

# 气候和土地利用变化对白洋淀流域 土壤保持功能的影响

杨超<sup>1</sup>, 张蕾<sup>1</sup>, 龚磊<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071000;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304)

**摘要:** [目的] 对白洋淀流域的土壤保持功能进行评估, 量化气候和土地利用变化对土壤保持量变化的影响, 为推进白洋淀流域生态环境保护提供科学依据。[方法] 基于 2000—2020 年气象、土地利用、土壤等数据, 应用 InVEST 模型模拟分析白洋淀流域土壤保持量的时空变化特征, 并基于情景模拟与趋势分析法识别了土地利用与气候变化对土壤保持量变化的相对贡献。[结果] ① 2000—2020 年白洋淀流域降水量多年平均值为 445 mm, 整体呈现增加趋势, 流域范围内北京市和保定市东北部降水量均高于流域多年平均值。② 2000—2020 年, 白洋淀流域的主要土地利用类型为耕地和林地, 面积比例分别为 40.16%~44.13% 和 24.71%~27.72%。耕地和草地面积显著减少, 林地和建设用地面积显著增加, 耕地主要转化为建设用地, 草地主要转化为林地。③ 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年, 白洋淀流域的土壤保持强度分别为 9 500, 9 380, 11 000, 10 700 和 12 500 t/km<sup>2</sup>。年际变化整体呈波动增加趋势, 空间分布上呈西北高、东南低的格局。林地和草地的土壤保持强度显著高于其他土地利用类型。④ 气候变化主导土壤保持量变化的面积比例为 93.07%, 土地利用变化主导土壤保持量变化的面积比例为 6.93%。[结论] 白洋淀流域土壤保持量变化受气候和土地利用变化共同主导, 气候变化为主要影响因素。

**关键词:** 土壤保持功能; InVEST; 气候变化; 土地利用变化; 白洋淀流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0363-11

**中图分类号:** TV212.4, S157.1

**文献参数:** 杨超, 张蕾, 龚磊. 气候和土地利用变化对白洋淀流域土壤保持功能的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 363-373. Yang Chao, Zhang Lei, Gong Lei. Impacts of climate and land use change on soil conservation function in Baiyangdian basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 363-373. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.022; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.022.

## Impacts of climate and land use change on soil conservation function in Baiyangdian basin

Yang Chao<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Gong Lei<sup>2</sup>

(1. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300304, China)

**Abstract:** [Objective] The soil conservation function of Baiyangdian basin was evaluated, and the impact of climate and land use change on soil conservation change was quantified, in order to provide scientific basis for promoting ecological environmental protection in Baiyangdian basin. [Methods] Based on meteorological, land use, and soil data from 2000 to 2020, the InVEST model was applied to simulate and analyze the spatiotemporal changes in soil conservation in the Baiyangdian basin. Scenario simulations and trend analysis were used to identify the relative contributions of land use and climate change to changes in soil conservation. [Results] ① The annual average precipitation in the Baiyangdian basin was 445 mm from 2000 to 2020, with an overall increasing trend. The precipitation in Beijing City and the northeastern part of Baoding City was higher than the basin's multi-year average. ② From 2000 to 2020, the main land use types in the Baiyangdian basin were cultivated land and forest

收稿日期: 2024-09-18

修回日期: 2025-01-21

采用日期: 2025-01-22

资助项目: 河北省自然科学基金项目“水系连通变异下白洋淀流域水文—生态过程耦合模拟与响应机制研究”(E2024204017); 河北省省属高等学校基本科研业务项目(KY2021001); 中国地质调查项目(DD20240081, DD20242735)

第一作者: 杨超(1999—), 女(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文过程模拟研究。Email: 17531701920@163.com。

通信作者: 张蕾(1983—), 女(汉族), 河北省沧州市人, 博士, 副教授, 主要从事流域生态水文过程模拟方面的研究。Email: 463790357@qq.com。

land, accounting for 40.16%—44.13% and 24.71%—27.72% of the area, respectively. The area of cultivated land and grassland decreased significantly, while the area of forest land and construction land increased significantly. Cultivated land was mainly converted to construction land, and grassland was mainly converted to forest land. ③ In 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020, the soil conservation intensity in the Baiyangdian basin was 9 500, 9 380, 11 000, 10 700, 12 500 t/km<sup>2</sup>, respectively. The interannual variation showed a fluctuating increasing trend, with a spatial distribution pattern of higher intensity in the northwest and lower intensity in the southeast. The soil conservation intensity of forest land and grassland was significantly higher than that of other land use types. ④ Climate change dominated the changes in soil conservation in 93.07% of the area, while land use change dominated in 6.93% of the area. [Conclusion] Changes in soil conservation in Baiyangdian basin are attributed to the combination effects of climate and land use changes, with climate change being the primary factor.

