

海河流域气候-土地利用-生态治理对 水生态系统服务的影响

时笑磊¹, 张贵军^{1,2}

(1. 河北农业大学 国土资源学院 河北 保定 071000; 2. 河北省农田生态环境重点实验室 河北 保定 071000)

摘要: [目的] 分析海河流域水生态系统服务功能的时空变化特征, 探析气候、土地利用变化及水生态治理措施对水生态系统服务功能的影响, 为流域水资源健康管理提供科学依据。[方法] 选取产水量和水质净化作为海河流域水生态系统核心服务功能, 基于 InVEST 模型模拟该流域 1985—2023 年共 9 期的产水量和水质净化功能, 并应用情景分析法计算气候和土地利用对水生态系统服务功能变化的贡献率, 采用 GTWR 模型量化气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能的影响程度。[结果] ① 1985—2023 年, 产水量整体呈波动上升趋势, 多年平均产水量为 105 mm。空间上, 中部和西南部产水量增加, 其他区域减少。② 1985—2023 年, 表征水质净化功能的总氮(TN)输出波动上升, 总磷(TP)输出持续下降后趋于平稳。空间上, 南部 N, P 输出增加, 北部减少。③ 气候和土地利用对产水量变化的贡献率分别为 56% 和 44%。跨流域调水量、降水量和水域面积增加促进产水功能, 气温升高、蒸发量增加抑制产水功能。气候对 N, P 输出变化的贡献率均为 61%, 土地利用对 N, P 输出变化的贡献率均为 39%。污水处理回用量提升、蒸发量增加和水域面积扩大对水质净化功能具有促进作用, 气温升高和降水量增加对水质净化功能存在抑制效应。[结论] 海河流域水生态系统服务功能的时空异质性由气候、土地利用和水生态治理措施共同驱动, 人类高强度的开发活动加剧了对水资源的利用强度, 同时导致了水生态系统净化功能的退化, 而水生态治理措施有效缓解了这一态势。

关键词: 水生态系统服务功能; 气候变化; 土地利用变化; 水生态治理措施; InVEST 模型; GTWR 模型; 海河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0353-13

中图分类号: X171.1, TV21

文献参数: 时笑磊, 张贵军. 海河流域气候-土地利用-生态治理对水生态系统服务的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 353-365. Shi Xiaolei, Zhang Guijun. Impacts of climate, land use and ecological governance on water ecosystem services in Haihe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 353-365.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.033

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.033

Impacts of climate, land use and ecological governance on water ecosystem services in Haihe River basin

Shi Xiaolei¹, Zhang Guijun^{1,2}

(1. Land and Resources College, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Farmland Ecological Environment, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics of water ecosystem services in the Haihe River basin were analyzed, and the impact patterns of climate, land use change, and water ecological governance measures on water ecosystem services were explored, in order to provide a scientific basis for the healthy management of water resources in the river basin. [Methods] Water yield and water purification were selected as the core water ecosystem services in the Haihe River basin. Using the InVEST model, the water yield and water purification functions were simulated for nine periods from 1985 to 2023 in the river basin. Scenario analysis was applied to calculate the contribution rates of climate and land use to changes in water ecosystem services, and the

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-09-02

采用日期: 2025-09-02

资助项目: 河北省社会科学基金项目“基于价值流动视角的河北省调节服务生态产品价值评价及实现路径研究”(HB23YJ015)

第一作者: 时笑磊(2000—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: 1428108113@qq.com。

通信作者: 张贵军(1974—), 女(汉族), 河北省迁安市人, 博士, 教授, 主要从事土地生态及可持续利用管理研究。Email: 2569401081@qq.com。

GTWR model was used to quantify the impacts of climate, land use, and water ecological governance factors on water ecosystem services. [Results] ① From 1985 to 2023, water yield exhibited an overall fluctuating upward trend, with a multi-year average of 105 mm. Spatially, water yield increased in the central and southwestern regions and decreased in other regions. ② From 1985 to 2023, the total nitrogen (TN) export, representing the water purification function, showed a fluctuating upward trend, while the total phosphorus (TP) export declined continuously and then stabilized. Spatially, N and P exports increased in the southern region and decreased in the northern region. ③ The contribution rates of climate and land use to changes in water yield were 56% and 44%, respectively. Increases in inter-basin water transfer volume, precipitation, and water area enhanced water yield, while increases in temperature and evaporation inhibited it. The contribution rate of climate to changes in both N and P exports was 61%, and that of land use was 39%. Increases in wastewater treatment and reuse volume, evaporation, and water area promoted the water purification function, while increases in temperature and precipitation inhibited it. [Conclusion] The spatiotemporal heterogeneity of water ecosystem services in the Haihe River basin is jointly driven by climate, land use, and water ecological governance measures. High-intensity human development activities have increased water resource utilization intensity and simultaneously caused degradation of the water purification function, while water ecological governance measures have effectively alleviated this trend.

Keywords: water ecosystem services; climate change; land use change; water ecological governance measures; InVEST model; GTWR model; Haihe River basin

保护水环境、治理水污染,既关乎当下民生福祉,更影响人类社会未来的永续发展。但目前很多国家和地区仍面临着复杂多样的水生态环境问题^[1],如水资源储备急剧下降、水体污染等。水生态系统服务功能是表征水生态系统为人类社会提供直接产品和维持生态平衡、保障人类生产生活功能的一项重要指标^[2]。有关研究表明,气候和土地利用是导致水生态系统服务功能变化的主要因素^[3-5]。气候通过改变降水模式^[6]、水文循环^[7]以及物种分布和生态系统结构^[8]对生态系统服务功能造成影响。同时,气候通过改变土地利用方式,间接影响生态系统服务功能^[9]。土地利用则通过改变物质循环和能量交换^[10]、生态系统组成和配置^[11-12]、生态系统转换方式^[13]、生态过程^[14]等对生态系统服务功能产生影响。如 Simcon 等^[13]发现埃塞俄比亚西南部国家公园原本以稀树草原、河流森林为主的生态系统,因农业活动扩张使得自然栖息地被破坏,致使河流、森林面积减少,严重影响多种生态系统服务功能; Lorencová 等^[14]在对捷克共和国农业生态系统的研究中发现,开垦耕地、放牧等农业利用活动,导致栖息地破碎化,进而致使生态系统服务功能退化。目前此方面的研究主要采用情景设定法^[15]、地理探测器^[16]、广义线性模型^[17]、SPHY^[18]模型等针对气候和土地利用变化对生态系统服务功能造成的影响进行量化分析。如徐文彬等^[17]利用地理探测器探究不同影响因子对产水量等生态系统服务功能空间分异性的解释力,发现气候因子和土地利用类型对不同生态系统服务功

