

# 土地利用和气候变化对河北省 水生态系统服务的影响

郭逸欣<sup>1,2</sup>, 胡永翔<sup>1,2</sup>, 尚国珩<sup>1,2</sup>,  
张霞<sup>1,2</sup>, 陈方琪<sup>3</sup>, 李紫怡<sup>1</sup>, 邸思媛<sup>1</sup>, 刘航<sup>4</sup>

(1.河北地质大学 土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄 052161;  
2.河北地质大学 河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心, 河北 石家庄  
052161; 3.河北地质大学 管理学院, 河北 石家庄 052161; 4.河北传媒学院, 河北 石家庄 051430)

**摘要:** [目的] 定量评估未来不同土地利用变化和气候变化情景下河北省水生态系统服务(WRESs)的演变特征及其驱动因素, 揭示其多尺度不确定性, 为区域水生态系统管理提供科学依据。[方法] 整合MRI-ESM2-0气候模型、FLUS和InVEST模型, 评估气候变化和土地利用变化对河北省水源涵养量(WC)和水土流失量(SE)的综合影响, 并揭示多尺度不确定性。[结果] 2024—2050年, 河北省水源涵养量(WC)在2种气候情景下总体呈上升趋势。SSP245情景下先增长后稳定, SSP585情景下持续增长。水土流失量(SE)整体下降, 在SSP245情景下稳步减少, 在SSP585情景下表现为先升后降。气候变化在影响WRESs方面起主导作用, 对WC和SE的贡献率分别为99.30%和93.14%, 其影响随着时间的推移逐渐减小。土地利用变化对WC的贡献随着时间的推移而下降, 而对SE的贡献虽然较小, 但逐渐递增。气候变化驱动的不确定性通常高于土地利用变化, 所有尺度的不确定性均随着时间的推移而降低。[结论] 河北省未来水生态系统服务总体呈“水源涵养增强, 水土流失减弱”的趋势, 气候湿化与生态保护的协同作用显著提升了区域水文调节与生态稳定性。强化生态修复与分区管控将是提升区域水安全与应对气候风险的关键路径。

**关键词:** 水生态系统; 土地利用变化; 气候变化; 综合效应; 多尺度不确定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0389-16

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 郭逸欣, 胡永翔, 尚国珩, 等. 土地利用和气候变化对河北省水生态系统服务的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 389-404. Guo Yixin, Hu Yongxiang, Shang Guobei, et al. Effects of land use and climate change on water-related ecosystem services in Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 389-404.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.014

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.014

## Effects of land use and climate change on water-related ecosystem services in Hebei Province

Guo Yixin<sup>1,2</sup>, Hu Yongxiang<sup>1,2</sup>, Shang Guobei<sup>1,2</sup>, Zhang Xia<sup>1,2</sup>, Chen Fangqi<sup>3</sup>, Li Ziyi<sup>1</sup>, Di Siyuan<sup>1</sup>, Liu Hang<sup>4</sup>

(1.School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang,

Hebei 052161, China; 2.International Science and Technology Cooperation Base of Hebei Province,

Hebei International Joint Research Center for Remote Sensing of Agricultural Drought Monitoring,

Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 052161, China; 3.School of Management, Hebei GEO

University, Shijiazhuang, Hebei 052161, China; 4.Hebei Institute of Communications, Shijiazhuang, Hebei 051430, China)

**Abstract:** [Objective] The evolution characteristics and driving factors of water-related ecosystem services (WRESs) in Hebei Province under land use and land cover change (LUCC) and climate change (CC) scenarios

收稿日期: 2025-08-26

修回日期: 2025-11-15

采用日期: 2025-11-16

资助项目: 河北省社会科学基金项目“‘大占补’政策背景下河北省山前平原区‘林耕置换’资源潜力研究”(HB25GL027)

第一作者: 郭逸欣(2000—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: guoyixin2023@163.com。

通信作者: 胡永翔(1984—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: doctorhu110@hgu.edu.cn。

in the future were quantitatively evaluated, and their multiscale uncertainties were revealed, in order to provide a scientific basis for regional water ecosystem management. [Methods] This study integrated the MRI-ESM2-0 climate model, the future land use simulation (FLUS) model, and the integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model to evaluate the integrated effects of CC and LUCC on water conservation (WC) and soil erosion (SE) in Hebei Province, and to reveal their multiscale uncertainties. [Results] From 2024 to 2050, WC in Hebei Province showed an overall upward trend under both climate scenarios. Under the SSP245 scenario, WC increased first and then stabilized, while it continuously increased under SSP585. SE exhibited an overall declining trend, decreasing steadily under SSP245 but first increasing and then decreasing under SSP585. CC played a dominant role in influencing WRESs, with its contributions to WC and SE reaching up to 99.30% and 93.14%, respectively. However, its influence gradually weakened over time. The contribution of LUCC to WC declined over time, while its contribution to SE, though smaller, gradually increased. Uncertainty driven by CC was generally higher than that driven by LUCC, and overall uncertainty decreased over time across all scales. [Conclusion] Water-related ecosystem services in Hebei Province are projected to show an overall trend of “enhanced water conservation and reduced soil erosion”. The synergistic effects of climate humidification and ecological protection significantly improve regional hydrological regulation and ecological stability. Strengthening ecological restoration and implementing zonal management are key pathways to enhance regional water security and mitigate climate risks.

**Keywords:** water-related ecosystem services; land use change; climate change; integrated effects; multi-scale uncertainty

生态系统服务(ESs)是指人类从生态系统中获得的直接和间接益处。这些服务通常分为调节、供给、支持和文化4类,对维持人类福祉至关重要<sup>[1]</sup>。水生态系统服务(WRESs)包括产水量、土壤保持、水源涵养、水质净化等功能,对粮食生产、生物多样性保护和养分循环尤为关键<sup>[2]</sup>。然而,人类活动和全球环境变化显著改变了WRESs,2017年全球约7.85亿人缺乏安全饮用水,48亿人受到水安全威胁<sup>[3]</sup>。政府间生物多样性和生态系统服务科学政策平台(IPBES)进一步指出,3/4的陆地环境和66%的海洋环境已因人类活动发生显著改变<sup>[4]</sup>。

土地利用覆被变化(LUCC)和气候变化(CC)被广泛认为是影响ESs的主要驱动因素<sup>[5]</sup>。LUCC通过改变水文过程和径流模式影响生态系统的结构与功能<sup>[6]</sup>,而气候变化则通过降水、温度和蒸散量的变化影响WRESs,加剧水资源短缺和环境退化<sup>[7]</sup>。尽管许多研究探讨了历史和当前LUCC对WRESs的影响,但整合未来LUCC情景与气候变化预测的研究较少。基于第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的共享社会经济路径(SSP)和典型浓度排放路径(RCP)情景分析为研究这些交互作用提供了坚实框架<sup>[8]</sup>。然而,现有研究多集中于全球或国家尺度,空间分辨率不足以满足区域应用需求<sup>[9]</sup>。凸显了在区域尺度上耦合LUCC和CC以全面评估WRESs的必要性。

河北省作为京津冀地区的生态支撑区和首都水

源涵养区,在中国生态文明建设框架下具有重要地位,但面临水资源短缺和生态环境退化的严峻挑战。根据《河北省水土流失动态监测实施方案(2023—2027年)》,2022年河北省水土流失面积为 $3.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占全省总面积的21.16%,水土流失问题不容小觑。作为研究区域,河北省的生态服务功能和环境稳定性受LUCC和CC影响。因此本研究选取水源涵养量(WC)和水土流失量(SE)作为指标,基于2015—2024年的土地利用数据及驱动因素(如气象、社会经济、地形和土壤数据),本研究利用未来土地利用模拟(FLUS)模型,模拟2030年和2050年多情景土地利用格局。同时,采用CMIP6的SSP245和SSP585情景数据,通过Delta降尺度方法生成高分辨率的温度、降水和蒸散数据。这些输出与生态系统服务综合评估与权衡(InVEST)模型耦合,评估WRESs对情景的响应及子流域、县域尺度的不确定性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

河北省(36°01′—42°40′N,113°04′—119°53′E)东临渤海,内环京津,西接山西,南与山东、河南相邻,北邻内蒙古,是京津冀协同发展的重要生态屏障和首都水源涵养功能区。全省总面积约 $1.89 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,下辖11个地级市和168个县级行政单位,2024年末常住人口7378万人,地区生产总值47526.9亿元。地貌类型多样,整体呈西北高、东南低的格局,全

省属温带大陆性季风气候,四季分明,年日照时数2 303.1 h,年无霜期81~204 d,年平均气温14.6℃,年均降水量484.5 mm,降水呈由东南向西北递减的空间分布。受气候和地形共同影响,河北省水资源时空分布极不均衡,北部和西部地区尤为匮乏,人均水资源占有量远低于全国平均水平,是典型的资源性缺水区域。

## 1.2 数据来源

本研究数据按用途分为3类:FLUS模型驱动因子、InVEST模型输入数据和CMIP6气候预测数据(表1)。FLUS模型驱动因子数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),及中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)的河北省2015—2024年土地利用数据。InVEST模型输入数据来源于世界土壤协调数据库(Harmonized World Soil Database, HWSO)。气候数据来自CMIP6中MRI-ESM2~0气候模式的SSP245和SSP585情景。所有数据统一到WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50 N,投影坐标系后以300 m空间分辨率进行重采样。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 土地利用情景构建与未来土地利用空间格局预测

为探讨未来土地利用变化对水生态系统服务(WRESs)的影响,本研究基于河北省社会经济发展现状和未来规划目标,构建了3种具有代表性的土地利用情景:①自然增长情景(NGS),反映历史发展趋势下的土地利用变化;②生态保护情景(ECS),强调

生态优先的发展模式;③耕地保护情景(CDS),重点保障耕地资源。这些情景的设置充分考虑了区域可持续发展的多重需求。

FLUS模型集成了自上而下的系统动力学模型和自下而上的元胞自动机,并包含了人工神经网络的适应概率计算模块,具有模拟精度高、运算速度快、操作方便的特点,并且能够提供美观的动态可视化界面<sup>[10]</sup>。未来土地利用模拟步骤包括:①利用Markov链基于历史土地利用数据预测不同情景下各类用地的需求量;②基于2015年数据模拟2024年土地利用情景,再与2024年实际土地利用数据进行对比,计算kappa系数从而确定模型精准度。③综合气候、土壤、地形、区位等驱动因子,生成元胞转换概率,模拟2030年与2050年各情景的土地利用格局,具体参数如下:

(1)领域权重与转换成本矩阵。不同发展情景下,领域权重和空间转换的成本矩阵设置存在差异。参考田文涛等<sup>[11]</sup>相关研究,并对相关参数进行了改进(表1—2)。

表1 不同情景下各地类领域权重  
Table 1 Weights of different land use categories under different scenarios

情景类型	A	F	G	W	C	U
自然增长(NGS)	0.12	0.80	0	0.48	1.00	0.47
生态保护(ECS)	0.52	0.60	0	0.48	1.00	0.30
耕地保护(CDS)	0.10	1.00	0.3	0.90	1.00	0.30

注:A为耕地;F为林地;G为草地;W为水域;C为建设用地;U为未利用地。下同。

表2 各地类转移成本矩阵  
Table 2 Land use transition cost matrix

地类	自然增长情景						生态保护情景						耕地保护情景					
	A	F	G	W	C	U	A	F	G	W	C	U	A	F	G	W	C	U
A	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
F	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
W	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
C	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
U	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1

注:1表示两地类空间可相互转换;0表示两地类空间不能转换。

(2)精度验证。基于FLUS模型的Precision Validation模块,以2015年土地利用数据为基础,模拟得到2024年土地利用分布格局。将模拟结果与2024年实际土地利用数据进行精度验证,验证结果kappa系数为0.926 6,表明模型具有较高的模拟可靠性。

### 1.3.2 气候因子降尺度

MRI-ESM2-0气候模式因其在空间分布、年际

变率和多变量综合模拟方面的优异表现,成为预测东亚未来气候的理想选择。但其分辨率较低,不能直接应用于本研究。因此,利用Delta空间降尺度方法<sup>[12]</sup>,在MRI-ESM2-0气候模式下,得到河北省SSP245, SSP585为未来气候两种情景的代码。SSP245表示折中发展和中等碳排放情景,延续近几十年社会、经济与技术的发展趋势,土地利用管控策

略保持历史演变特征。SSP585表示高速发展和高碳排放情景,以化石能源大量消耗,经济快速扩张与高辐射强迫为主要特征,虽社会经济与科技水平显著提升,但温室气体排放强度大幅增加,土地利用调控更侧重经济发展需求,建设用地呈现快速扩张态势。计算公式为

$$T_f = T_0 + (T_{Mf} - T_{M0}) \quad (1)$$

$$P_f = P_0 \times \left( \frac{P_{Mf}}{P_{M0}} \right) \quad (2)$$

式中: $T_f$ 和 $P_f$ 分别为Delta方法降尺度后所需时段的气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm); $T_0$ 和 $P_0$ 分别为多年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm)的实测值; $T_{Mf}$ 和 $P_{Mf}$ 分别为某一时段气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm)的模拟值; $T_{M0}$ 和 $P_{M0}$ 分别多年平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )和降水量(mm)的模拟值。

### 1.3.3 WRESs的评估方法

本研究采用InVEST模型的产水量模块来评估河北省的水源涵养量。采用泥沙运移比例模块模拟和量化河北省水土流失量。

(1)产水量模型。利用InVEST的产水模块进行产水量评估,以蒸散、降水、土层深度等数据作为输入。每个像元的降水量与实际蒸散量的差值即为每个像元 $x$ 的产水量 $Y(x)$ :

$$Y(x) = \left( 1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)} \right) \times P(x) \quad (3)$$

$$\frac{\text{AET}}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left\{ 1 + \left[ \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} \right]^{\omega} \right\}^{\frac{1}{\omega}} \quad (4)$$

$$\omega(x) = Z \times \frac{\text{PAWC}(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (5)$$

$$\text{PAWC} = 54.509 - 0.132\text{sand} - 0.003\text{sand}^2 - 0.055\text{silt} - 0.006\text{silt}^2 - 0.738\text{clay} + 0.007\text{clay}^2 - 2.688\text{OM} + 0.501\text{OM}^2 \quad (6)$$

式中: $Y(x)$ 表示年产水量(mm); $\text{AET}(x)$ 表示年实际蒸散量(mm); $P(x)$ 表示年降水量(mm)。其中, $\text{PET}(x)$ 表示年潜在蒸散量(mm); $\omega(x)$ 表示自然气候-土壤性质的非物理参数,无量纲;PAWC表示植被可利用含水量(mm);sand,silt,clay,OM代表土壤中砂粒、粉粒、黏粒以及有机质的含量(%); $Z$ 为Zhang系数,反映区域气候和水文条件,经与《2024年河北省水资源公报》水资源量对比较准后,其最佳取值确定为16。生物物理参数的设定参考研究成果<sup>[13]</sup>,具体数值见表3。

(2)水源涵养量。由于下垫面的影响,本研究在产水量的基础上,引入地形指数、土壤饱和导水率等参数进行修正,以获得更符合实际水文过程的水源

涵养量<sup>[14]</sup>。其修正方法为:

$$C_x = \min \left( 1, \frac{249}{V_{L_x}} \right) \times \min (1, 0.3 \times T_x) \times \min \left( 1, \frac{K_{\text{sat},x}}{300} \right) \times Y_x \quad (7)$$

$$T_x = \lg \left( \frac{A_{\text{drainage},x}}{d_{\text{soil},x} \cdot S_{\text{percent},x}} \right) \quad (8)$$

式中: $C_x$ 表示水源涵养量(mm); $Y_x$ 表示产水量(mm); $V_{L_x}$ 表示土地利用 $L_x$ 的流速系数; $K_{\text{sat},x}$ 表示土壤饱和导水率(cm/d); $T_x$ 表示地形指数; $A_{\text{drainage},x}$ 表示区域汇水量(mm); $d_{\text{soil},x}$ 表示土层厚度(mm); $S_{\text{percent},x}$ 表示百分比坡度。

表3 生物物理参数

Table 3 Biophysical parameters

土地利用类型	土地利用分类代码	最大根系深度/mm	植被蒸腾系数	流速系数
耕地	1	600	0.8	1
林地	2	1500	1.0	1
草地	3	400	0.7	1
水域	4	0	1.0	0
建设用地	5	50	0.2	0
未利用地	6	50	0.3	0

(3)水土流失量。利用InVEST的泥沙输移比例模块对水土流失量进行定量评价。该模块基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE),通过计算地表潜在侵蚀量与泥沙输移率之间的关系,反映生态系统在防止土壤侵蚀和保持地表稳定方面的调节功能。

$$\text{usle}_n = R_n \times K_n \times LS_n \times C_n \times P_n \quad (9)$$

式中: $\text{usle}_n$ 为年实际土壤侵蚀量[t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )]; $R_n$ 表示降水侵蚀性因子[(MJ·mm)/( $\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a}$ )]; $K_n$ 表示土壤可蚀性因子[t· $\text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ ]; $LS_n$ 表示坡度坡长因子; $C_n$ 表示植被覆盖和作物管理因子; $P_n$ 表示水土保持措施因子; $P_n$ 和 $C_n$ 值依据文献<sup>[15]</sup>和InVEST模型手册确定。

### 1.3.4 相对贡献分析及驱动因子分析

(1)相对贡献分析。参考Li Jiangyue等<sup>[4]</sup>提出的计算方法,评估干旱区内陆盆地LUCC和CC对ESs的相对贡献。该方法可以对生态系数服务变化的驱动因素进行定量评估。计算公式如下:

$$P = \frac{|A(B)|}{|A| + |B|} \quad (10)$$

式中: $P$ 为各因子对生态系统服务的相对贡献率; $A$ 表示LUCC引起的生态系统服务的变化; $B$ 代表由CC引起的生态系统服务的变化。

(2)驱动因子分析。为进一步探究未来极端气

候变化与土地利用变化对 WRESs 的驱动机制,本研究参考 Zeng Wenting 等<sup>[16]</sup>的方法,采用 CatBoost 模型对水源涵养量(WC)与水土流失量(SE)进行建模。模型主要参数设置为:迭代次数 800,学习率 0.03,树深度 6,其中 75% 的样本用于训练,25% 的样本用于验证。模型性能评估采用  $R^2$  和 RMSE 2 项指标,所有模型  $R^2$  均高于 0.98,表明模型拟合效果优秀;RMSE 整体处于中低水平,表明模型稳定性良好。

为确保模型的可解释性,采用 SHAP 方法对 CatBoost 模型结果进行解析。SHAP 基于博弈论中的 Shapley 值原理,可将模型预测结果分解为各特征

$$CEI = \frac{ES_{\text{scenario2}} + ES_{\text{scenario3}} - ES_{\text{scenario1}} - ES_{\text{scenario4}}}{\max(ES_{\text{scenario}})} \quad (11)$$

式中:CEI 为综合效应指数,其中,当  $CEI > 0$  时表示生态系统服务间为权衡关系, $CEI = 0$  时为独立关系, $CEI < 0$  时为协同关系; $ES_{\text{scenario1}}$  为年际变化发生前的  $ES_s$  值; $ES_{\text{scenario2}}$  为 LUCC 下的  $ES_s$  值; $ES_{\text{scenario3}}$  是 CC 下的  $ES_s$  值; $ES_{\text{scenario4}}$  是年际变化发生后的情景值。

### 1.3.6 不确定性分析

Harmáčková 等<sup>[19]</sup>运用 MCS 在多个尺度上研究了 LUCC, CC 以及年际变化引起的 WRESs 的不确定性。通过 Arc GIS 将研究区划分为子流域尺度、县域尺度和栅格尺度。随后,计算多尺度下 WRESs 的平均值,创建每个个体尺度的 WRESs 空间图谱。随后对地图进行归一化处理,以实现在 0, 1 之间的值的一致范围。计算公式为

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12)$$

式中: $x_{\text{norm}}$  是多尺度的 WRESs 的标准化值; $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  分别为该尺度下所有 WRESs 的最小值和最大值。

利用标准化后的数值对每个情景的栅格图层进行分析和汇总,量化相应的 WRESs 值。情景间 MCS 的测度计算公式如下:

$$MCS = \frac{\sum_{n=1}^N (|a_n - b_n| / \max(a_n, b_n))}{N} \times 100 \quad (13)$$

式中:MCS 为映射比较统计量; $a_n$  和  $b_n$  为  $n$  个栅格中 WRESs 的标准化值; $N$  为研究区栅格总数。MCS 值介于 0(两幅相同地图集), 50(随机地图集), 100(相反地图集)之间。

## 2 结果与分析

### 2.1 未来气候变化

河北省在 2024—2050 年表现出显著的气温上升

的边际贡献值<sup>[17]</sup>,定量评估每个驱动因子对模型输出的正向或负向影响。SHAP 值的绝对大小代表特征影响的重要性,正值表示该特征促进作用,负值表示其抑制作用。模型输入变量包括 5 个关键驱动因子:土地利用强度、温度季节性、降雨季节性、年潜在蒸散量以及水分亏缺指数。