**Keywords:** soil conservation function; InVEST; climatic change; land use change; Baiyangdian basin

土壤保持服务作为一项重要的生态系统调节服务,是防止区域土地退化,降低洪涝灾害风险的重要保障。量化土壤保持功能的方法主要有区域野外监测试验和基于通用土壤流失方程(USLE)的模拟计算。InVEST模型在USLE基础上加以改进,评估结果更加准确、合理,并且基于遥感技术、地理信息系统和全球定位系统可以实现空间化、地图化的表达,参数较少,输入所需数据较少,输出数据量大<sup>[1]</sup>。自2007年发布以来,被国内外广泛应用。Zhao等<sup>[2]</sup>基于InVEST模型评估了土壤保持、产水量和碳储存3个生态系统服务的时空变化。Luo等<sup>[3]</sup>以贵阳市为研究区,利用InVEST模型评估了该区域生态系统服务功能中的产水量、土壤保持、碳储量。Deng等<sup>[4]</sup>以湘江流域为例,量化了2000—2020年水源涵养、土壤保持和水质净化3种初级水相关生态系统服务。在对土壤保持功能进行评估时,InVEST模型还可以结合流域侵蚀和泥沙沉积,通过比较侵蚀率和淤积率来对水土保持进行评估,该方法也使评估的准确率大大提高。土地利用和气候变化是影响土壤保持功能的重要因素,定量区分气候与土地利用变化对土壤保持功能影响的相对贡献,对保障区域生态安全具有重要意义。目前主要应用情景分析方法区分了气候和土地利用变化的个体影响<sup>[5-6]</sup>。为了确定气候变化和人类活动对生态系统服务功能动力学的影响,相关学者采用了生态环境研究中广泛使用的残差分析方法,揭示了生态系统服务功能演变的驱动背景,并辨别了气候变化和人类活动的各自贡献<sup>[7]</sup>,但该方法并未量化到土地利用变化的贡献率。结合以上两种方法可以帮助我们更深入地了解生态系统服务功能的区域差异和形成机制。

白洋淀流域位于京津冀腹地的华北平原上,提供着多项生态系统服务,对维持华北平原生态平衡也具有重要的作用。2021年8月,党中央国务院发布

了一项重大报告,将白洋淀的生态保护纳入《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》,以期能够更好地保护和改善白洋淀的生态环境。本研究选取白洋淀流域作为研究对象,基于InVEST模型评估2000—2020年该流域的土壤保持功能,分析该流域土壤保持量的时空变化特征,辨析气候和土地利用变化对白洋淀流域土壤保持量的贡献率,旨在为该区域生态保护与修复、加强生态环境建设提供定量的科学依据。

## 1 研究区概况

白洋淀流域位于华北平原中部,在海河流域大清河水系的中上游,东经113°39′—116°11′,北纬38°61′—40°04′,地跨河北,山西两省和北京市,涉及45个区县。研究流域总面积为 $3.12 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。流域内年均气温在7~12℃,地处暖温带大陆性季风气候区,季节特征显著。常年降水量在300~800 mm,多年平均蒸发量为1 637 mm。降水的年内时空分布不均,多集中在汛期(7—9月)。流域地势西高东低,植被覆盖主要为森林,林地和农田。白洋淀是大清河水系中重要的蓄水枢纽,具有缓洪、治涝和蓄水灌溉的重要功能,对当地气候调节和生物多样性保护有着不可替代的作用<sup>[8]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

数据包括气象数据、土壤、土地利用、数字高程模型、植被覆盖等。气象数据是来源于国家地球系统科学数据中心(geodata.cn)的年降水量栅格数据,分辨率为1 km,用以计算降雨侵蚀力因子 $R$ ;NDVI数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心数据源,分辨率1 km(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据来源于中国30 m年度土地覆被数据集及其动态

数据集 (CLCD) (<https://zenodo.org/>), 土地利用分类结果的解译精度为 80%。数字高程数据来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 土壤数据来源于联合国粮食及农业组织 (FAO) 和国际土壤参考与信息中心 (ISRIC) 共同开发的世界土壤数据集。该数据是全球范围的土壤数据库, 为包含沙砾、粉粒、黏粒含量以及有机物含量的栅格数据集, 用以计算土壤可蚀性  $K$  因子。所有数据统一处理为分辨率 1 km。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 InVEST-SDR 模型