能的影响差异显著。Eekhout 等^[18]应用 SPHY 模型分析了西班牙东南部塞古拉河流域土地利用变化、气候变化与相关生态系统服务功能间的相互作用。

海河流域属半干旱区,降水时空分布不均,呈现夏季多雨、春秋少雨,东南多雨、西北少雨的格局,水资源供给不稳定,人均水资源量较低。同时由于该流域地势低平,河水流速缓慢,泥沙沉积致使河道淤积,水流通能力弱,从而形成汛期洪灾与水资源短缺并存的复杂局面,农工商业及生活用水需求难以得到充分满足,严重制约社会经济发展。近年来,国家针对海河流域“有河皆干,有水皆污”的局面,实施了跨流域调水,污水处理回用等一系列水生态治理战略措施。但当前研究多聚焦气候和土地利用的自然驱动作用,对此类重大战略干预的量化分析不足,难以揭示“自然-人为”双驱动下流域水生态系统服务功能的演变规律。鉴于此,本研究选取产水量和水质净化代表水生态系统核心服务功能,使用 InVEST 模型进行评估,并借助 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 趋势分析探究 1985—2023 年海河流域水生态系统服务功能的变化趋势。在运用情景分析法计算气候和土地利用对水生态系统服务功能变化贡献率的基础上,进一步整合流域水治理措施的效应分析,使用 GTWR 模型测算 1985—2023 年气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能的影响系数,识别主要影响因子并探究其作用规律,为改善海河流域既“怕水”又“缺水”问题及提升水资源管理效率提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海河流域地处中国华北地区,地理坐标为 112° — 120° E, 35° — 43° N,西与黄河流域交界,北与内蒙古高原内陆河流交界,南界黄河,东临渤海,流域总面积 $3.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。行政区划涉及北京、天津和河北等8个省市(图1)。地势西北高东南低,处于温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区,1985—2023年多年平均降水量为533 mm,1990年达到峰值631 mm,2000年降至461 mm,其余年份在461~631 mm之间波动。经济发展过程中,温室气体超量排放加剧了气温的持续上升。蒸发量呈无序波动趋势,整体介于877~1 083 mm之间。海河流域土地利用类型以耕地为主,其次是林地和草地。38 a间,受城镇扩张的影响,耕地和草地面积减小,林地和建设用地面积增加,水域和未利用地面积变化不明显,耕地主要转向建设用地且为其主要转入来源,草地和林地之间为双向互馈的主要转换关系。

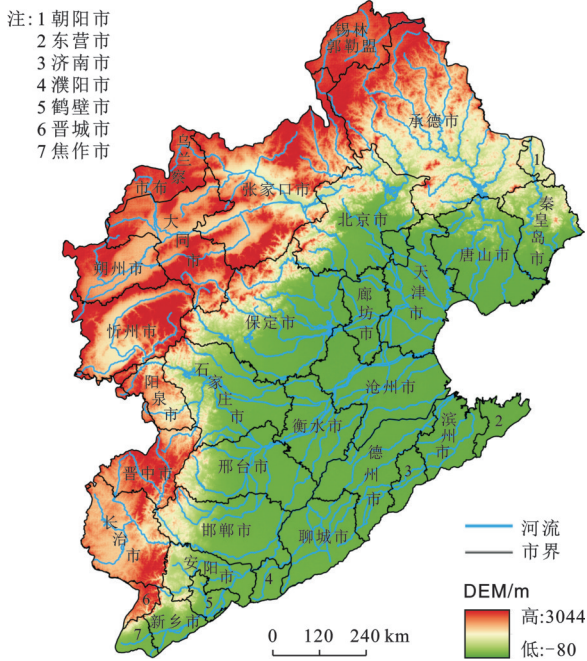


图1 海河流域地形图

Fig.1 Topographic map of Haihe River basin

1.2 数据来源与处理

本研究所需数据主要包括数字高程(DEM)、土壤、气候和土地利用/覆被等。其中,DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),土壤数据(土壤参考深度和土壤有效含水量)来源于世界土壤数据库(<https://gaez.fao.org/pages/hwsd>),气候数据(逐月降水量、逐月平均气温和逐月蒸发量)来源

于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),土地利用数据使用武汉大学杨杰和黄昕制作的中国年度土地覆盖数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>),水生态治理数据(跨流域调水量和污水处理回用量)来源于海河流域水资源公报(<http://www.hwcc.gov.cn/wwgj/xxgb/szygb>)。气候数据和土地利用数据以1985年为基期,涵盖1985,1990,1995,2000,2005,2010,2015,2020,2023年共9期数据。

本研究基于ArcGIS 10.8.2使用“像元统计”工具将月度气候数据整合处理为年度气候数据,将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。将所有气候和土地利用数据的空间分辨率重采样为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,投影坐标系统一设定为CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_39。使用IBM SPSS Statistics 27软件通过计算方差膨胀因子(VIF)对气候因子(降水量、气温和蒸发量)、土地利用因子(耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的面积)和水生态治理因子(跨流域调水量和污水处理回用量)进行共线性诊断,所有因子VIF值均小于10,即不存在多重共线性问题。

2 研究方法

2.1 水生态系统服务功能评估及趋势分析

2.1.1 产水量评估

使用InVEST模型中的Water Yield模块模拟产水量。此模块根据水量平衡原理和Budyko曲线估算研究区的产水量,将降水量减去蒸发损失的部分作为产水量^[19],并假设其经过汇流全部到达分水岭出口,计算公式为

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{LUE_{xj}}{P_x}\right) P_x \quad (1)$$

$$\frac{LUE_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \cdot \frac{W_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} EP}{P_x} \quad (4)$$

式中: Y_{xj} 表示像元 x 中土地利用类型 j 的年产水量(mm); LUE_{xj} 表示像元 x 中土地利用类型 j 的年蒸发量(mm); P_x 表示像元 x 的年降水量(mm); ω_x 为时变参数,反映不同像元在不同时间或条件下的水热耦合关系; R_{xj} 表示像元 x 中土地利用类型 j 的干燥度指数; Z 为经验常数,用来表征降水的季节性特征; W_x 表示像元 x 的植物可利用含水率; K_{xj} 表示像元 x 中

土地利用类型 j 的植被蒸散系数; EP 表示潜在蒸发量(mm)。

该模块输入的数据和参数包括降水量、蒸发量、根系限制层的深度、植物可利用水分含量、土地利用数据、生物物理属性表(表 1)、 Z 参数以及流域范围。其中,根系限制层深度和植物可利用水分含量分别用土壤参考深度和土壤有效含水量来代替。生物物理属性表通过结合研究区现状并参考模型使用手册

进行设定^[20]。 Z 参数通过影响植被有效含水量与年均降水量的比值,进而影响蒸发量的计算结果。参考《海河流域水资源公报》中多年实际平均产水系数(年实际水资源总量与年实际降水量的比值),固定其他参数,对模型进行多次调试,发现当 Z 参数为 0.6 时,实际平均产水系数(0.18)与模型模拟的平均产水系数(0.19)最接近,相对误差为 5.56%,处于可接受范围内,由此确定 Z 参数为 0.6。

表 1 海河流域水生态系统服务功能评估生物物理属性

Table 1 Biophysical attributes for evaluating water ecosystem service functions in Haihe River basin

土地利用类型	植物最大根系深度/mm	植被蒸散系数	植被化值	总氮负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	总磷负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	氮截留效率/%	磷截留效率/%
耕地	2 100	0.7	0	20	3.57	50	48
林地	5 200	1.0	1	3	1.37	90	80
草地	2 600	0.8	1	11	0.92	78	70
水域	100	1.0	1	13	0.36	6	5
未利用地	300	0.2	1	15	0.52	2	2
建设用地	100	0.3	1	14	0.27	6	26

2.1.2 水质净化功能评估

使用 InVEST 模型的 NDR (nutrient delivery ratio) 模块模拟水质净化功能,该模块专为非点源 N, P 迁移与截留过程设计,不涉及点源污染。NDR 模块以土壤和植被对径流中 N, P 的截留量表征区域水质净化能力,只考虑非点源污染中的 N 和 P,二者输出量越少,水质净化能力越强^[21]。其计算逻辑为先得到 N, P 的输出量,再根据各土地利用类型对 N, P 的截留效率计算截留量,计算公式为

$$ALV_x = HSS_x \cdot pol_x \quad (5)$$

式中: x 表示像元,取值为 1, 2, 3 等; ALV_x 为像元 x 净化调节后的营养物质输出量; HSS_x 为像元 x 的水文敏感得分值; pol_x 为像元 x 的输出系数。