### 1.3.5 年际综合效应分析

借鉴 Bai Yang 等<sup>[18]</sup>的计算方法,评估过去 CC 和 LUCC 对生态系统服务的总体影响,目的是定量分析 LUCC 和 CC 对生态系统服务年际变化的影响。计算公式为

趋势(图 1)。在 SSP245 情景下,全省平均气温从 2024 年的 11.7 °C 上升至 2050 年的 14.1 °C,升温幅度达 2.4 °C。其中,冀北生态区的张家口升温最为显著,达到 2.9 °C,而南部农业区的邯郸升温幅度相对较小,为 1.85 °C。SSP585 情景下的升温更为剧烈,2050 年全省平均气温较 2024 年上升 3.1 °C,沧州的升温幅度高达 3.3 °C。空间分布上,气温变化呈现明显的南北差异,冀北地区升温幅度普遍高于南部,尤其是张家口和承德,升温速率显著高于其他地区。这种空间分异主要受地形和下垫面性质的影响,冀北山区的地形效应加剧了升温趋势,而南部平原地区受城市热岛效应的影响,升温速率相对较低但仍显著。

降水变化表现出明显的时空异质性(图 1)。基准期(2024 年)全省降水量从南部的邯郸(645 mm)到北部的张家口(421 mm),呈现南多北少的格局。SSP245 情景下,全省降水量 2050 年较 2024 年减少 9.2%,其中保定减少幅度最大,为 15.6%。SSP585 情景下,降水变化呈现“先旱后涝”的特征,2030 年全省降水量普遍减少,但到 2050 年,部分地区如邯郸降水量显著增加,增幅达 46.4%。空间分布上,沿海经济带的秦皇岛和唐山的降水量变化最为剧烈,SSP585 情景下 2050 年降水量分别增加 27.7% 和 43.5%,而冀北生态区的张家口降水量则持续减少,2050 年较 2024 年减少 24.7%。这种降水变化的空间分异主要受东亚夏季风和海气耦合作用的影响,沿海地区受台风路径北移的影响,降水量显著增加,而内陆地区则因水汽输送减少而趋于干旱。

### 2.2 土地利用模拟

#### 2.2.1 总体变化特征与空间格局

根据 FLUS 模型模拟(图 2),2015—2050 年河北省土地利用结构总体保持稳定,但未来在不同情

景下呈现显著差异。全省土地利用仍以耕地为主,其次为林地和草地,建设用地、水域和未利用地占比

较小。耕地主要集中于冀中南平原,林地多分布在太行山-燕山山区,草地主要位于坝上高原。

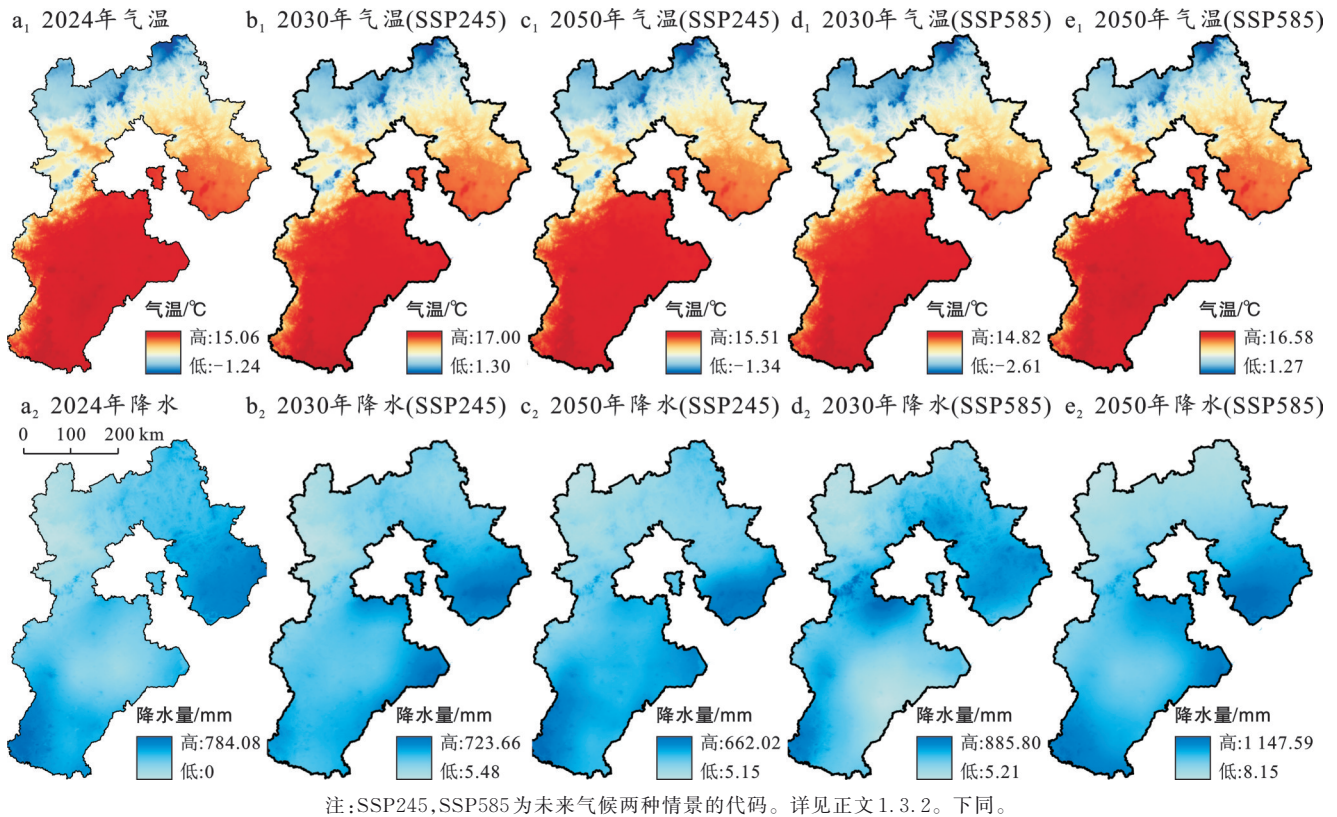


图1 不同情景下河北省气温和降水的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of temperature and precipitation in Hebei Province under different scenarios

从整体变化幅度看,北部地区变化最为显著。承德市2024—2030年土地利用变化比例分别为自然增长情景(NGS)(2.64%)、生态保护情景(ECS)(2.33%)、耕地保护情景(CDS)(2.66%),2030—2050年增至3.89%~4.54%,变化幅度高于其他地区。相比之下,秦皇岛、石家庄等区域变化较小,表明土地利用结构更稳定。总体上,2030—2050年变化幅度显著高于2024—2030年,呈现土地利用动态增强趋势。

### 2.2.2 NGS情景下的土地利用变化

在NGS情景下,土地利用变化以城市扩张为主要驱动力。2024—2030年,唐山市建设用地增加4.17%,保定市增加1.94%,廊坊增加3.59%,为扩张最明显区域;受此影响,耕地持续减少,例如承德耕地流失达2.28%。张家口林地略增(0.31%),但增长幅度难以抵消耕地占用。2030—2050年,建设用地进一步扩张,唐山、石家庄增幅分别达到2.70%和2.95%。同时出现局地复垦,如唐山建设用地转耕地达2.62%,但整体不足以逆转耕地持续下降趋势。总体上,NGS情景表现为“城市显著扩张,耕地持续减少,生态增长有限”。

### 2.2.3 ECS情景下的土地利用变化

在ECS情景下,生态保护政策显著抑制建设用地扩张并促进林草恢复。2024—2030年,承德和张家口林地增加最为显著,承德林地转化占比达1.83%,保定耕地向林地转化0.79%,建设用地普遍减少或保持低增长。2030—2050年,生态修复持续加强。张家口土地利用变化达3.69%,其中耕地向林地转化比例为1.62%;承德土地利用变化3.30%,林草扩张持续。保定林地增加2.80%,邢台增加1.40%。建设用地增长极低(多地不足0.1%)。该情景使河北生态屏障显著提升,尤以北部山区最为明显。

### 2.2.4 CDS情景下的土地利用变化

在CDS情景下,耕地红线政策得到严格执行,建设用地扩张明显受限。2024—2030年,唐山建设用地增长1.83%,保定增长0.61%,为三个情景中最低。承德耕地向林地转化0.18%,张家口林地增加0.90%,但整体变化幅度低于ECS。2030—2050年,耕地保护进一步强化。唐山、保定出现明显复垦,建设用地分别有1.08%和0.33%转回耕地。张家口林地增加0.81%,承德增加0.19%,变化较为平稳。CDS在保障耕地稳定性的同时也带来一定的生态恢复效应。