(1) 模型简介。本文主要应用 InVEST 模型中的输沙率模块 (sediment delivery ratio model, SDR) 来模拟评估白洋淀流域的土壤保持功能。该模块基于改进后的通用土壤侵蚀方程 USLE 计算方法<sup>[9-10]</sup>, 考虑了地块自身对上游沉积物的拦截能力, 精度更加准确, 可信性更高, 模型计算公式为<sup>[11-12]</sup>:

$$SC_i = RKLS_i - USLE_i \quad (1)$$

$$RKLS_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \quad (2)$$

$$K_{epic} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.256 m_s \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \times \left\{ 1 - \left[ \frac{0.25OC}{OC + \exp(3.72 - 2.95OC)} \right] \right\} \times \left\{ 1 - \frac{0.7 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ -5.51 + 22.9 \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (6)$$

式中:  $K_{epic}$  为修正前的  $K$  值;  $m_c$  为黏粒;  $m_{silt}$  为粉粒;  $m_s$  为沙砾; OC 为有机质。

(3) 植被与作物管理因子  $C$  和水土保持因子  $P$  的确定。植被与作物管理因子  $C$  为在不同的植被覆盖情况下的土壤保持情况, 与径流量、土壤流失量有着很强的相关性<sup>[15]</sup>。水土保持因子  $P$  指在采取水土保持措施后的土壤侵蚀量与不采取任何水土保持措施的顺坡种植时候的土壤流失量的比值<sup>[9]</sup>。其中  $C$  值根据蔡崇法<sup>[16]</sup>提出的公式, 计算不同土地利用类型的  $C$  值, 计算公式为:

$$f_c = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} 1 & (f_c = 0) \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c & (0 < f_c \leq 78.3\%) \\ 0 & (f_c > 78.3\%) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_c$  表示植被覆盖率; NDVI 为归一化植被指数。

计算结果结合研究区特征, 参考邻近流域相关文献研究取值。根据以往相关研究对不同土地利用类型的  $P$  值进行赋值, 林地、草地、未利用地的  $P$  值赋值为

$$USLE_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot P_i \cdot C_i \quad (3)$$

式中:  $SC_i$  是栅格单元  $i$  的土壤保持量 (t/a);  $RKLS_i$  是栅格单元  $i$  没有管理措施的潜在土壤侵蚀量 (t/a);  $USLE_i$  是栅格单元  $i$  采取水土保持措施后的实际土壤侵蚀量 (t/a);  $R_i$  是栅格单元  $i$  的降雨侵蚀力因子  $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h^{-1} \cdot a^{-1})]$ ;  $K_i$  是土壤可蚀性因子  $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ^{-1} \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1})]$ ;  $LS_i$  是坡长坡度因子 (无量纲);  $C_i$  是植被与作物管理因子 (无量纲);  $P_i$  是水土保持因子 (无量纲)。

### 2.2.2 参数率定和数据输入

(1) 降雨侵蚀力因子的计算参考了章文波等建立的逐年雨量估算侵蚀力公式<sup>[13]</sup>:

$$R_j = \alpha_3 P_j^{\beta_3} \quad (4)$$

式中:  $P_j$  为第  $j$  年的降雨量 (mm);  $R_j$  为第  $j$  年的降雨侵蚀力  $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h^{-1} \cdot a^{-1})]$ 。

(2) 土壤可蚀性  $K$  因子利用全球土壤数据库中土壤资料进行计算, 计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$K = [-0.01383 + 0.51575K_{epic}] \times 0.1317 \quad (5)$$

1, 水域和建设用地的  $P$  值为 0, 耕地  $P$  值为 0.45<sup>[17-18]</sup>。

(4) 其他参数。在 InVEST 模型 SDR 模块的参数调整中, 参照 InVEST 模型手册, 将累积阈值流设置为 10 000<sup>[19]</sup>。水文连通性指数 ( $K_b$ ) 值设置为 2。SDR 参数 (ICO) 设置为默认值 0.5。网格的最大 SDR ( $SDR_{max}$ ) 设置为默认值 0.8。