该模块的输入数据和参数包括经过填洼的 DEM 数据、土地利用数据、营养物质径流代理、子流域范围、生物物理属性表、阈值流量累积以及 Borselli K 参数。其中,营养物质径流代理以海河流域年总降水量代替,阈值流量累积和 Borselli K 参数参考相关研究^[22-23]与 InVEST 模型使用手册,将阈值流量累积设定为 300, Borselli K 参数设定为 2。

2.1.3 水生态系统服务功能时空变化趋势分析

基于 MATLAB R2022 年利用 Theil-Sen 分析水生态系统服务功能的变化趋势,并结合 Mann-Kendal (M-K) 对变化趋势进行显著性检验,两者结合可以更全面地分析水生态系统服务功能随时间变化的趋势特性。Theil-Sen 趋势分析法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法^[24],该方法可以对趋势斜率进

行稳健估计,计算公式为

$$\theta_{\text{slope}} = \text{median}\left(\frac{ES_j - ES_i}{j - i}\right), 1985 \leq i \leq j \leq 2023 \quad (6)$$

式中: ES_j, ES_i 分别表示第 j 年和第 i 年的水生态系统服务功能; θ_{slope} 表示第 i 年到第 j 年水生态系统服务功能的变化趋势。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,表示水生态系统服务功能随时间变化呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

M-K 方法不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势分析,计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(ES_j - ES_i) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(ES_j - ES_i) = \begin{cases} +1 & (ES_j - ES_i > 0) \\ 0 & (ES_j - ES_i = 0) \\ -1 & (ES_j - ES_i < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (9)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sigma} & (S < 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: S 为水生态系统服务功能的统计变量; sgn 为符号函数; σ^2 为统计量 S 的方差; n 表示研究时间序列的长度; p 表示水生态系统服务功能时间序列中平级组的数量; t_i 表示第 i 个平级组中相同水生态系统服

务功能的数量; Z 表示标准化后的统计量,可以确定趋势的显著性;其他变量同公式6。本研究将 Z 的绝对值依照趋势分析结果的显著性分为3类:显著变化($|Z| > 1.96, \alpha = 0.05$)、微显著变化($1.65 < |Z| \leq 1.96, \alpha = 0.1$)和无显著变化($|Z| \leq 1.65$)。

2.2 气候及土地利用变化对水生态系统服务功能的影响及贡献率计算

为分析气候和土地利用变化对水生态系统服务功能的影响和贡献率,以1985年的气候和土地利用数据模拟得到的水生态系统服务功能为基准,设定气候变化、土地利用变化、气候和土地利用变化3种情景,测算方法如下。

(1) 气候变化情景。选取1985年的土地利用数据和2023年的气候数据模拟水生态系统服务功能,将此情景下计算得到的水生态系统服务功能与基准情景作差,即为1985—2023年气候变化对水生态系统服务功能的影响。

(2) 土地利用变化情景。选取1985年的气候数据和2023年的土地利用数据模拟水生态系统服务功能,将此情景下计算得到的水生态系统服务功能与基准情景作差,即为1985—2023年土地利用变化对水生态系统服务功能的影响。

(3) 综合情景。选取2023年的气候数据和2023年的土地利用数据模拟水生态系统服务功能,将此情景下计算得到的水生态系统服务功能与基准情景作差,即为1985—2023年气候和土地利用变化对水生态系统服务功能的综合影响,计算公式如下:

$$\Delta ES_{cli} = ES_{cli} - ES_0 \quad (11)$$

$$\Delta ES_{lu} = ES_{lu} - ES_0 \quad (12)$$

$$Con_{cli} = \frac{|\Delta ES_{cli}|}{|\Delta ES_{cli}| + |\Delta ES_{lu}|} \quad (13)$$

$$Con_{lu} = \frac{|\Delta ES_{lu}|}{|\Delta ES_{cli}| + |\Delta ES_{lu}|} \quad (14)$$

式中: ΔES_{cli} 表示因气候变化导致的水生态系统服务功能的变化量; ES_{cli} 表示气候变化情景下的水生态系统服务功能; ES_0 表示基准情景的水生态系统服务功能; ΔES_{lu} 表示因土地利用变化导致的水生态系统服务功能的变化量; ES_{lu} 表示土地利用情景下的水生态系统服务功能; Con_{cli} 表示气候变化对水生态系统服务功能变化的贡献率, Con_{lu} 表示土地利用变化对水生态系统服务功能变化的贡献率。

2.3 气候、土地利用及水生态治理因子对水生态系统服务功能的影响程度测算

将气候因子、土地利用因子、水生态治理因子和

水生态系统服务功能分别输入OLS, GWR和GTWR模型中。通过对比分析3种方法的拟合效果,发现相较于OLS和GWR模型,GTWR模型的 R^2 和Adjusted R^2 更接近于1,且AICc值更小,表明该模型的拟合优度更高。因此,以市为基本单元,将气候因子(降水量、气温和蒸发量)、土地利用因子(耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地的面积)和水生态治理因子(跨流域调水量和污水处理回用量)作为自变量,将产水量、N输出和P输出作为因变量,使用GTWR模型测算研究期内气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能在时空上的影响程度。其中,受数据可获取性限制,跨流域调水量与污水处理回用量采用研究单元面积加权法分配至各研究单元。

时空地理加权回归模型(geographically and temporally weighted regression, GTWR)是地理加权回归模型的扩展,是一种用于分析具有时空特性数据的统计方法,可同步考虑空间和时间两个维度的非平稳性。GTWR模型通过对每个观测点进行局部参数估计,从而提供更为精细化的时空数据分析,计算公式为

$$y_{zi} = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) WX_{ik} + \epsilon_i \quad (15)$$

式中: y_{zi} 表示第*i*个市的第*z*个水生态系统服务功能; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为常数项,表示第*i*个市的时空截距; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 表示第*i*个市第*k*个气候因子或土地利用因子或水生态治理因子的时空回归系数; u_i, v_i 分别表示第*i*个市的横坐标和纵坐标; t_i 表示第*i*个市对应的年份; W 表示空间权重矩阵; X_{ik} 表示第*i*个市第*k*个气候或土地利用或水生态治理因子; ϵ_i 为残差。基于ArcGIS 10.8.2使用Huang Bo等^[25]开发的GTWR插件研究气候、土地利用及水生态治理的变化对水生态系统服务功能的影响。

3 结果与分析

3.1 水生态系统服务功能评估及变化趋势

3.1.1 产水量评估结果及时空变化

1985—2023年,海河流域的多年平均产水量为105 mm,整体呈现无规则波动趋势(表2),产水量变化趋势与降水量密切相关,1995—2000年产水量急剧下降,同期降水量达最大降幅(22.5%)。空间上,1985—2023年西南部林地分布区与东部平原部分区产水量增加,其他区域普遍为减少态势(图2a),减少

速率为 0~8 mm/a。1985—1995 年平均产水量持续上升,由 105 mm 增至 132 mm,其中,北部燕山山区高海拔林地与坝上高原草地分布区产水增加速率为 0~9 mm/a,部分区域超过 9 mm/a;1995—2000 年平均产水量从峰值 132 mm 骤降至 72 mm,降幅达 45.6%。空间上,除太行山区西南部林地分布区少量增加外,其他区域均呈锐减态势,其中北部燕山林地与坝上高原草地分布区减幅最为突出,减少速率多

大于 8 mm/a;2000—2010 年,除燕山山区高海拔区域外,北部产水量开始缓慢增加,部分区域增加速率超过 5 mm/a,整体减少趋势得到遏制;2010—2023 年,得益于国家对海河流域持续实施生态补水等水调控措施,流域产水量呈增长趋势,且产水量增加重心向西南部与中部转移。根据 M-K 趋势分析结果,1985—2023 年东部沿海部分区域产水量显著增加(图 3),北部和西部部分区域显著减少。

