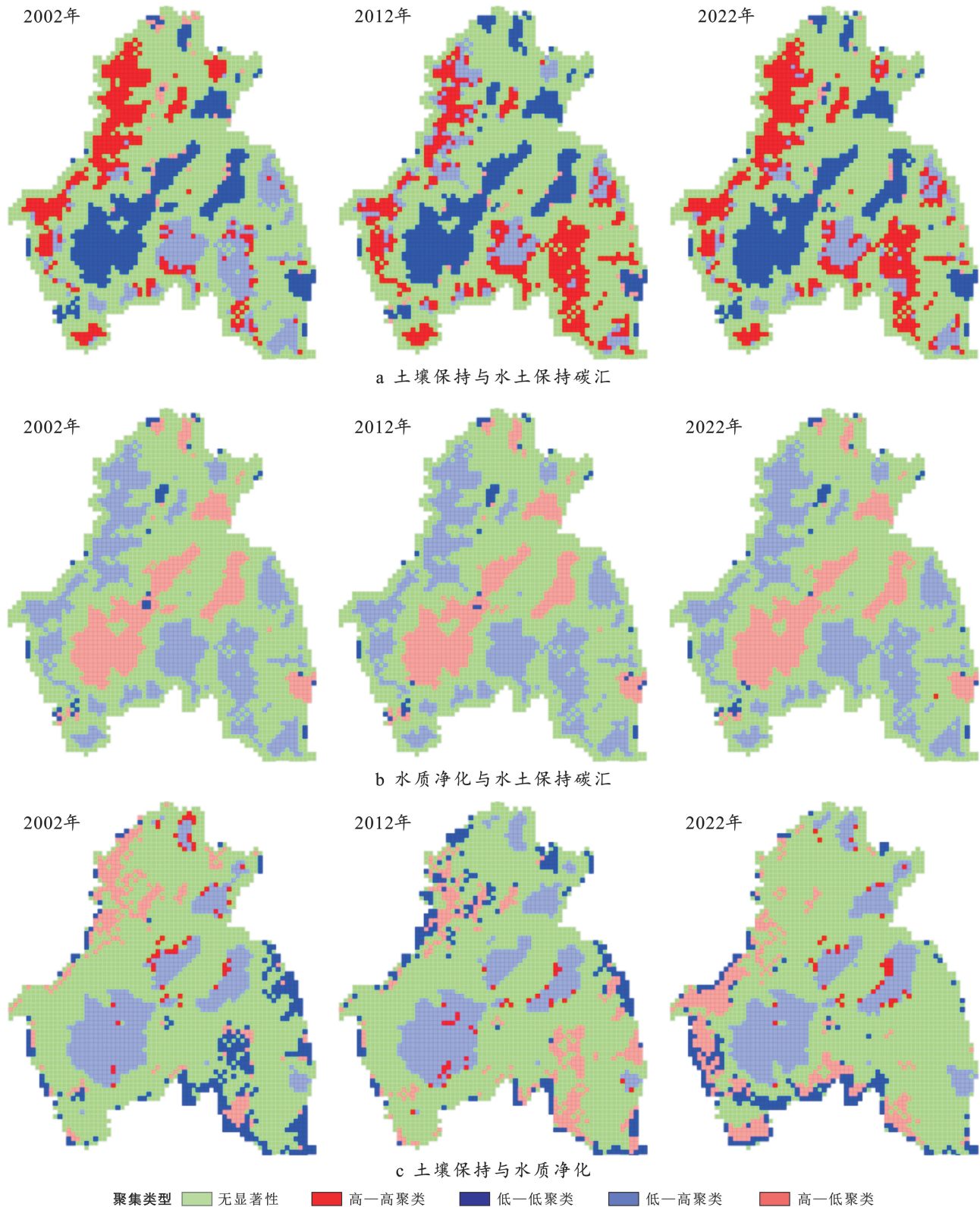
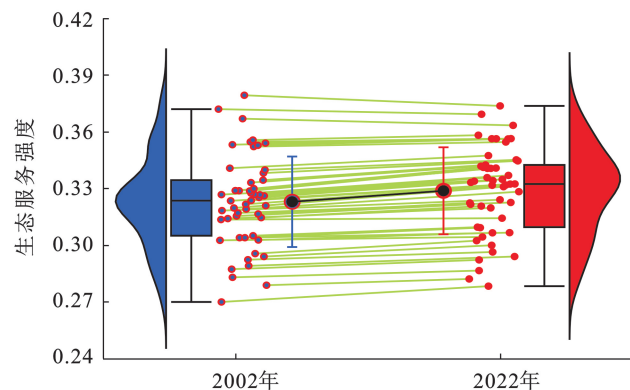