### 2.2.3 气候和土地利用变化对土壤保持量的贡献率

结合趋势分析和情景模拟法来识别气候变化和土地利用变化对土壤保持量的贡献, InVEST 模型模拟计算土壤保持量, 输入的气候因子主要是降水, 因此, 本文通过控制降水或土地利用情景来模拟分析土壤保持量对气候与土地利用变化的响应情况<sup>[20,7]</sup>, 在此基础上, 结合趋势分析法, 进一步分析气候与土地利用变化对土壤保持量变化的贡献率。以 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年 5 期降水和土地利用数据为基础, 基于 InVEST 模型的土壤保持量模拟结果代表实际土壤保持量  $SC_A$ ; 控制 2000 年土地利用数据不变, 基于 5 期降水数据, 模拟得到的土壤保持量代表气候情景下的土壤保持量  $SC_C$ ; 控制 2000 年降水数据不变, 基于 5 期土地利用数据, 模拟得到的土壤

保持量代表土地利用情景下的土壤保持量  $SC_{L_c}$ 。

在所构建的不同情景下,采用趋势分析法量化气候和土地利用变化对土壤保持量的相对贡献<sup>[21]</sup>。

$$S = \frac{\left[ n \times \sum_{j=1}^n j \times SC_j - \left( \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n SC_j \right) \right]}{\left[ n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left( \sum_{j=1}^n j \right)^2 \right]} \quad (9)$$

式中: $S$ 为土壤保持量的变化趋势; $n$ 为总年数(5); $SC_j$ 为第 $j$ 年每栅格单元的土壤保持量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ ; $S_A, S_{cc}, S_{Lc}$ 分别代表实际土壤保持量、气候变化影响下土壤保持量和土地利用变化影响下土壤保持量的变化趋势。 $S_A > 0$ 代表实际土壤保持量呈增加趋势,当 $S_A < 0$ 则表示土壤保持量呈减少趋势。情景描述详见表1。

表 1 气候变化和土地利用对土壤保持量相对影响的 6 种情景

Table 1 Six scenarios of impacts of climate and land use change on soil conservation

情景	$S_A$	$S_{cc}$	$S_{Lc}$	气候变化贡献率	土地利用变化贡献率	驱动力分析
1	$>0$	$>0$	$>0$	$\frac{S_{cc}}{S_A}$	$\frac{S_{Lc}}{S_A}$	气候和土地利用共同主导土壤保持量增加
2		$>0$	$<0$	100	0	气候变化主导土壤保持量增加
3		$<0$	$>0$	0	100	土地利用主导土壤保持量增加
4	$<0$	$<0$	$<0$	$\frac{S_{cc}}{S_A}$	$\frac{S_{Lc}}{S_A}$	气候和土地利用共同主导土壤保持量减少
5		$<0$	$>0$	100	0	气候变化主导土壤保持量减少
6		$>0$	$<0$	0	100	土地利用主导土壤保持量减少

注: $S_A, S_{cc}, S_{Lc}$ 分别代表实际土壤保持量、气候变化影响下土壤保持量和土地利用变化影响下土壤保持量的变化趋势。

### 3 结果与分析

#### 3.1 白洋淀流域气候和土地利用的时空变化特征

3.1.1 气候变化特征 InVEST模型输入的降雨侵蚀力因子主要与降水有关,因此,本文主要分析降水量变化,以表征该流域气候变化特征。由图1可知,白洋淀流域在2000,2005,2010,2015和2020年的降水量平均值分别为420.90,414.92,447.98,436.39和504.98 mm,整体上呈现上升趋势。2015—2020年的降水量增长幅度最大,为15.72%,其次是2005—2010年涨幅为7.97%;而2000—2005年降水量减少了1.42%,2010—2015年减少了2.59%。空间上,降水量高值区集中在大清河淀西的北部地区。大清河山区相比大清河淀西年际变化趋势明显。2000—2005年大清河山区降水量减少了2.4%,大清河淀西降水量几乎无变化,降水中心北移;2005—2010年,大清河山区降水量增加11.23%,大清河淀西降水量微弱增加;2010—2015年,大清河山区降水量下降4.71%,大清河淀西的降水量持续微弱增加;2015—2020年,全流域降水量大幅增加,大清河山区增幅15.24%,大清河淀西增幅16.53%。从行政区划看,流域范围内北京市和保定市东北部的降水量均高于流域多年平均值。保定市、大同市和忻州市的降水量呈现波动上升的趋势,曾在2000—2005年及2010—2015年存在两次下降。北京市的降水量趋势为先增后减再增,衡水市和石家庄市