表 2 淮河流域水生态系统服务功能年际变化

Table 2 Interannual changes of water ecosystem service functions in Huaihe River basin

水生态系统服务功能	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
产水量/mm	105	122	132	72	85	99	104	125	103
单位面积N输出/(kg·hm ⁻²)	1.20	1.22	1.24	1.23	1.25	1.23	1.27	1.26	1.29
单位面积P输出/(kg·hm ⁻²)	0.37	0.37	0.36	0.35	0.35	0.33	0.33	0.33	0.33

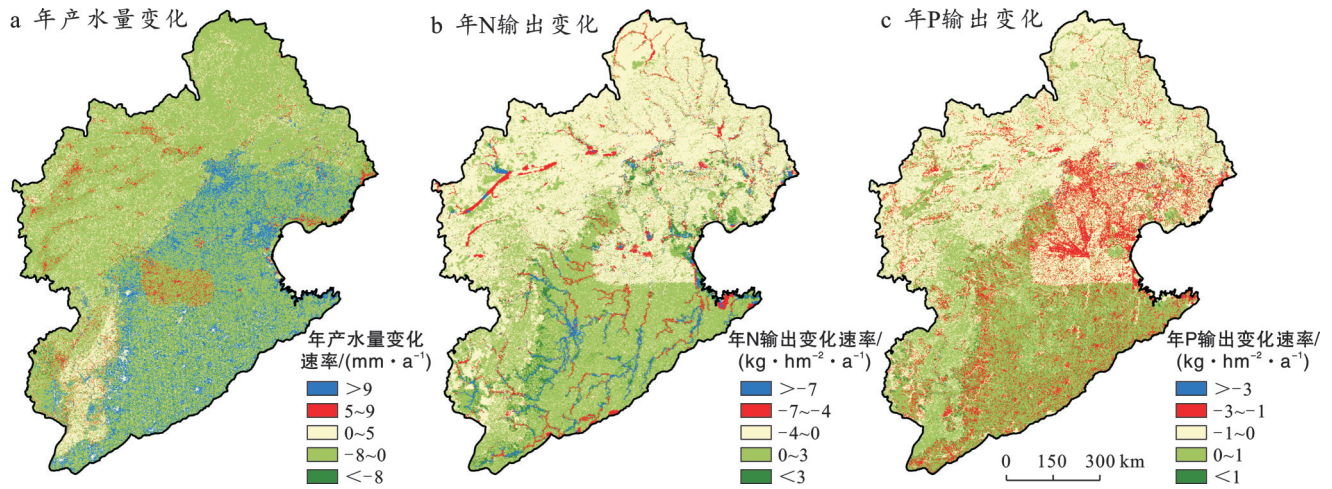


图 2 1985—2023 年淮河流域水生态系统服务功能变化速率

Fig.2 Change rates of water ecosystem services in Huaihe River basin (1985—2023)

3.1.2 水质净化功能评估结果及时空变化

1985—2023 年,研究区 N 输出波动上升,P 输出持续下降后趋于平稳。空间上,N,P 输出具有高度相似性,其时空演变亦表现出高度趋同的模式。1985—2023 年 N,P 输出整体表现为北部减少,南部增加,且与建设用地扩张存在显著关联(图 2b,2c)。其中,1985—1995 年西北部山地平原过渡带和东南部平原地区 N,P 输出增加,N 输出增加速率为 0~3 kg/(hm²·a),P 输出增加速率为 0~1 kg/(hm²·a);1995—2000 年,N,P 输出增加区域集中在太行山区南部林耕交错带与其东部平原连片耕地区,N 输出增加速率多超过 3 kg/(hm²·a),P 输出增加速率超过 1 kg/(hm²·a);2000—2010 年 N,P 输出北部增加,南部减少;2010—2023 年 N,P 输出北部减少,南部增加。根据 M-K 趋势分析结果,N,P 输出的显著增加

区域主要集中在西南部林耕交错带(图 3),显著减少区域主要集中在西北部高海拔山地。

3.2 气候及土地利用变化对水生态系统服务功能的影响及贡献率

3.2.1 气候及土地利用变化对产水量的影响及贡献率评估

1985—2023 年气候变化情景下,气候变化对产水量的正影响区域主要分布在西南部,其他区域均为负影响,特别是东北部负影响程度较高(图 4)。气候变化对产水量变化的平均贡献率为 56%,北部和西部贡献率较高。土地利用变化情景下,土地利用变化对产水量的正影响区域零星分布在海河流域全境。负影响分布区域更广但减少值较小,多介于 70~285 mm 之间。土地利用变化对产水量变化的平均贡献率为 44%,贡献率较高的地区主要分布在中