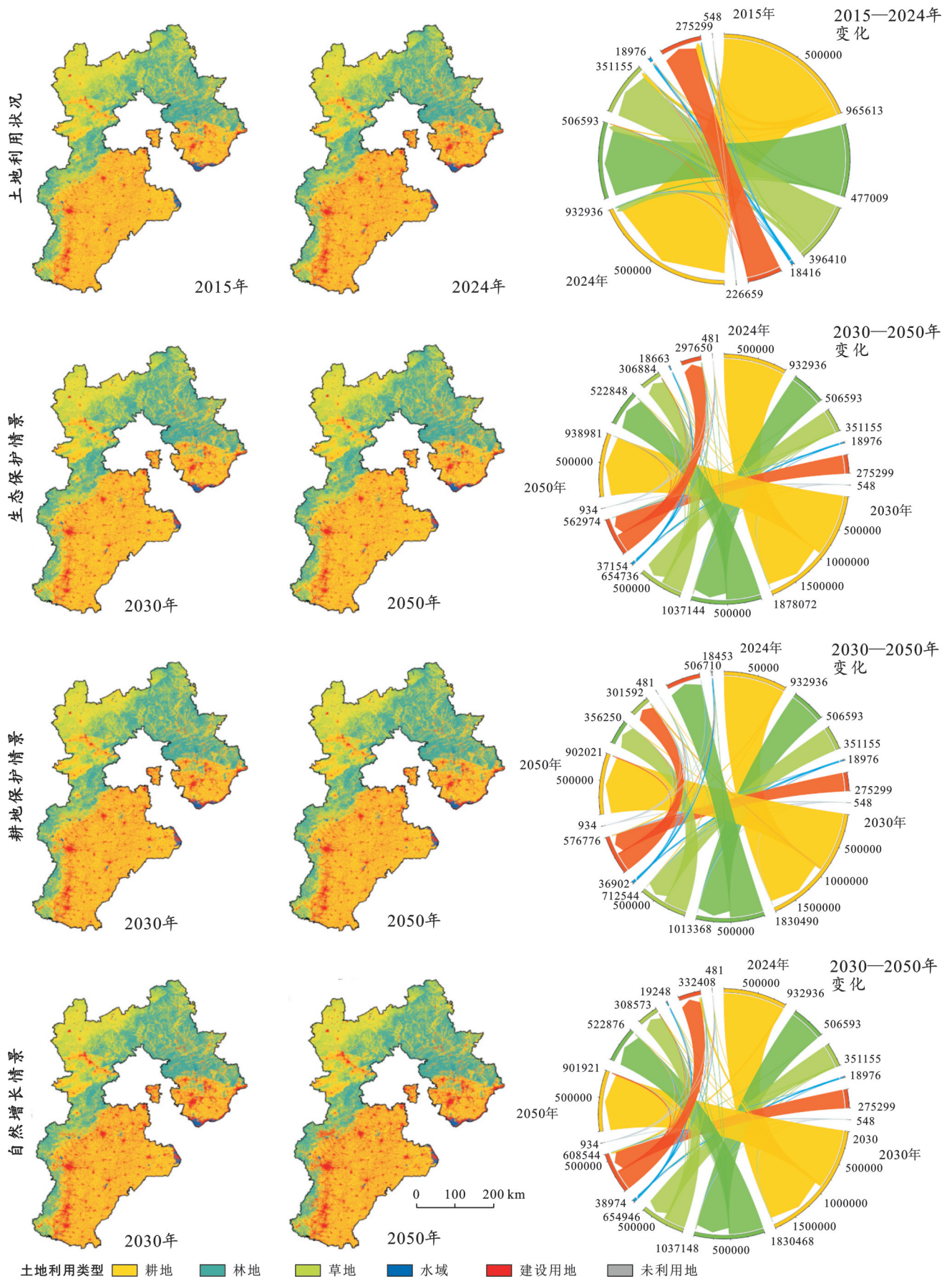


图 2 2015—2050 年河北省土地利用空间分布及变化

Fig.2 Spatial distribution and changes of land use in Hebei Province (2015—2050)

## 2.3 土地利用和气候变化对水生态系统服务的影响

### 2.3.1 水源涵养量

未来情景模拟结果(图3)表明,河北省水源涵养功能将持续增强,但不同气候路径及土地利用政策

组合下的表现存在明显差异。2024年全省水源涵养量(WC)为 $7.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,2030年不同情景组合下提升至 $7.19 \times 10^9 \sim 1354 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ;到2050年将提升至 $5.19 \times 10^9 \sim 2.08 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,增幅显著。

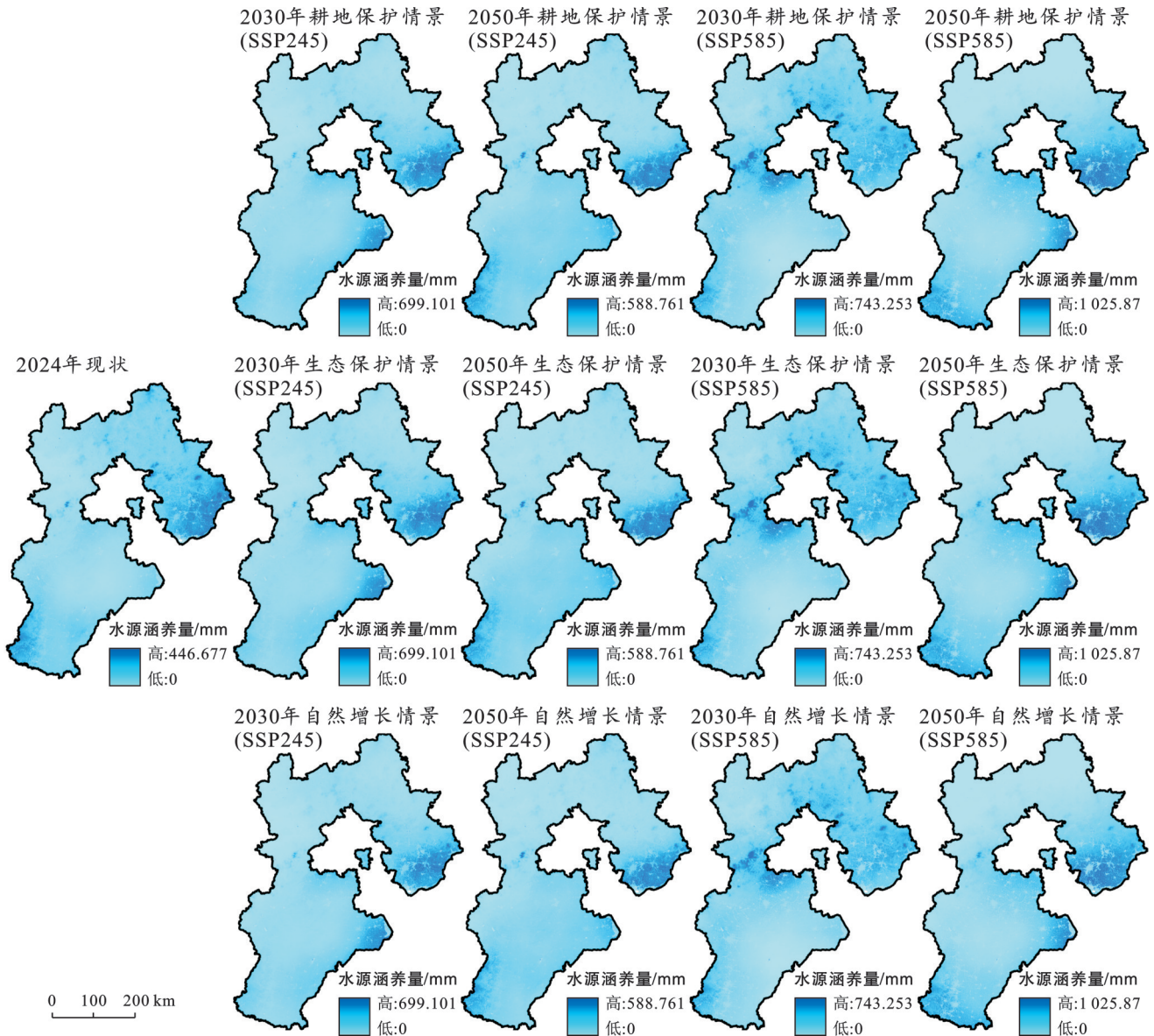


图3 2024—2050年河北省SSP245和SSP585及不同土地利用情景下平均水源涵养量(WC)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average water conservation (WC) under SSP245, SSP585, and different land use scenarios (2024—2050)

其中,SSP585-ECS和SSP585-CDS组合情景增幅最为突出,2050年WC较2024年增长超过70%,表明在气候湿化与生态恢复叠加的情况下,水源涵养能力提升更为迅速。与之相比,SSP245路径下增幅较为平稳,呈现“先增后稳”的趋势。此外,SSP585-NGS情景中部分区域出现WC下降,主要与极端气候导致的蒸散增强和不透水面增加有关,说明在缺乏土地管理干预的情况下,高排放路径下的系统不稳定性更加显著。

从土地利用类型看,林地和草地是河北省水源

涵养的核心生态用地,两者合计贡献比例始终保持在70%以上。未来情景下,ECS与CDS均推动林草面积增加,林地WC在2050年比2024年提升约40%~60%;草地增加带来的涵养提升也保持在15%~25%。相比之下,NGS情景中耕地减少与建设用地扩张的趋势更明显,导致平原区域WC增幅放缓甚至出现下降。

总体空间格局呈现“北强南弱,山区提升显著,平原相对稳定”的特点。张家口、承德及保定西部等西北山区受林草恢复、降水改善等因素影响,水源涵养提升

幅度最大,是未来河北省最重要的生态水源补给区。相反,石家庄、沧州、衡水等华北平原城市由于建设用地增加和不透水面扩张,WC提升幅度有限,部分情景下甚至略有下降,表明城市化加剧了区域水分调蓄能力的弱化。尤其是在 SSP585-NGS 情景中,极端气候与建设扩张叠加,对城市水文功能形成明显压力。

### 2.3.2 水土流失量

河北省未来的水土流失量(SE)表现为整体下降、区域差异显著的空间格局(图4)。2024年全省SE为  $1.75 \times 10^7$  t,到2030年 SSP245 情景下降至  $1.47 \times 10^7 \sim 1.49 \times 10^7$  t,但 SSP585 情景下受极端降水增强影响,将上升至  $4.09 \times 10^7 \sim 4.14 \times 10^7$  t;2050年所有情景下均下降至  $1.29 \times 10^7 \sim 1.95 \times 10^7$  t,较基期减少 20%~35%,说明长期尺度上生态治理与植被恢复的

效应更为突出。

从土地利用类型看,耕地依然是河北省水土流失的主要贡献来源,在各情景下占比均约为 50%,侵蚀强度显著高于林地与草地。林地和草地的平均侵蚀量仅为耕地的 20%~30%,在不同情景下均表现出良好的水土保持能力。

在各类土地利用情景中,生态保护情景(ECS)表现最优,耕地保护情景(CDS)次之,自然增长情景(NGS)最弱。ECS 情景通过扩大植被覆盖率,有效降低了 SE,使得全省水土流失量比 NGS 情景减少  $5.00 \times 10^5 \sim 1.00 \times 10^6$  t;CDS 在坡耕地管控与耕地稳定的前提下,减少了  $3.00 \times 10^5 \sim 8.00 \times 10^5$  t。NGS 情景下耕地流失仍较严重,反映了在缺乏管理干预的情况下水土流失治理仍面临压力。