图 7 牡丹江市 2002—2022 年各功能间双变量 Moran'I 的聚集分析

Fig.7 Cluster analysis of bivariate Moran'I among functions in Mudanjiang City during 2002—2022



格局外,对土壤保持、地类碳汇、耕地地营元素固持的影响可能存在阈值响应关系。山地植被丰富,是水土保持生态服务功能的高值区,作为潜在重要碳汇区,其碳汇海拔格局与垂直递减率表明 DEM 与碳汇亦有单个或多个阈值响应关系<sup>[29]</sup>。值得注意的是,山地与平原接壤的半山丘陵区域的水土保持生态服务功能体现出明显差异性,非简单不同地类间过渡值,这可能与坡面径流特性、水文走向、植被盖度等有关,需要后续研究。②土壤保水能力(SWR)由于缺乏相关数据且考虑到牡丹江市耕地面积大、分布较为系统等特点,未使用 InVEST 中产水量模块进行粗略计算,仅通过以降雨和土壤属性为基础的泥沙输移等水沙响应关系与水质净化研究代替。相关研究<sup>[30]</sup>表明林草为主的地区 SWR 明显优于农业区,此外还受海拔与温度影响,其表现与本研究水土保持生态服务强度的空间分布基本一致。综上,本研究针对牡丹江市全域水土保持生态服务功能的时空演变存在一些不确定性,在后续研究中可以通过对相关参数的校正、特殊区域的机理研究、降水等主要驱动因子对生态功能的阈值响应,减少模拟结果与实际情况的误差。



注:①图中点为牡丹江市各子流域;点与点间的连线表征同一子流域由 2002 年(蓝色)至 2022 年(红色)间的水土保持生态服务强度波动情况。②箱线图与半小提琴图表征两个年份的数据整体分布情况。

图 11 牡丹江市子流域 2002—2022 年水土保持生态服务对土地利用的响应

Fig.11 Response of soil and water conservation ecological services to land use in sub-basin of Mudanjiang City from 2002 to 2022

## 4 结论

(1) 牡丹江流域内土壤保持与水质净化能力总量变化趋势一致,呈先减后增,泥沙输移比与 NP 输出呈强烈正相关,在区域总碳汇能力为下降趋势下,水土保持碳汇呈先增后减,对比研究初始年总量增加。在水系区域表现上,绥芬河水系(A3 区)区域的

水土保持生态服务强度均值表现优于其他区域,牡丹江水系(A1 区)区域对总量贡献上最大。

(2) 土壤保持与水土保持碳汇总体呈协同关系,强度逐年上升,水质净化与水土保持碳汇、土壤保持均呈权衡关系,前者强度逐年下降,后者逐年上升。内部出现邻近地域间权衡与协同相互包含,反趋势异常值点位多出现于半山丘陵区与耕地内部,这与受建设用地扩张辐射、生态保护政策等影响有关,如种植结构调整、测土量方施肥、退耕还林还草等。在生态保护实践中,土壤改良主要注重理化性质,对作物碳汇与营元素固持能力的影响较为复杂,在部分生态恢复地块人工林草对生态的贡献能力受品种选择、种植模式等多因素影响,具有不确定性。

(3) 降雨的时空分配不均与土地利用变化走向影响牡丹江市水土保持生态服务功能全过程,从相关水资源公报与河流泥沙公报数据来看,极端强降水事件是导致水土流失超过年均水平的主要原因。在生态用地增幅明显高于人造地表水平下,水土保持生态服务质量改善幅度呈微量提升或稳定不变状态,可能与牡丹江市耕地总量减小但呈现向生态服务质量高值区转移趋势,生态恢复区的植被受成长年限影响未完全形成系统恢复能力有关。在未来的区域发展规划上,应严控生态保持红线,考虑各地类区域间的生态系统服务的权衡与协同属性,发挥各地类利用模式产生的特色优势使区域高质量发展。