部和西南部。因此,在研究期内气候变化对产水量主要表现为负影响,土地利用变化对产水量主要表

现为正影响。整体来看,气候是海河流域产水量变化的主导因素。

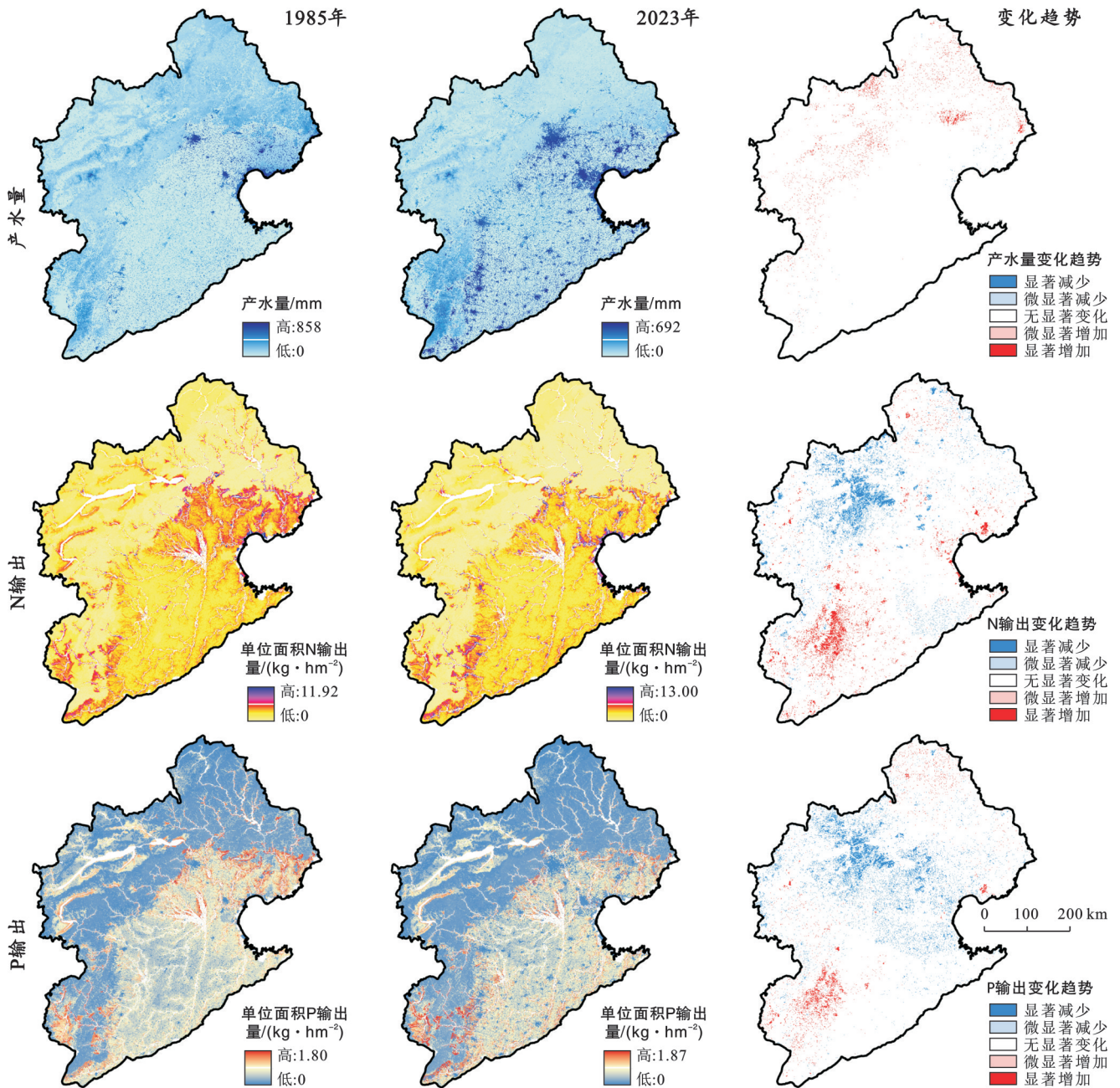


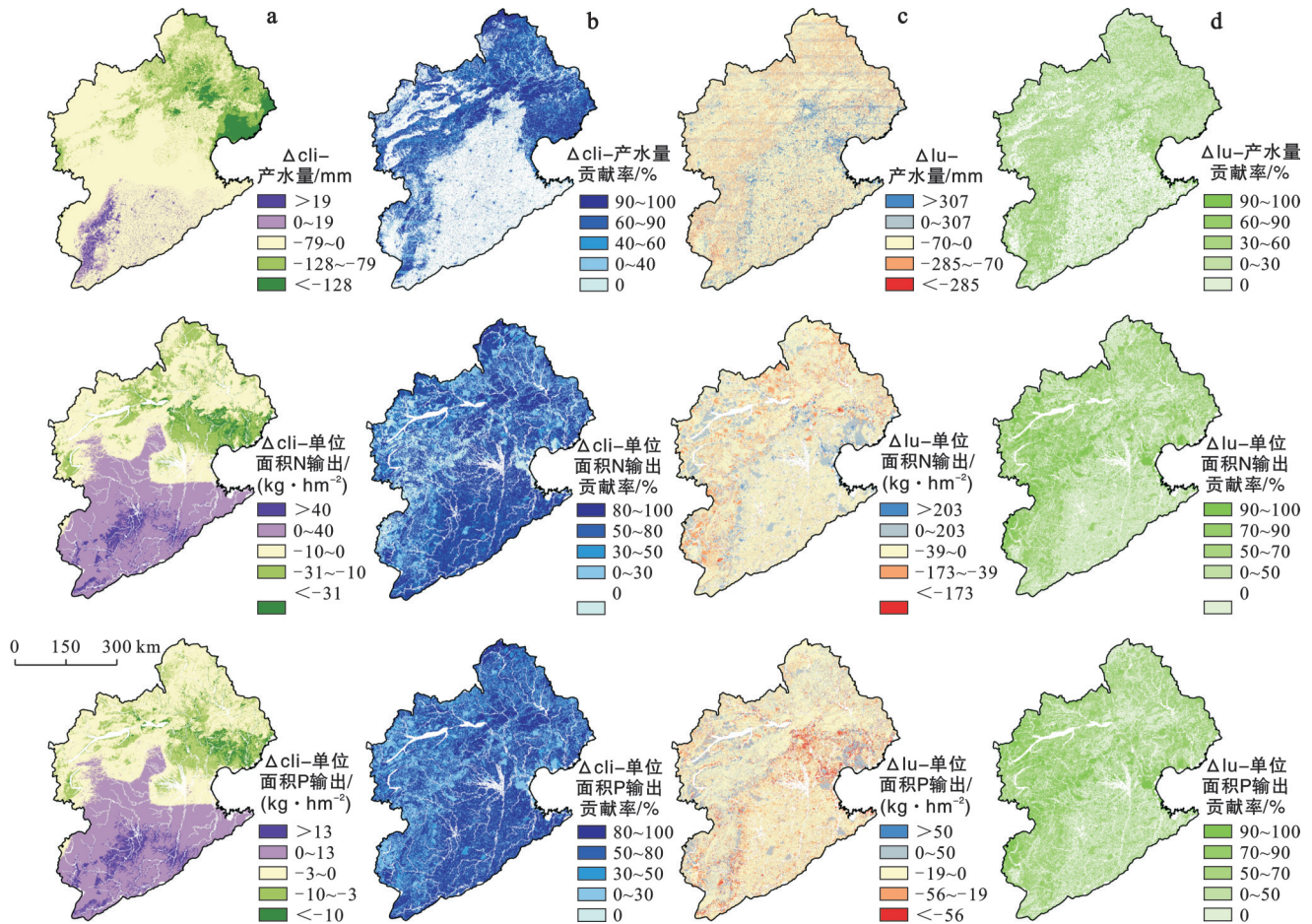
图 3 1985—2023年淮河流域水生态系统服务功能变化趋势

Fig.3 Change trends of water ecosystem service functions in Huaihe River basin (1985—2023)

3.2.2 气候及土地利用变化对水质净化功能的影响及贡献率评估

1985—2023年气候和土地利用变化对N, P输出的影响在空间分布上具有相似性。气候变化情景下,气候变化对N, P输出的正影响区域主要分布在南部,负影响区域分布在北部,气候变化对N, P输出变化的平均贡献率均为61%,贡献率较高的地区均分布在中部和南部。土地利用变化情景下,土地利

用变化对N, P输出的正影响区域零星分布在东部、西部和南部部分区域,负影响遍布整个流域且较为分散。土地利用变化对N, P输出变化的平均贡献率均为39%,贡献率较高的地区均分布在西部和北部。因此,在研究期内气候变化对水质净化功能主要表现为负影响,土地利用变化对N输出主要表现为正影响,对P输出表现为负影响。整体来看,气候是海河流域水质净化功能变化的主导因素。



注:①a为气候变化情景下水生态系统服务功能变化量;b为气候对水生态系统服务功能变化的贡献率;c为土地利用变化情景下水生态系统服务功能的变化量;d为土地利用对水生态系统服务功能变化的贡献率。② Δcli 代表气候变化; Δlu 代表土地利用变化。

图4 1985—2023年不同情景下淮河流域气候及土地利用对水生态系统服务功能变化的影响及贡献率
Fig.4 Impacts and contribution rates of climate and land use on changes in water ecosystem service functions under different scenarios in Huaihe River basin (1985—2023)

3.3 气候、土地利用及水生态治理因子对水生态系统服务功能的影响程度

不同生态治理因子对水生态系统服务功能的影响系数存在显著差异(图5)。产水量的主要影响因子及其平均影响系数绝对值大小表现为:跨流域调水>气温>降水>水域>蒸发量。正向影响因子为跨流域调水、降水和水域,负向影响因子为:气温和蒸发量。

1985—2023年不同影响因子对产水量的平均回归系数随时间呈现出各异的变化趋势。其中,跨流域调水的多年平均回归系数为3.7007,具有较强的促进作用;气温的平均回归系数由-6.1805持续上升到-1.5533,表明气温升高对产水量抑制作用极强,但抑制程度逐渐减小;降水由0.3929持续上升到0.4516,表明降水对产水量发挥了积极的驱动作用;1985—2023年水域的平均回归系数由0.0883上升到0.1010,水域面积的增加对产水量存在一定的促

进作用;蒸发量平均回归系数由-0.1240变为-0.0609,蒸发量对产水量有一定的抑制作用。N输出的主要影响因子及其平均影响系数绝对值大小表现为:污水处理回用量>气温>降水>水域>蒸发量。正向影响因子为气温和降水,负向影响因子为:污水处理回用量、水域和蒸发量。