整体呈现增加趋势。张家口市在2000—2010年降水量增加,2010—2015年减少,2015—2020年降水量增加。

3.1.2 土地利用的时空变化特征 由图2可以看出,2000—2020年各土地利用类型的面积比例均表现为:耕地>林地>草地>建设用地>水域>未利用地。流域内主要的土地利用类型是耕地和林地,分别占流域面积的40.16%~44.13%和24.71%~27.72%。其中耕地始终保持优势地位,面积比例始终保持在40%以上。其次是草地和建设用地,面积比例分别在24.71%~27.72%和9.19%~13.55%,水域和未利用地比例最少,面积比例分别在0.33%~0.55%和0.01%~0.03%。流域下游区域土地利用类型以耕地为主,上游区域土地利用类型主要是林地和草地。

从空间分布上看,林地和草地主要位于西部大清河山区,即保定市西北部,北京市西部,张家口市,大同市和忻州市;耕地和建设用地大面积位于大清河淀西,处于地势平坦,水资源丰富区。2000—2020年林地、建设用地面积呈现上升趋势,水域的覆盖面积呈现先减后增的趋势,耕地、草地和未利用地均呈现减少趋势。土地利用变化最显著的是建设用地,随着城市化进程的加速和雄安新区的建设,对建设用地的需求增加,建设用地增加了 $1.40 \times 10^3$  km<sup>2</sup>。另外林地面积增加了 $9.40 \times 10^2$  km<sup>2</sup>。耕地和草地面

积大幅减少,耕地面积减少了  $1.20 \times 10^3 \text{ km}^2$ , 草地减少了  $1.10 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。土地转移矩阵显示,2000—2020 年耕地面积的减少主要转变为了建设用地。2000—2005 年耕地转出面积中的 48.76% 转变成了建设用地,2005—2010 年耕地转出为建设用地的面积达到了 56%, 而 2010—2015 年这一比例增高至

61.43%, 2015—2020 年耕地转变为建设用地的面积比例为 55.32%。林地面积的增加主要来源于草地的转移。2015—2020 年期间,草地转成林地的面积占林地总增加面积的 91.10%, 在 2000—2005 年比例为 75.43%, 2005—2010 年比例为 83.48%; 2010—2015 年比例为 83.48%。