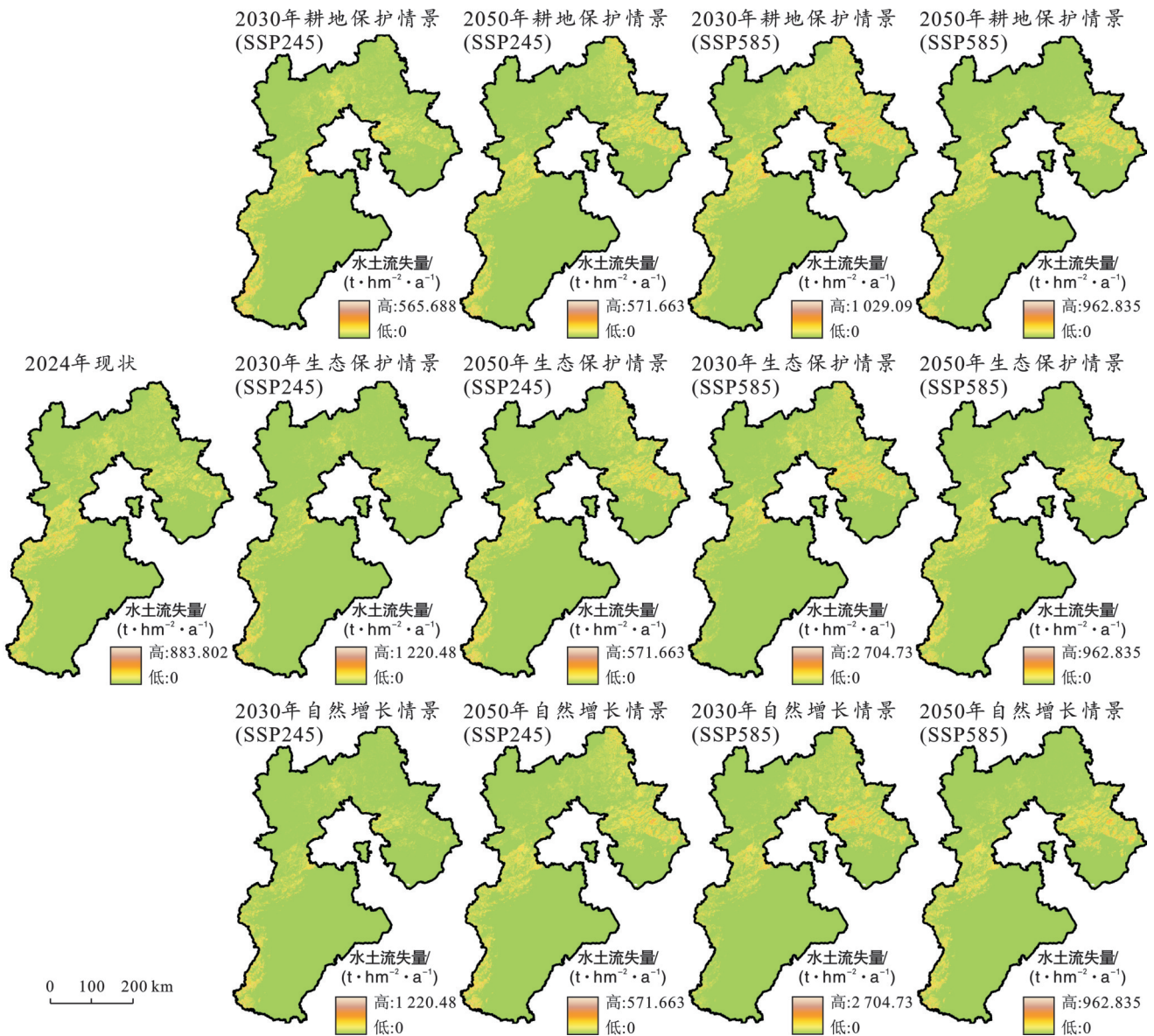


图 4 2024—2050 年 SSP245 和 SSP585 及不同土地利用情景下平均水土流失量(SE)的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average soil erosion (SE) under SSP245, SSP585 and different land use scenarios (2024—2050)

从空间格局看,河北省水土流失呈现“北高南低,山区显著,平原较稳”的特征。张家口、承德等北部山区由于坡度大,降雨集中,仍是土壤侵蚀高风险区域;石家庄、邢台、邯郸等平原地区侵蚀量较低,但建设用地扩张可能导致局地水蚀增加。到 2050 年,高排放路径下的多个情景中高值区明显收缩,林草恢复,北部山区的水土保持效果尤为突出,整体区域格局从集中向均衡演化。

需要注意的是,SSP585 情景下,2030 年 SE 的短期急剧上升,反映了极端降雨事件对侵蚀过程的放大效应。但随着土地利用结构优化、生态工程实施以及植被恢复的推进,这种不利影响在长期内逐步被削弱,显示出生态治理对抗气候风险的韧性。

## 2.4 相对贡献、驱动因子和综合效应分析

### 2.4.1 相对贡献及驱动因子分析

CC 和 LUCC 均对 WRESs 产生了显著影响。然而,CC 的影响明显大于 LUCC。CC 对 WC 的贡献率极高,2030 年和 2050 年贡献率为 86.42%~99.30%,其中 2030 年为 94.82%~99.30%,2050 年为 86.42%~92.20%。相比之下,LUCC 对 WC 的贡献率总体为 12.69%~89.17%,2030 年的贡献率为 46.53%~89.17%,但 2050 年下降至 12.69%~44.55%。

CC 对 WC 的影响随时间逐渐减弱,LUCC 的贡献率也呈现下降趋势,但 CC 始终是影响 WC 的主导因素。类似地,SE 受到 CC 的显著影响,其贡献率为 66.01%~93.14%。2030 年贡献率较高,为 93.09%~93.14%,到 2050 年下降至 66.01%~66.40%。相比之下,LUCC 对 SE 的贡献率较低,总体为 0.19%~1.15%。2030 年贡献率为 0.19%~0.70%,到 2050 年升至 0.55%~1.15%,表明 LUCC 的影响随时间逐渐增强。CC 在驱动 WRESs 中起主导作用,同时 LUCC 的影响随时间逐渐增加。

尽管 2030 年气候变化对水土流失的贡献高于水源涵养量,但到 2050 年其对水土流失的影响显著下降。相反,土地利用变化对水源涵养量的贡献远高于水土流失,尤其在 2030 年,但随时间呈减弱趋势,对水土流失的影响则呈现小幅但稳定的增长。

### 2.4.2 驱动因子分析

基于 CatBoost-SHAP 模型的解释性分析表明,水源涵养量(WC)与水土流失(SE)在不同情景下的主导驱动因子及其影响特征存在显著差异(图 5)。土地利用强度( $X_1$ )在所有情景中均居首位,表明人类活动对生态系统服务具有长期主导作用。气候因子( $X_2$ — $X_5$ )的贡献在未来情景中显著增强,特别是降雨季节性( $X_3$ )与年潜在蒸散量( $X_4$ ),表明在气候变暖背

景下,气候驱动正逐步成为 WRESs 的主要控制因素。

全局特征权重结果(图 6)进一步验证了这一趋势。对于 WC,降雨季节性( $X_3$ )在所有情景中保持较高权重,而 SSP585 情景下年潜在蒸散量( $X_4$ )和水分亏缺指数( $X_5$ )权重显著上升,反映未来的高温干旱将削弱水源涵养潜力。对于 SE,土地利用强度( $X_1$ )始终起主导作用,其次为降雨季节性( $X_3$ )与年潜在蒸散量( $X_4$ ),表明水土流失对人类土地管理和降水变率的耦合响应更为敏感。

### 2.4.3 综合效应评价

LUCC 和 CC 对 WC 和 SE 的综合效应在 SSP245 和 SSP585 情景下呈现出显著差异(图 7)。在 SSP245 情景下,LUCC 和 CC 影响了 99.17% 的 WC 像素和 95.33% 的 SE 像素,其中协同效应分别占 68.10% 和 67.12%,权衡效应分别占 31.07%(WC)和 28.20%(SE)。而在 SSP585 情景下,WC 的受影响像素略增至 99.37%,但权衡效应占主导地位,达 54.07%,协同效应降至 45.30%;SE 的受影响像素保持在 95.33%,协同效应降至 62.30%,权衡效应增至 33.03%。空间分布上,张家口和承德在 SSP585 情景下仍保持较高的协同效应。从 SSP245 到 SSP585,WC 的协同效应减少了 22.81%,权衡效应增加了 23.00%;SE 的协同效应减少了 4.82%,权衡效应增加了 4.82%。

城市层面的变化表明,张家口 WC 的协同效应增幅最大(39.87%),秦皇岛降幅最大(-96.96%);而在 SE 方面,秦皇岛的协同效应增幅最大(72.83%),邢台降幅最大(-93.95%)。

## 2.5 不同尺度下的不确定性

### 2.5.1 子流域尺度下的不确定性

在子流域尺度下,CC 和 LUCC 对 WRESs 的影响具有显著的不确定性(图 8)。总体而言,CC 下的不确定性普遍高于 LUCC。WC 的不确定性在 SSP585 下尤为显著,与降水模式的剧烈变化密切相关;而 SE 的不确定性则更多受到土地利用类型变化的影响。

在 LUCC 情景下,不确定性随着时间推移逐渐累积。WC 的不确定性在 2050 年 SSP245 情景下的 ECS-NGS 中达到最高值。SE 的不确定性在 2050 年 SSP585 情景下 NGS-CDS 中达到峰值。ECS-NGS 和 NGS-CDS 之间的不确定性差异明显,凸显了土地利用政策选择对 WRESs 长期影响的重要性。

在 CC 情景下,不确定性在 2030 年达到峰值,其中 WC 的不确定性值为 48.35,SE 为 41.35。到 2050

年,WC 和 SE 的不确定性分别下降至 30.43 和 21.48。 WC 的不确定性对降水模式的时空变化表现出更高 的敏感性,而 SE 的不确定性则受温度升高和降水极 端事件的双重影响。