1985—2023年不同因子对N输出的影响具有显著的分异特征。其中,污水处理回用量多年平均回归系数为-15.6998,污水处理回用对N输出具有明显抑制作用;气温由9.4154持续上升到18.2558,气温对N输出的促进效果极为显著,且促进程度持续增强;蒸发量由0.0198波动下降到-0.0474;水域由-0.2416变为-0.1314,一定程度上阻碍了N输出;降水由0.0488波动上升到0.1006,降水增加促进N输出量。P输出的主要影响因子及其平均影响系数绝对值表现为:污水处理回用量>气温>降水>蒸发量>水域。

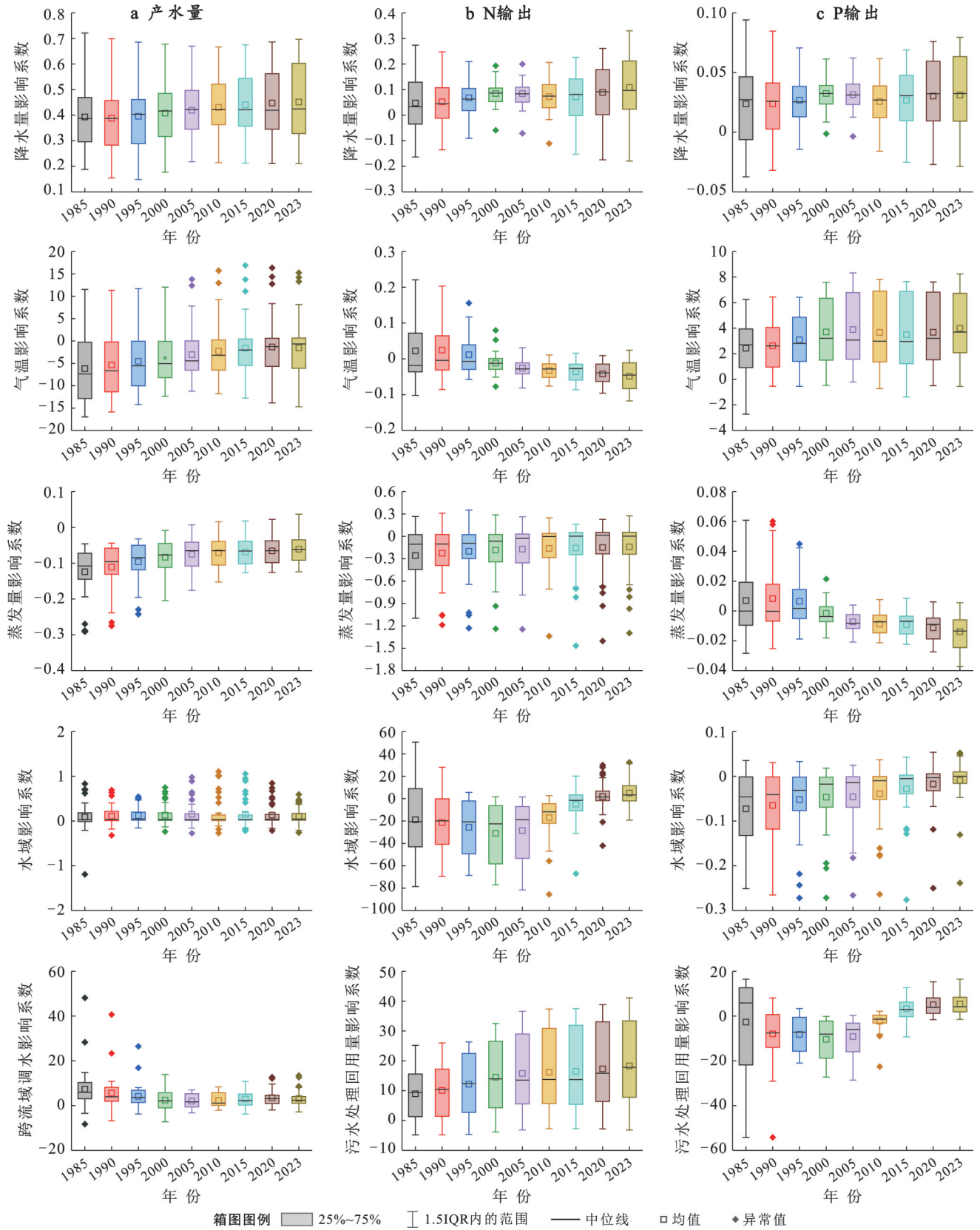


图5 1985—2023年淮河流域气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能影响的时间变化
 Fig.5 Temporal changes in impacts of climate, land use, and water ecological governance factors on water ecosystem services in Huaihe River basin (1985—2023)

正向影响因子为气温和降水,负向影响因子为污水处理回用量、蒸发量和水域。1985—2023年污

水处理回用量对P输出的平均回归系数为-3.0233,对P输出具有显著抑制作用;气温对P输出的平均回

归系数由 2.525 0 波动上升到 3.995 0, 气温对 P 输出具有极强的促进效果, 且促进程度持续提升; 降水由 0.023 9 波动上升到 0.031 0, 对 P 输出产生明显的正向影响; 蒸发量的多年平均回归系数为 -0.003 4, 对 P 输出存在微弱的抑制作用; 水域由 -0.068 8 变为 -0.008 6, 对 P 输出的抑制作用逐渐减弱。