## 参考文献 (References)

- [1] 李昊瑞,马帅,殷允可,等.生态系统服务多功能区时空变化及其影响因素分析:以青藏高原生态屏障区为例[J].生态与农村环境学报,2024,40(8):1038-1046.  
Li Haorui, Ma Shuai, Yin Yunke, et al. Spatio-temporal changes of ecosystem service multi-functional areas and their influencing factors: A case study of the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(8):1038-1046.
- [2] 张自正,张蕾,孙桂英,等.清江流域生态系统服务权衡时空效应及驱动因素[J].应用生态学报,2023,34(4):1051-1062.  
Zhang Zizheng, Zhang Lei, Sun Guiying, et al. Spatial and temporal effect and driving factors of ecosystem service trade-off in the Qingjiang River basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):1051-1062.
- [3] 于海霞,王禹骁.东江流域生态系统服务价值的时空演变及空间分异机制[J].应用生态学报,2023,34(9):2498-2506.  
Yu Haixia, Wang Yuxiao. Spatio-temporal variations of

- ecosystem service value and its spatial heterogeneity mechanism in the Dongjiang River Basin, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2498-2506.
- [4] 李佳仪, 马小花, 乔丽娜, 等. 中国北方农牧交错区生态系统服务价值时空变化特征及驱动力分析[J]. *草地学报*, 2024, 32(7): 2263-2272.
- Li Jiayi, Ma Xiaohua, Qiao Lina, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving forces of ecosystem service value in the agro-pastoral ecotone of Northern China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2263-2272.
- [5] 董彭蓓, 任宗萍, 李鹏, 等. 土地利用变化下宁夏生态系统服务权衡协同关系研究[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(6): 1032-1044.
- Dong Pengbei, Ren Zongping, Li Peng, et al. Ecosystem services trade-offs and synergies driven by landuse changes in Ningxia [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(6): 1032-1044.
- [6] Tan Lei, Yang Guishan, Zhu Qing, et al. Optimizing payment for ecosystem services in a drinking water source watershed by quantifying the supply and demand of soil retention service [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 331: 117303.
- [7] 陈田田, 黄强, 王强. 基于生态系统服务供需关系的成渝城市群生态安全分区识别[J]. *山地学报*, 2022, 40(5): 727-740.
- Chen Tiantian, Huang Qiang, Wang Qiang. Ecological security zoning identification of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on supply-demand relation of ecosystem services [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(5): 727-740.
- [8] 刘尧兰, 温智亮, 郑博福, 等. 生态型县域生态系统服务时空格局及其协同关系: 以国家全域旅游示范区江西省武宁县为例[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 400-415.
- Liu Yaolan, Wen Zhiliang, Zheng Bofu, et al. Spatio-temporal patterns of ecosystem services and trade-off/synergistic relationships in ecological counties: Taking national comprehensive tourism demonstration zone at Wuning County, Jiangxi Province as an example [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2): 400-415.
- [9] 高春莲, 胡宝清, 黄思敏, 等. 山江海耦合关键带生态系统服务评价及服务簇识别研究: 以桂西南喀斯特—北部湾为例[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(4): 1346-1356.
- Gao Chunlian, Hu Baoqing, Huang Simin, et al. Study on ecosystem service evaluation and service bundles identification in the mountain-river-sea coupling key zone: A case study of southwest Guangxi Karst-Beibu Gulf [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(4): 1346-1356.
- [10] 莫沫. 水土保持新质生产力发展路径研究[J]. *中国水利*, 2024(9): 1-4.
- Mo Mo. Research on the development path of new quality productive forces in soil and water conservation [J]. *China Water Resources*, 2024(9): 1-4.
- [11] 曹文洪, 张晓明, 张永娥, 等. 水土保持碳汇内涵与测算方法[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(1): 1-11.
- Cao Wenhong, Zhang Xiaoming, Zhang Yonge, et al. Connotation of carbon sink in soil and water conservation and its calculation method [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 1-11.
- [12] 李智广, 王海燕, 王隽雄. 碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的机理、途径及特征[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 312-317.
- Li Zhiguang, Wang Haiyan, Wang Junxiong. Mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation from perspective of carbon peak and carbon neutralization [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 312-317.
- [13] 李威, 赵祖伦, 吕思思, 等. 基于 InVEST 模型的水质净化功能时空分异研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(3): 105-113.
- Li Wei, Zhao Zulun, Lyu Sisi, et al. Attenuation of pollutants in Beipanjiang River Basin calculated using the InVEST model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(3): 105-113.
- [14] 陈泽怡, 余珮珩, 陈奕云, 等. 共享社会经济路径下汉江流域产水和水质净化服务时空演变[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10): 1800-1814.
- Chen Zeyi, Yu Peiheng, Chen Yiyun, et al. Spatio-temporal changes of water resources ecosystem services in the Hanjiang River basin based on the shared socioeconomic pathway [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10): 1800-1814.
- [15] 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.
- Qi Yuxin, Zhao Congcong, Shen Peixin, et al. Spatio-temporal 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.
- [16] 夏全升, 洪欣, 桂翔, 等. 基于 InVEST 模型的芜湖市固碳能力及影响因子研究[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 385-394.
- Xia Quansheng, Hong Xin, Gui Xiang, et al. A study on carbon fixation capacity and its influencing factors