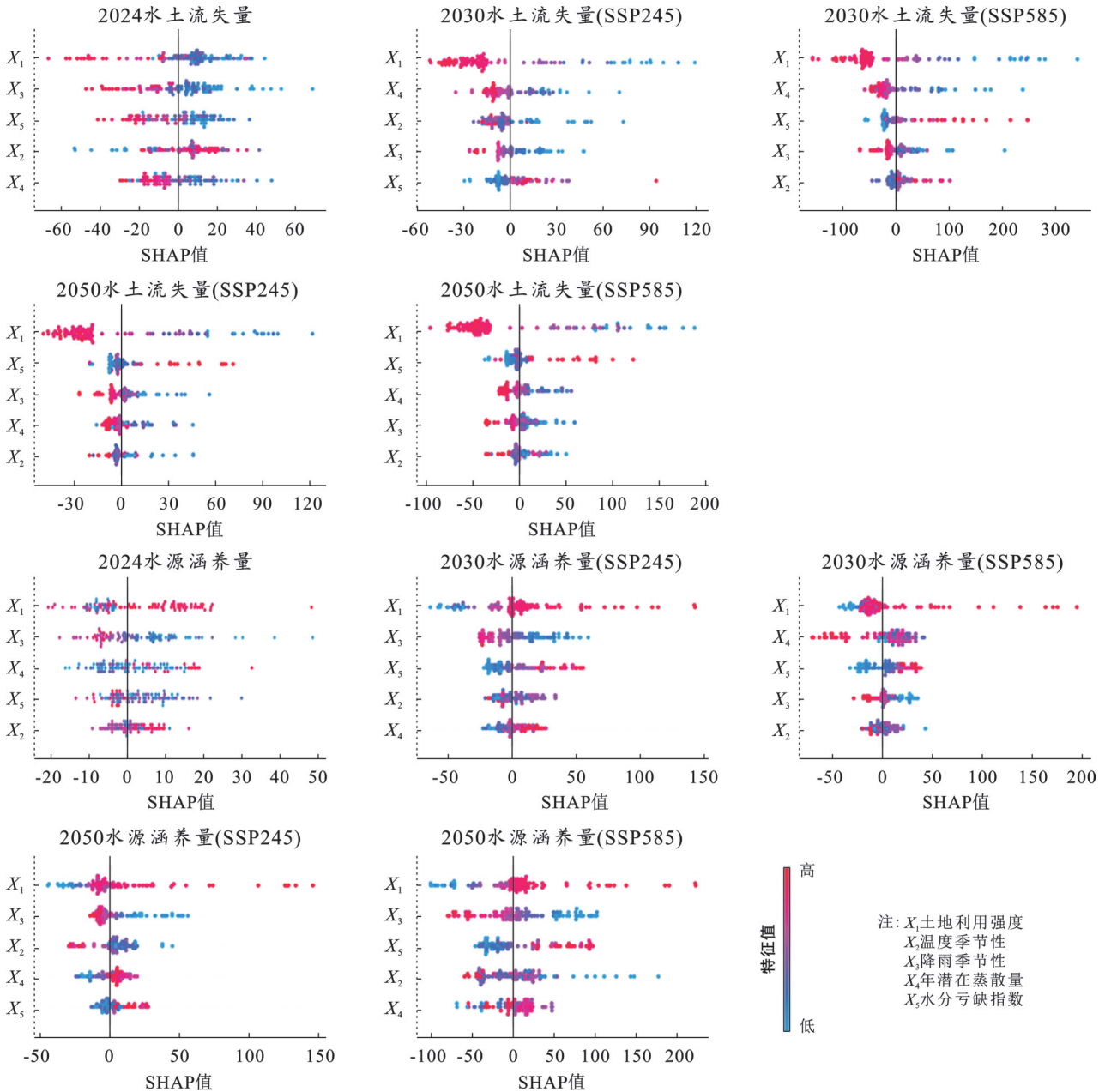


图 5 基于 SHAP 值的多情景驱动因子蜂群图

Fig.5 Swarm plots of driving factors under multiple scenarios based on SHAP values

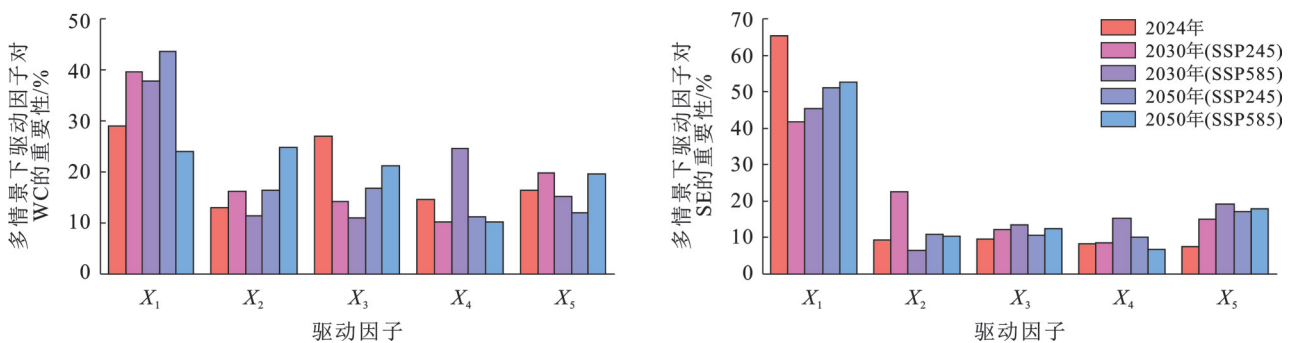


图 6 不同情景下水源涵养量(WC)与水土流失量(SE)的全局特征权重

Fig.6 Global feature weighting results of water conservation (WC) and soil erosion (SE) under different scenarios

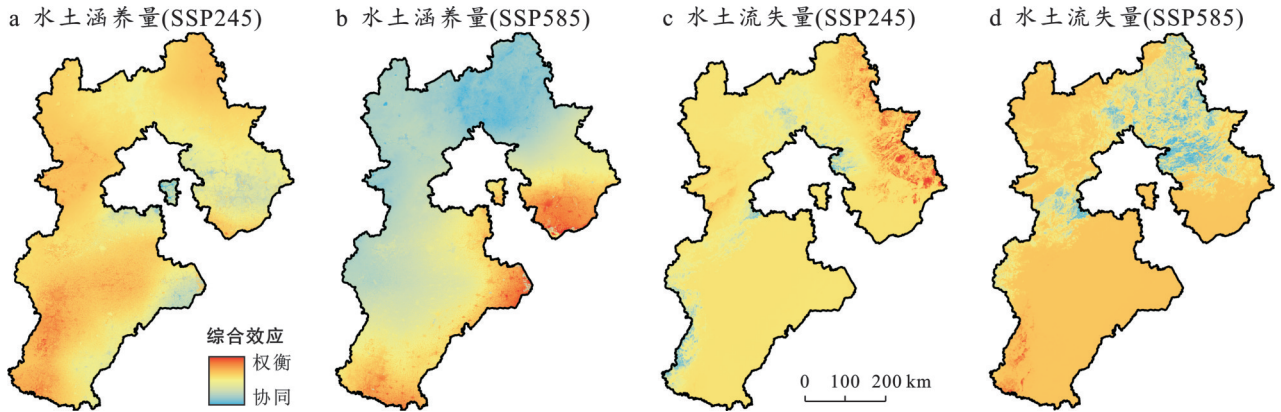
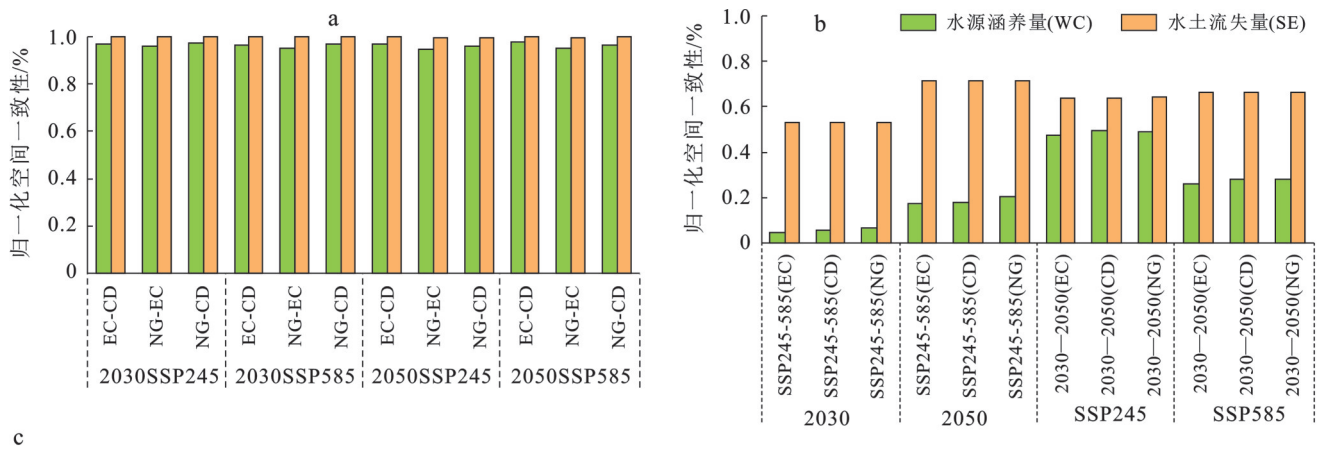


图7 2030—2050年气候变化(CC)和土地利用变化(LUCC)年际变化对水土流失量(SE)的综合效应  
 Fig.7 Integrated effects of climate change (CC) and land use and land cover change (LUCC) interannual changes on soil erosion (SE) (2030—2050)



2030SSP245			2030SSP585			2050SSP245			2050SSP585		
EC-CD	EC-NG	NG-CD	EC-CD	EC-NG	NG-CD	EC-CD	EC-NG	NG-CD	EC-CD	EC-NG	NG-CD
2.15	3.09	1.88	1.88	2.71	1.60	2.46	4.53	3.30	1.94	3.52	2.60
0.24	0.35	0.24	0.24	0.35	0.24	6.01	0.52	5.90	0.27	0.52	0.42
SSP245			SSP585			2030			2050		
2030—2050 (EC)	2030—2050 (CD)	2030—2050 (NG)	2030—2050 (EC)	2030—2050 (CD)	2030—2050 (NG)	SSP245-SSP585 (EC)	SSP245-SSP585 (CD)	SSP245-SSP585 (NG)	SSP245-SSP585 (EC)	SSP245-SSP585 (CD)	SSP245-SSP585 (NG)
36.81	35.16	35.95	49.91	48.97	49.23	53.24	52.97	52.63	50.35	49.88	48.86
30.87	30.12	30.90	47.05	47.03	47.10	48.51	48.51	48.51	25.72	24.54	25.72

注:a为不同气候情景下不同时期土地利用空间一致性分析的MCS;b为同一土地利用情景下不同气候情景和不同时期之间空间一致性分析的MCS;c为LUCC或CC情景之间的MCS值。

图8 根据水源涵养量(WC)和水土流失量(SE)提供的成对情景之间的空间一致性以及子流域尺度的MCS值  
 Fig.8 Spatial consistency between paired scenarios based on water conservation (WC) and soil erosion (SE), and MCS values at sub-watershed scale

2.5.2 县域尺度下的不确定性

在县域尺度下,CC和LUCC对WRESs不确定性的影响幅度较子流域尺度更为显著(图9)。WC和SE的不确定性在CC情景下尤为突出,而LUCC情景的不确定性则呈现随时间逐步累积的趋势。由于县域尺度的行政边界划分和土地管理政策的差异,不确定性表现出更高的空间异质性。在LUCC情景下,WC的不确定性在2050年SSP245情景的ECS-NGS中达到最高(MCS=10.94),SE在同一情景中