在空间上, 基于 ArcGIS 10.8.2, 使用自然间断点法对水生态系统服务功能与气候因子、土地利用因子和水生态治理因子的平均回归系数进行可视化表达。

由图 6 可见, 不同区域的水生态系统服务功能受不同因子主导且存在显著差异。

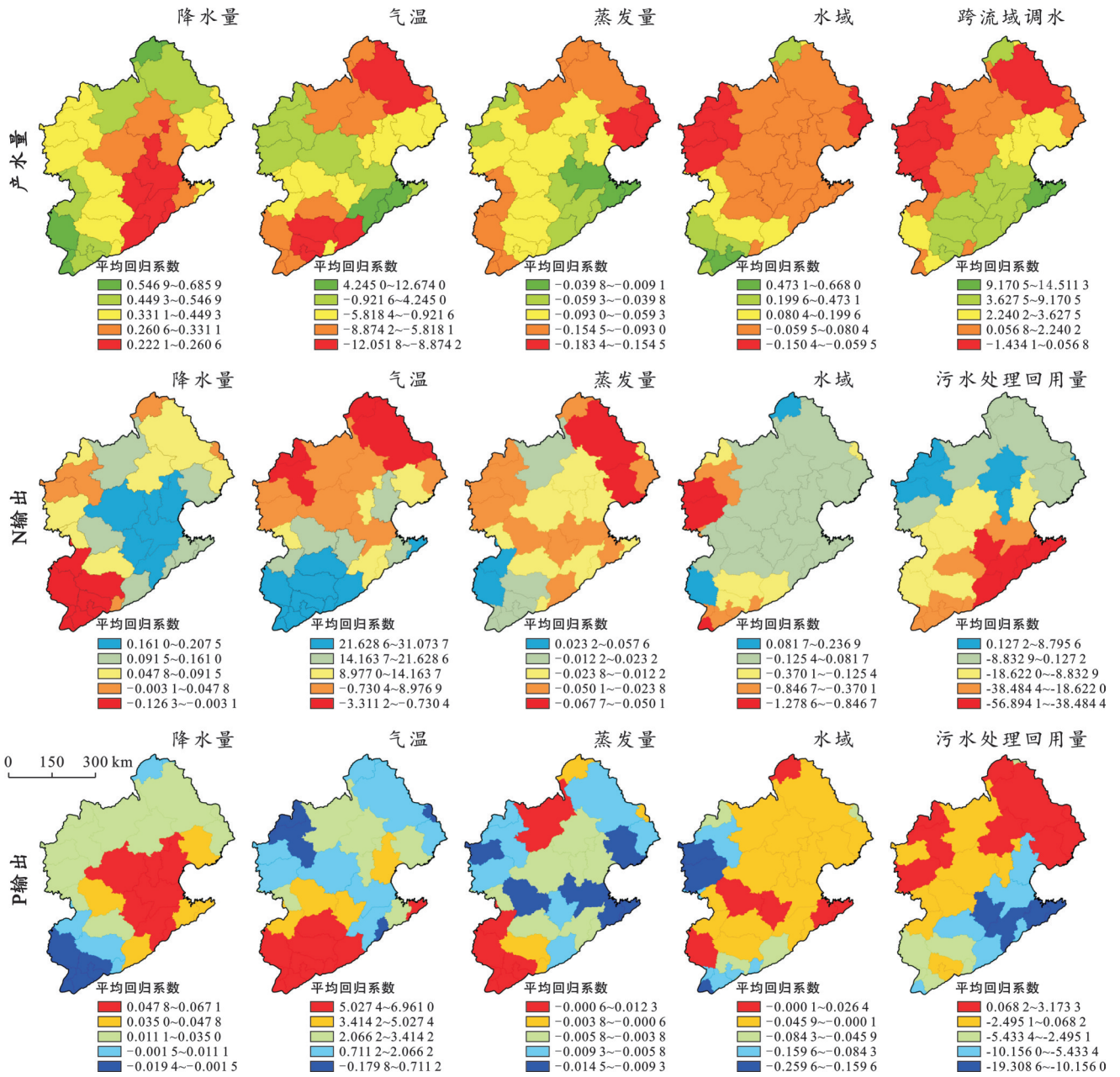


图 6 1985—2023 年淮河流域气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能影响的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of impacts of climate, land use and water ecological governance factors on water ecosystem services in Huaihe River basin (1985—2023)

对于产水量, 跨流域调水影响高值区集中在东南部, 东营市影响系数最高(14.511 3); 气温影响高值区集中在北部, 其中, 邯郸市影响系数绝对值最高(-12.051 8); 降水影响高值区集中在西南部, 长治市影响系数最高(0.685 9); 水域影响高值区分布在西南

部和北部, 晋城市影响系数最高(0.668 0); 蒸发量影响高值区集中在东北部, 朝阳市影响系数绝对值最高(-0.183 4)。污水处理回用量对 N, P 影响高值区分布在东南部, 对 N, P 输出影响系数绝对值最高的均为东营市(影响系数分别为 -56.894 1 和 -19.308 6)。

气候和土地利用因子对N、P输出的影响在空间分布上呈现高度耦合性。气温对N、P输出影响的高值区集中在西南部,鹤壁市气温对N输出影响系数最高(31.073 7),濮阳市气温对P输出影响系数最高(6.961 0);降水对N、P输出影响的高值区集中在中部环沧州城市群,对N、P输出影响系数最高的均为天津市(影响系数分别为0.207 5和0.067 1);水域对N、P输出影响的高值区集中在西部,对N、P输出影响系数绝对值最高的均为朔州市(分别为-1.278 6和-0.259 6);蒸发量对N、P输出影响的高值区集中在东北部,对N、P输出影响系数绝对值最高的均为唐山市(分别为-0.067 7和-0.014 5)。

4 讨论

通过设定不同情景量化了海河流域气候及土地利用对水生态系统服务功能变化的影响和贡献率,利用GTWR模型测算了气候、土地利用和水生态治理因子对水生态系统服务功能的影响系数,揭示了不同区域水生态系统服务功能主导因子的差异,为优化水资源配置和土地利用规划提供数据支持。本研究对水生态系统服务功能的模拟结果与海河流域相近区域研究结果接近。如李鑫等^[26]的研究表明京津冀地区2000—2019年多年平均产水量为86 mm,本研究1985—2023年多年平均产水量为105 mm。李素晓^[27]对1990—2015年京津冀地区N、P平均输出分别为0.94 kg/hm²和0.24 kg/hm²,本研究1985—2023年N、P年平均输出分别为1.24 kg/hm²和0.35 kg/hm²。

情景分析结果显示,气候对产水量变化贡献率为56%,是影响产水量的主要因素,这印证了Pessacg N等^[28]的研究结果。GTWR模型结果表明,产水量的空间异质性主要受跨流域调水、气温、降水量^[29]、水域和蒸发量多因子共同驱动,在海河流域不同区域呈现显著差异。如邯郸市地处内陆,气候干旱,降水不足,气温升高会加剧蒸发作用,而水量补给难以弥补蒸发损耗,致使产水量受气温抑制作用显著。降水为产水量主要补给源之一,长治市降水量增加对产水量促进效果显著,这可能是因为长治市的盆地地形利于降水汇流,充足的降水极大地促进了产水量。晋城市水域面积较大,储水能力较强,同时可涵养周边地下水,多重作用正向促进产水量增加。朝阳市蒸发量增加对产水量抑制作用最强,主要是因为朝阳市蒸发量远超降水量,其丘陵沙地的地貌条件保水差,导致水分流失快,水资源匮乏,产水受抑制显著。海河流域绝大部分区域的跨流域

调水对产水量的影响系数均呈现增加趋势,如北京市跨流域调水对产水量影响系数由0.259 4上升到0.423 5,这是因为多年来国家在海河流域开展了一系列引江水、引黄水等多种跨流域调水补水措施,促使河湖水生态环境复苏。

气候对N、P输出变化的贡献率均为61%,是影响水质净化功能的主导因素。N、P输出的时空异质性主要受污水处理回用量、气温、降水量、水域面积和蒸发量的综合影响。鹤壁市和濮阳市两市地处华北平原,农业开发强度大且耕地密集,过度使用化肥致使土壤中的N、P含量较高,同时气温升高导致N、P矿化率升高,致使更多N、P经地表输出。天津市由于城市化程度较高,不透水地表占比大,降水时雨水难以下渗,易形成强地表径流,因而城市面源污染累积大量N、P污染物,加之天津市河网密集,径流快速汇入水体,降水集中于夏季且多短时强降雨,导致地表径流量大幅增加,对土壤的侵蚀和冲刷能力增强,从而使更多含N、P的污染物随径流进入水体,进而显著促进N、P输出。朔州市水域对N、P输出的影响系数绝对值最大,这可能与当地桑干河等水域及湿地公园生态系统净化能力强有关,水域作为N、P的“汇”,其面积增加可延长N、P在水体中的滞留时间,且湿地植物可吸收吸附N、P污染物。唐山市蒸发量对N、P输出的影响系数绝对值最高,这可能是因为当地水系较发达,蒸发作用使水体中N、P随水汽被植物吸收或沉降底泥,农业区土壤中的N、P也因蒸发导致水分减少而滞留,一定程度上减少了径流流失。不同地类则因根系结构、土壤特性、地表覆盖物等差异,对径流中N、P拦截能力不同,如未利用地受人类活动干扰少,原生根系稳固、土壤保肥性强,N、P流失受限。近年来,海河流域水环境污染严重的局面得到扭转,如东营市污水处理回用对N、P输出的影响系数分别-56.894 1和-19.308 6,对N、P输出具有较强的抑制作用,这与多年来国家在海河流域采取污水处理回用等水环境综合整治的有效措施相关。

本研究也存在一定局限性。水生态系统服务功能的研究范畴聚焦产水量和水质净化,未涵盖水生态系统服务功能的其他方面,如水源涵养、洪水调节、生物栖息地维持等。未来研究应纳入这些服务,以获得更全面认知。在影响因素分析上,本研究仅选取了水生态系统服务功能变化的核心解释变量(降水量、气温、蒸发量、土地利用变化及水生态治理措施),尽管不会显著影响模型拟合效果,但水生态系统服务功能的影响因素更为复杂,光照、风力、农业灌溉方式、水资源开发强度等自然因素和人类活