- based on InVEST model at Wuhu City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):385-394.
- [17] 彭守璋.中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2022)[DB/OL].时空三极环境大数据平台, <https://doi.org/10.5281/zenode.3185722>, 2020.
- Peng Shouzhang. Monthly precipitation data set with 1 km resolution in China (1901—2020) [DB/OL]. A Big Earth Data Platform for Three Poles. <https://doi.org/10.5281/zenode.3185722>, 2020.
- [18] 刘良云. GLC\_FCS30 D:1985—2022 年全球 30 m 精细土地覆盖动态监测数据集[DB/OL].北京:可持续发展大数据国际研究中心, 2023.
- Liu Liangyun. GLC\_FCS30 D: Global 30-meter fine land cover Dynamic monitoring dataset 1985—2022 [DB/OL]. Beijing: International Research Center for Big Data for Sustainable Development, 2023, China.
- [19] 战金艳, 邓祥征, 岳天祥, 等. 内蒙古农牧交错带土地利用变化及其环境效应[J]. *资源科学*, 2004, 26(5): 80-88.
- Zhan Jinyan, Deng Xiangzheng, Yue Tianxiang, et al. Land use change and its environmental effects in the farming-pasturing interlocked areas of Inner Mongolia [J]. *Resources Science*, 2004, 26(5): 80-88.
- [20] 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.
- [21] 范兰, 吕昌河, 陈朝. EPIC 模型及其应用[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 584-592.
- Fan Lan, Lu Changhe, Chen Zhao. A review of EPIC model and its applications [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 584-592.
- [22] 李朝晖, 李勇, 韩勤, 等. 黑龙江典型泥炭沼泽生态系统碳储量比较[J]. *防护林科技*, 2018(2): 71-72.
- Li Zhaohui, Li Yong, Han Qin, et al. Comparison of carbon storage in typical peat bog ecosystems in Heilongjiang Province [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2018(2): 71-72.
- [23] 邢伟, 李裴培, 刘明华, 等. 我国东北地区沼泽湿地碳储量估算[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2019, 32(4): 557-562.
- Xing Wei, Li Peipei, Liu Minghua, et al. Estimation of carbon storage in wetlands in Northeast China [J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 32(4): 557-562.
- [24] 左彦东, 叶珍, 马云, 等. 牡丹江流域水质变化趋势及水环境污染特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(12): 65-70.
- Zuo Yandong, Ye Zhen, Ma Yun, et al. The research on water quality changing and pollution characteristics of Mudanjiang River valley [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(12): 65-70.
- [25] 刘陵桦, 孟维彩, 蔡翠婷, 等. 基于地理探测器的汀江流域福建段植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(4): 236-246.
- Liu Linghua, Meng Weicai, Cai Cuiting, et al. Analysis of spatio-temporal dynamics and driving force of vegetation cover in Fujian Province section of Tingjiang River basin based on geographical detector [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4): 236-246.
- [26] 秦淑琦, 彭琴, 董云社, 等. 土壤呼吸对降雨变化和氮沉降交互作用响应的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 1145-1152.
- Qin Shuqi, Peng Qin, Dong Yunshe, et al. Responses of soil respiration to the interaction of rainfall changes and nitrogen deposition: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 1145-1152.
- [27] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- Fu B J, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446.
- [28] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响: 以密云水库流域为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- Li Yifeng, Luo Yuechu, Liu Gang, et al. Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun reservoir watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 726-736.
- [29] 窦佳慧, 梁宇, 怀保娟, 等. 不同地形条件下青藏高原森林生产力和碳收支动态[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1521-1530.
- Dou Jiahui, Liang Yu, Huai Baojuan, et al. Productivity and carbon budget dynamics of forests under different topographic conditions on Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1521-1530.
- [30] 毕晓丽, 葛剑平. 基于地形和土壤的泾河流域植被生态系统保水效益分析[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 95-101.
- Bi Xiaoli, Ge Jianping. Vegetation water conservation effect in the Jinghe River basin: An analysis based on topography and soil type [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 95-101.