为0.61。SE的不确定性在城市化程度较高的情景(如NGS-CDS)中更为突出,表明水土流失能力对土地利用强度的敏感性较高。在CC情景下,WC和SE的不确定性在2030年达到最高值,分别为58.39和57.70,但到2050年分别下降至32.76和21.91。不确定性的高值主要集中在2030年,表明短期气候波动对WRESs的影响更为显著。

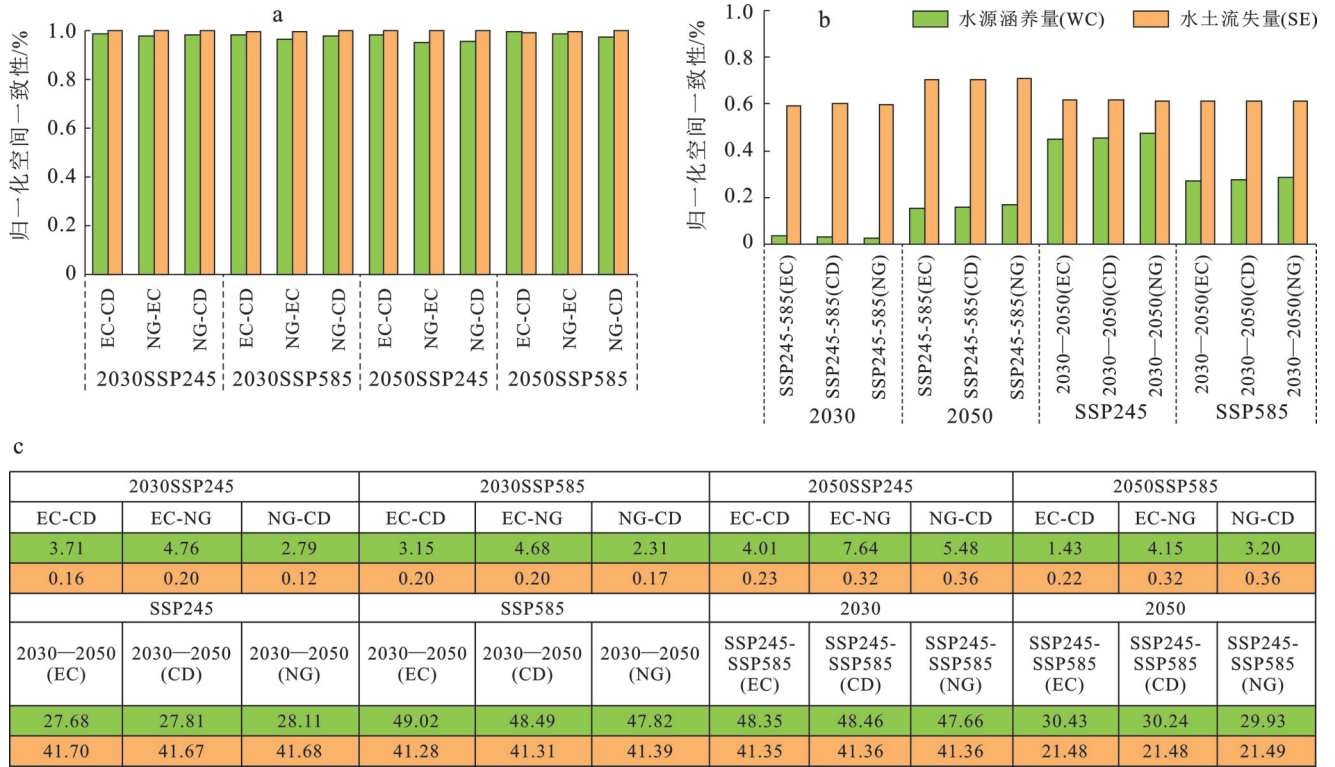
2.5.3 栅格尺度下的不确定性

在栅格尺度下,WRESs的不确定性表现出更高

的局部变异性(图 10),SE 和 WC 受 LUCC 和 CC 的共同驱动。高分辨率数据揭示了土地利用类型细微变化对 WRESs 的放大效应。SE 的不确定性在 2050 年 SSP245 情景下的 ECS-CDS 中达到 6.01,表明生态优先与建设优先情景在水土流失中的显著分化。WC 的不确定性在同一年的 ECS-NGS 中为 4.53,自

然增长情景下的水文变异性尤为突出。

在 CC 情景下,SE 和 WC 的不确定性在 2030 年较高,分别为 48.51 和 53.24。到 2050 年 SE 和 WC 分别下降至 25.72 和 50.35。WC 的不确定性降幅较小,表明其水文过程在高分辨率尺度下对气候变化具有持续敏感性。



注:a为不同气候情景下不同时期土地利用空间一致性分析的MCS;b为同一土地利用情景下不同气候情景和不同时期之间空间一致性分析的MCS;c为LUCC或CC情景之间的MCS值。

图 9 根据水源涵养量(WC)和水土流失量(SE)提供的成对情景之间的空间一致性以及县域尺度的MCS值  
Fig.9 Spatial consistency between paired scenarios based on water conservation (WC) and soil erosion (SE), and MCS values at county scale

跨尺度不确定性分析显示,子流域尺度的平滑效应降低了不确定性,但可能掩盖局部变异;县域尺度的高不确定性与区域政策的异质性密切相关;而栅格尺度能够精确捕捉微观层面的环境变化。

### 3 讨论

与南方湿润区、东北山区、西南地区及全国典型流域的综合研究对比表明,WRESs对气候变化(CC)和土地利用变化(LUCC)的响应存在清晰的规律与显著的空间分异。

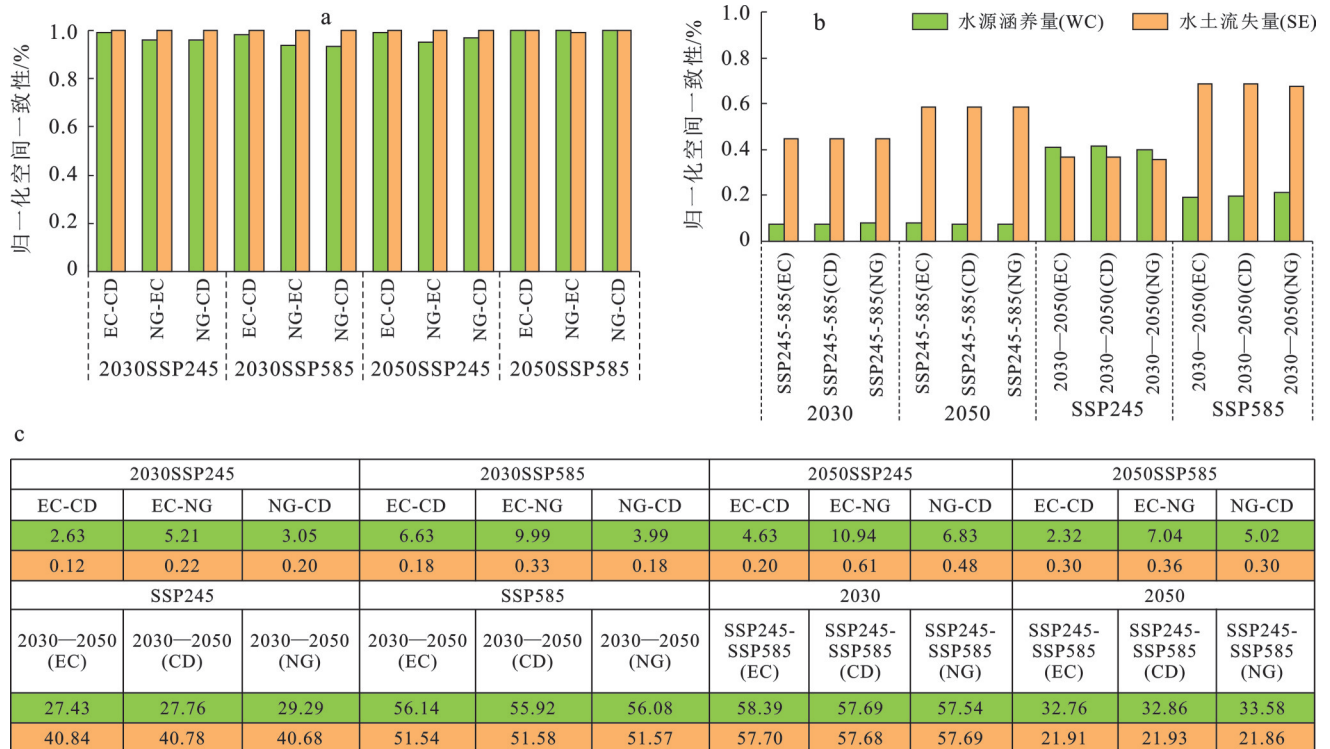
驱动因子的相对贡献呈现出以气候变化为主导的普遍模式,但在极端环境下存在例外。本研究中气候变化对WRESs的高贡献率,与西南地区(84.23%)<sup>[20]</sup>、长白山地区(主导因子)<sup>[21]</sup>及全国多数流域(气候贡献率>90%)<sup>[22]</sup>的结论高度一致,凸显了气候模型不确定性对未来水资源安全的显著影

响。此类气候主导的结论亦在北方半干旱/半湿润区域的研究中得到验证<sup>[23]</sup>。Xiao Yang等<sup>[24]</sup>利用全国InVEST模型定量表征了水源涵养服务,结果显示气候因子可解释其空间差异的83.5%,并指出在半干旱区降水是主要约束因素;Zhai Ran等<sup>[25]</sup>进一步指出,在1982—2015年,气候变化对生态系统水文功能的影响强于土地利用变化。对于水土流失过程,Weng Xuerou等<sup>[26]</sup>利用RUSLE模型在全国范围内发现,未来RCP4.5与RCP8.5情景下平均水蚀率分别上升约21.2%和33.1%,其中气候变化贡献率为59.99%~78.21%;Yin Changyan等<sup>[27]</sup>基于CMIP6多情景的模拟表明,极端降水事件将导致全国侵蚀强度上升约2.9%,并在北方地区形成高风险带。

然而,在西北内陆的叶尔羌河流域,大面积的未利用地向高植被覆盖地类的转化,使得LUCC的贡献率(88.9%)远超CC(11.2%)<sup>[22]</sup>。说明在特定地理

与社会经济条件下,土地利用转变仍可成为主导因子。王世清等<sup>[28]</sup>在张家口地区发现,林地扩张与水源涵养能力提升呈显著正相关,说明生态工程与土地利用优化可有效抵消气候波动的负面效应。同时,黄河及其不同河段的研究显示,土地利用强度、退耕还林等工程对径流与泥沙输移具有显著影响,提示流域生态工程会在空间上改变 WRESs 的响应格局<sup>[23]</sup>。