动也会产生一定驱动作用。因此,未来研究应系统剖析其影响机制,综合考量自然与人为因素的交互作用,为水生态系统保护和可持续利用提供更科学、针对性的理论依据。

5 结论

(1) 1985—2023年海河流域产水量在72~132 mm间波动变化,N输出波动上升,P输出持续下降后趋于平稳。产水量高值区集中在各市区,N,P输出低值区主要分布在西部和北部,N,P输出越低的区域,水质净化功能越强。1985—2023年,研究区中部人类活动密集区产水量显著增加,地势较高的北部和西南部的N,P输出显著减少,水质净化功能逐步改善,高产水区域普遍呈现水质净化功能弱化的特征。

(2) 气候变化对产水量和水质净化的平均贡献率分别为56%和61%,气候的不均衡变化主导了水生态系统服务功能的区域分异性。1985—2023年,气候变化导致西南部产水量增加,东北部减少,北部水质净化功能增强,南部减弱。土地利用变化对产水量和水质净化的平均贡献率分别为44%和39%,在经济发达区域,土地利用变化对产水量、N输出和P输出均为正影响,且在研究期间,该影响效应以各市区为中心呈辐射状持续扩展,人类高强度的开发活动加大了对水资源的利用,同时导致了水生态系统净化功能的退化。

(3) 水生态系统服务功能的区域异质性由气候、土地利用和水生态治理因子差异化驱动;产水量的区域异质性由跨流域调水、气温、降水量、水域面积和蒸发量主导,与跨流域调水量、降水量和水域面积呈正相关,与气温和蒸发量呈负相关。N,P输出量可表征水质净化功能,其输出量越低,表明水质净化功能越强。海河流域水质净化功能受污水处理回用量、气温、降水量、水域面积和蒸发量主导,与污水处理回用量、水域面积和蒸发量呈正相关,与气温和降水量呈负相关。国家在海河流域开展的外调水源补给、区域再生水循环利用等水生态修复措施有效促进了水资源总量的提升和水质净化功能的强化,推动了海河流域水资源环境的正向发展。

参考文献(References)

- [1] 张利平,夏军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120. Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2):116-120.
- [2] 王森,汪自书,刘毅.流域水生态产品价值实现路径探讨[J].中国生态文明,2024(2):24-27.
- [3] 刘亚茹,王聪,严力蛟.华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响:以河南省商丘市为例[J].应用生态学报,2018,29(5):1597-1606. Liu Yaru, Wang Cong, Yan Lijiao. Impacts of land use change on ecosystem services in the agricultural area of North China Plain: A case study of Shangqiu City, Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5):1597-1606.
- [4] Lungarska A, Chakir R. Projections of climate change impacts on ecosystem services and the role of land use adaptation in France [J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2024, 22:100369.
- [5] Monprapussorn S. Impact of climate and land use change on ecosystem services: A case study of Samutsakorn Province, Thailand [J]. Ecological Informatics, 2018, 47:45-49.
- [6] 韩会庆,张娇艳,马庚,等.气候变化对生态系统服务影响的研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(2):184-190. Han Huiqing, Zhang Jiaoyan, Ma Geng, et al. Advances on impact of climate change on ecosystem services [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(2):184-190.
- [7] 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.
- [8] Schirpke U, Tasser E, Borsky S, et al. Past and future impacts of land-use changes on ecosystem services in Austria [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345:118728.
- [9] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013, 32(8):1379-1390. Li Shuangcheng, Zhang Caiyu, Liu Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography [J]. Geographical Research, 2013, 32(8):1379-1390.
- [10] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J].长江流域资源与环境,2015, 24(5):798-808. Wang Jun, Dun Yaolong. A review on the effects of land use change on ecosystem services [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 798-808.
- [11] 薛嵩嵩,高凡,何兵,等.近30年乌伦古河流域土地利

- 用与生态系统服务价值变化研究[J].水土保持通报, 2019,39(6):223-229.
- Xue Songsong, Gao Fan, He Bing, et al. Variation of land use and ecosystem service value in ulungur river basin in past 30 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(6):223-229.
- [12] 尹登玉,张全景,翟腾腾.山东省土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):134-143.
- Yin Dengyu, Zhang Quanjing, Zhai Tengpeng. Land use change and its impact on ecosystem service value in Shandong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):134-143.
- [13] Simeon M, Wana D. Impacts of land use land cover dynamics on ecosystem services in maze National Park and its environs, southwestern Ethiopia [J]. Heliyon, 2024,10(9):e30704.
- [14] Lorencová E, Frélichová J, Nelson E, et al. Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic [J]. Land Use Policy, 2013,33:183-194.
- [15] Schirpke U, Tasser E. Potential impacts of climate change on ecosystem services in Austria [J]. Ecosystem Services, 2024,68:101641.
- [16] Peng Jian, Tian Lu, Zhang Zimo, et al. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a Karst landscape in China [J]. Ecosystem Services, 2020,46:101199.
- [17] 徐文彬,饶良懿.土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响[J].环境科学,2023,44(9):5114-5124.
- Xu Wenbin, Rao Liangyi. Impacts of land use and climate change on ecosystem services in agro-pastoral ecotone [J]. Environmental Science, 2023,44(9):5114-5124.
- [18] Eekhout J P C, Boix-Fayos C, Pérez-Cutillas P, et al. The impact of reservoir construction and changes in land use and climate on ecosystem services in a large Mediterranean catchment [J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125208.
- [19] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
- Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River basin based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(8):2731-2739.
- [20] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T. InVEST 3.7.0 user's guide [M]. Stanford:the Natural Capital Project, 2019.
- [21] 侯晋星,潘换换,杜自强,等.山西黄河流域水生态系统服务时空分析[J].干旱区地理,2024,47(6):1047-1060.
- Hou Jinxing, Pan Huanhuan, Du Ziqiang, et al. Spatio-temporal analysis of water ecosystem services of the Yellow River basin in Shanxi Province [J]. Arid Land Geography, 2024,47(6):1047-1060.
- [22] 耿秘,刘艳,吴冉,等.2012—2022年长江经济带土地利用变化对水生态系统服务的影响[J].水土保持通报,2025,45(3):343-352.
- Geng Mi, Liu Yan, Wu Ran, et al. Effects of land-use change on aquatic ecosystem services in Yangtze River economic belt during 2012—2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(3):343-352.
- [23] 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.
- [24] 丁文荣,李孝川,陈相标.珠江源区植被变化特征及其影响因素研究[J].人民长江,2024,55(3):83-88.
- Ding Wenrong, Li Xiaochuan, Chen Xiangbiao. Dynamic characteristics and attribution of vegetation in source region of Pearl River [J]. Yangtze River, 2024,55(3):83-88.
- [25] Huang Bo, Wu Bo, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(3):383-401.
- [26] 李鑫,邹长新,陈艳梅,等.2000—2019年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2022,42(5):265-274.
- Li Xin, Zou Changxin, Chen Yanmei, et al. Spatio-temporal pattern changes and driving factors of water conservation function in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):265-274.
- [27] 李素晓.京津冀生态系统服务演变规律与驱动因素研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- Li Suxiao. The dynamics of ecosystem services and their driving factors in the Jing-Jin-Ji region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [28] Pessacq N, Flaherty S, Brandizzi L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data [J]. Science of the Total Environment, 2015,537:225-234.
- [29] Delphin S, Escobedo F J, Abd-Elrahman A, et al. Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services [J]. Land Use Policy, 2016,54:188-199.