此外,Sun Dingzhao 等<sup>[29]</sup>对黄土高原的相关研究表明,在高排放情景下,水源涵养增强与洪涝风险上升可能并存,需在涵养功能提升与灾害调蓄之间实现平衡。在土壤保持方面,河北省北部山区的水土流失减弱趋势,与长白山、西南等植被恢复良好山区研究结果一致,表明生态保护与植被恢复对土壤侵蚀抑制具有稳健效果。



注:a为不同气候情景下不同时期土地利用空间一致性分析的MCS;b为同一土地利用情景下不同气候情景和不同时期之间空间一致性分析的MCS;c为LUCC或CC情景之间的MCS值。

图 10 根据水源涵养量(WC)和水土流失量(SE)提供的成对情景之间的空间一致性以及栅格尺度的MCS值

Fig.10 Spatial consistency between paired scenarios based on water conservation (WC) and soil erosion (SE), and MCS values at grid scale

河北省水生生态系统服务的变化格局,在验证气候变化主导作用这一普遍规律的同时,更凸显了其作为华北半干旱-半湿润过渡带正经历由气候变化驱动、从水资源短缺向洪涝风险加剧的潜在转型。因此,京津冀地区的水资源管理策略必须进行前瞻性调整,从以往单一的“保水”战略,转向“保水与防洪并重”的适应性治理新模式,以构建更具韧性的区域水安全体系。

本研究通过多尺度分析评估了土地利用变化(LUCC)和气候变化(CC)对河北省水相关生态系统服务(WRESs)的影响,但仍存在局限性。模拟过程中,仅采用2种气候情景和单一模型,未能全面反映气候变化的多样性和不确定性。土地利用预测依赖历史驱动因子,未充分考虑未来人口迁移、城市化加速或政策变化(如生态保护红线)的动态影响,模型参数和数据分辨率的限制进一步增加了预测不确定

性。未来研究应扩展气候情景范围,纳入低排放路径以更好反映减排政策的影响,同时动态整合人口、城市化和政策等社会经济因素,提高预测的现实性。研究还需涵盖水净化、粮食生产等更多WRESs,全面评估生态系统服务的权衡关系,结合多尺度分析,为京津冀生态管理提供精准支持。

## 4 结论

(1) 2024—2050年,河北省气温显著上升,SSP585情景下升温幅度高于SSP245,呈现“北高南低”的空间特征。降水总体呈“南增北减”格局,SSP585情景下2050年降水量较2030年增加,气候湿润化趋势增强。

(2) 自然增长情景(NGS)下,土地利用变化主要受历史趋势延续驱动,森林和草地略有增加,而建设

用地继续扩张,挤压耕地空间。生态保护情景(ECS)显著促进林草恢复和生态用地扩张,强化了北部山区的生态屏障功能;耕地保护情景(CDS)在稳定耕地面积的同时,有效抑制了建设用地蔓延。

(3)在未来气候与土地利用共同驱动下,河北省水源涵养功能总体显著增强但波动加剧。2024—2050年,水源涵养量在各情景下均上升,SSP585-ECS情景增幅最大。而SSP585-NGS情景中部分区域水源涵养量下降,反映极端气候的不稳定性。林地和草地是主要水源涵养来源,占比超过70%。水土流失量总体下降,生态保护与植被恢复显著改善水土保持功能。ECS情景下降幅最大,高排放情景下虽受暴雨影响短期上升,但至2050年总体减幅超过50%。耕地仍是主要侵蚀源,而林草扩张有效降低了土壤侵蚀强度。总体表现为气候湿化与生态优化协同促进水源涵养增强、土壤侵蚀减弱的趋势。

(4)气候变化长期主导WRESs的变化,但LUCC的影响随时间增强,尤其对SE的贡献逐渐上升。驱动因子分析表明,降雨季节性和潜在蒸散量是气候主控变量,土地利用强度仍是关键的人类因子,未来调控机制呈现由“人类主导-气候约束”向“气候主导-人类调节”转变。

(5)气候变化驱动的不确定性在2030年最高,随后下降;LUCC的不确定性随时间累积,县域尺度最高,栅格尺度局部波动最强,子流域尺度相对较低。高排放情景下不确定性更为突出,体现区域政策差异和地表变化的复合影响。总体上,气候主导的不确定性逐步减弱,而土地利用的不确定性在长期累积,体现了分区管控与多尺度评估的重要性。

## 参考文献 (References)

- [1] Wang Hebin, Wang W J, Liu Zhihua, et al. Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in northeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: 115131.
- [2] Sahle M, Saito O, Fürst C, et al. Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 573-586.
- [3] Liu Junguo, Bridget R. Food-energy-water nexus for multi-scale sustainable development [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154: 104565.
- [4] Li Jiangyue, Zhang Chi, Zhu Shihua. Relative contributions of climate and land-use change to ecosystem services in arid inland basins [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: 126844.
- [5] Fu Qi, Li Bo, Hou Ying, et al. Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: A case study in Altay Prefecture, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 633-646.
- [6] Han Ze, Song Wei, Deng Xiangzheng, et al. Responses of ecosystem service to land use change in Qinghai Province [J]. *Energies*, 2016, 9(4): 303.
- [7] Chanapathi T, Thatikonda S. Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna River basin under present and future scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137736.
- [8] Cook B I, Mankin J S, Marvel K, et al. Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(6): e2019EF001461.
- [9] Li Jiangyue, Chen Xi, Kurban A, et al. Coupled SSPs-RCPs scenarios to project the future dynamic variations of water-soil-carbon-biodiversity services in central Asia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107936.
- [10] Sun Lin, Yu Huajun, Sun Mingxing, et al. Coupled impacts of climate and land use changes on regional ecosystem services [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116753.
- [11] 田文涛,都沁军.河北省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].*环境科学*,2025,46(10):6378-6392.  
Tian Wentao, Du Qinjun. Evaluation and prediction of synergistic relationship of ecosystem services trade-offs in Hebei Province [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(10): 6378-6392.
- [12] Salehnia N, Hosseini F, Farid A, et al. Comparing the performance of dynamical and statistical downscaling on historical run precipitation data over a semi-arid region [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 55(4): 737-749.
- [13] 孙孝平.基于土地利用变化情景的开化县生态系统服务功能评估研究[D].江苏南京:南京林业大学,2016.  
Sun Xiaopin. Assessment of ecosystem service functions in Kaihua County based on land use change scenarios [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Forestry University, 2016.
- [14] 李怡颖,范继辉,廖莹.基于InVEST模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J].*草业科学*,2020,37(7):1313-1324.  
Li Yiying, Fan Jihui, Liao Ying. Analysis of spatial and temporal differences in water conservation function in Zhangjiakou based on the InVEST model [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1313-1324.
- [15] 李倩茹,贾彦龙,王慧军,等.基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J].*地理学报*,2023,78(11):2833-2849.  
Li Qianru, Jia Yanlong, Wang Huijun, et al. Trade-off and synergy analysis of ecosystem services in Hebei

- Province based on ecological functional zones [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023,78(11):2833-2849.
- [16] Zeng Wanting, He Li, He Zhengwei, et al. A prediction-interaction-driving framework for ecosystem services under climate change and human activities: A case study of Zoigê Plateau [J]. *Land*, 2025,14(3):441.
- [17] Štrumbelj E, Kononenko I. Explaining prediction models and individual predictions with feature contributions [J]. *Knowledge and Information Systems*, 2014, 41(3):647-665.
- [18] 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.
- [19] Harmáčková Z V, Vačkář D. Future uncertainty in scenarios of ecosystem services provision: Linking differences among narratives and outcomes [J]. *Ecosystem Services*, 2018,33:134-145.
- [20] Ma Xuenan, Zhang Ping, Yang Lianwei, et al. Assessing the relative contributions, combined effects and multiscale uncertainty of future land use and climate change on water-related ecosystem services in southwest China using a novel integrated modelling framework [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024,106:105400.
- [21] Wang Hebin, Wang W J, Wang Lei, et al. Impacts of future climate and land use/cover changes on water-related ecosystem services in Changbai Mountains, northeast China [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022,10:854497.
- [22] Yu Chunxue, Huang Xia, Guo Qian, et al. Predicting water ecosystem services under prospective climate and land-use change scenarios in typical watersheds distributed across China [J]. *Ecological Indicators*, 2024,159:111744.
- [23] Niu Haipeng, Liu Mengmeng, Xiao Dongyang, et al. Spatio-temporal characteristics of trade-offs and synergies in ecosystem services at watershed and landscape scales: A case analysis of the Yellow River basin (Henan section) [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(23):15572.
- [24] Xiao Yang, Ouyang Zhiyun. Spatial-temporal patterns and driving forces of water retention service in China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019,29(1):100-111.
- [25] Zhai Ran, Tao Fulu. Climate change in China affects runoff and terrestrial ecosystem water retention more than changes in leaf area index and land use/cover over the period 1982—2015 [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021,126(4):e2020JG005902.
- [26] Weng Xuerou, Zhang Boen, Zhu Jinxin, et al. Assessing land use and climate change impacts on soil erosion caused by water in China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(10):7865.
- [27] Yin Changyan, Bai Chenyun, Zhu Yuanjun, et al. Future soil erosion risk in China: Differences in erosion driven by general and extreme precipitation under climate change [J]. *Earth's Future*, 2025, 13(3): e2024EF005390.
- [28] 王世清,冀正欣,卢龙辉,等. 张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(10):131-140.
- Wang Shiqing, Ji Zhengxin, Lu Longhui, et al. Spatio-temporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(10):131-140.
- [29] Sun Dingzhao, Liang Youjia, Peng Shouzhong. Scenario simulation of water retention services under land use/cover and climate changes: A case study of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(4):390-410.

(上接第 352 页)

- [26] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.
- [27] 叶梦姚,史小丽,李加林,等. 快速城镇化背景下的浙江省海岸带生态系统服务价值变化[J]. *应用海洋学学报*, 2017,36(3):427-437.
- Ye Mengyao, Shi Xiaoli, Li Jialin, et al. Changes of ecosystem service value under the rapid urbanization in the coastal zone of Zhejiang Province [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2017,36(3):427-437.
- [28] 杨超,段斌俏,陈万旭. 发达地区城镇化和生态系统服务交互胁迫关系研究:以广东省为例[J]. *安全与环境学报*, 2024,24(11):4494-4505.
- Yang Chao, Duan Binqiao, Chen Wanxu. Interactive coercive relationship between urbanization and ecosystem services in developed regions: A case study of Guangdong Province [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024,24(11):4494-4505.