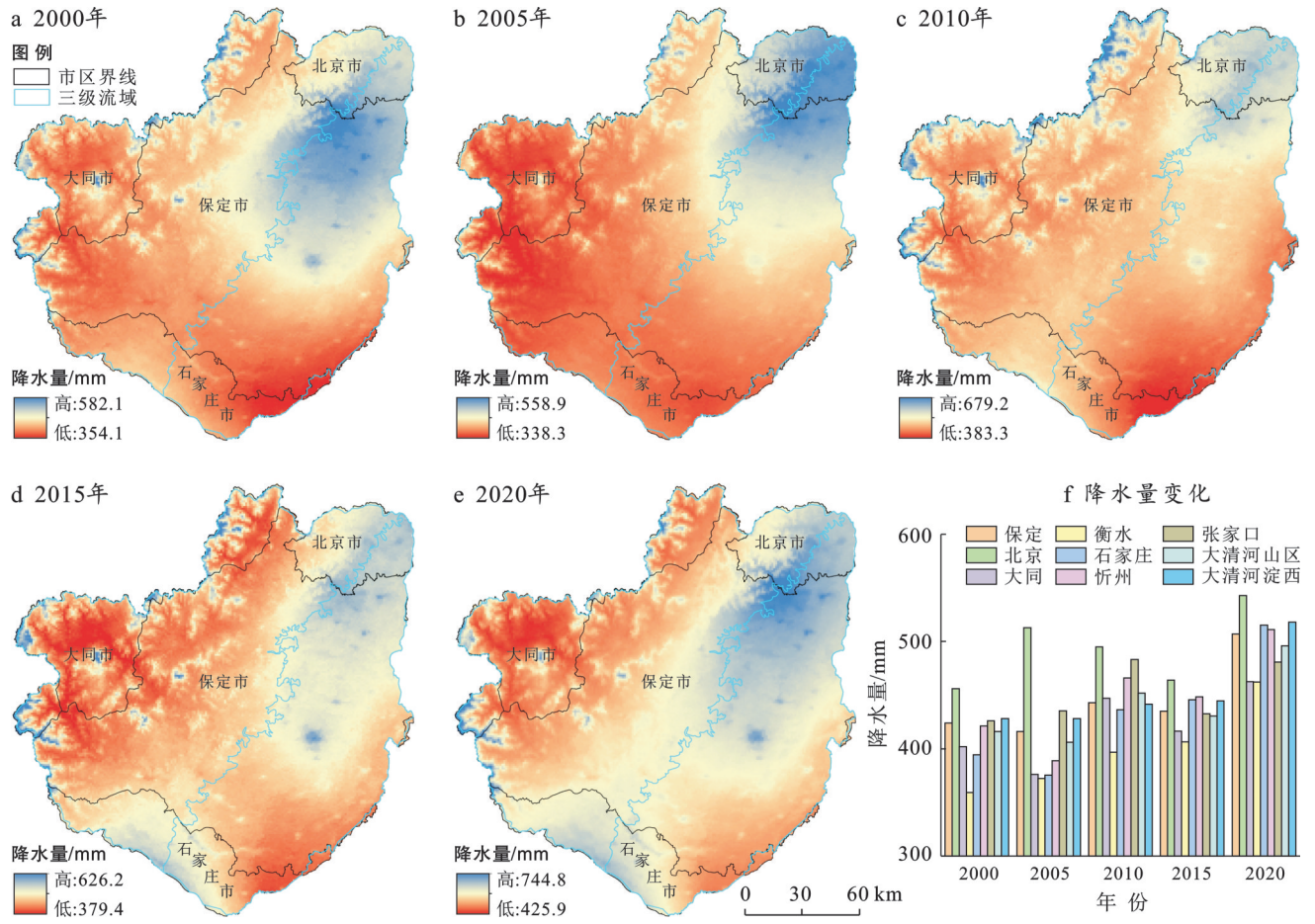


图 1 白洋淀流域 2000—2020 年降水量时空分布

Fig.1 Spatiotemporal distribution of precipitation in Baiyangdian basin from 2000 to 2020

### 3.2 白洋淀流域水土保持量的时空分布特征

由图 3 可以看出,2000—2020 年白洋淀流域的土壤保持强度分别为 9 500, 9 380, 11 000, 10 700 和 12 500  $\text{t}/\text{km}^2$ 。土壤保持强度年际变化呈现先下降后上升,再下降再上升的趋势,整体呈增加趋势。2000—2020 年,土壤保持强度增加了 31.58%。2000—2005 年、2010—2015 年为下降段,分别下降了 120 和 300  $\text{t}/\text{km}^2$ ,降幅依次为 1.3% 和 2.7%。2005—2010 年、2015—2020 年为土壤保持强度增加段,分别增加了 1 620 和 1 800  $\text{t}/\text{km}^2$ 。

总体来看,土壤保持强度变化幅度较小。总土壤保持量为  $2.94 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $2.90 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $3.41 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $3.32 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $3.88 \times 10^8 \text{ t}$ 。土壤保持量的变化趋势与土壤保持强度保持一致。在空间分布上,土壤保持

强度呈现西北高东南低的分布特征,各期的空间分布格局相似。土壤保持强度高值区主要位于大清河山区,低值区主要分布在大清河淀西。2000—2020 年,大清河山区的土壤保持强度在  $1.49 \times 10^4 \sim 2.02 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ , 大清河淀西的土壤保持强度在  $3.26 \sim 440 \text{ t}/\text{km}^2$ , 与已有研究<sup>[22-23]</sup>结果基本一致。2000—2020 年,土壤保持强度较低的区域变化趋势微弱,土壤保持强度较高的大清河山区的土壤保持能力得到了改善,土壤保持强度有所增加,增加量主要位于  $0 \sim 2 500 \text{ t}/\text{km}^2$  区间内。从行政区来看,西北部土壤保持强度较高的部分主要分布在张家口市,北京市西部和保定市西北部。土壤保持强度偏低的区域主要在流域的东南部,包括保定市东部、南部,北京市东部,石家庄市和衡水市。从随时间变化趋

势上看,保定市、石家庄市、大同市、忻州市在 2000—2005 年的土壤保持强度呈下降趋势,在 2005—2020 年呈上升趋势。北京市在 2000—2005 年呈上升趋势,2005—2015 年土壤保持强度下降,2015—2020 年

再次上升。流域北部张家口市在 2000—2010 年土壤保持强度呈上升趋势,2010—2015 年下降 13.53%,2015—2020 年上升。衡水市变化趋势不显著,整体上呈轻微上升趋势。

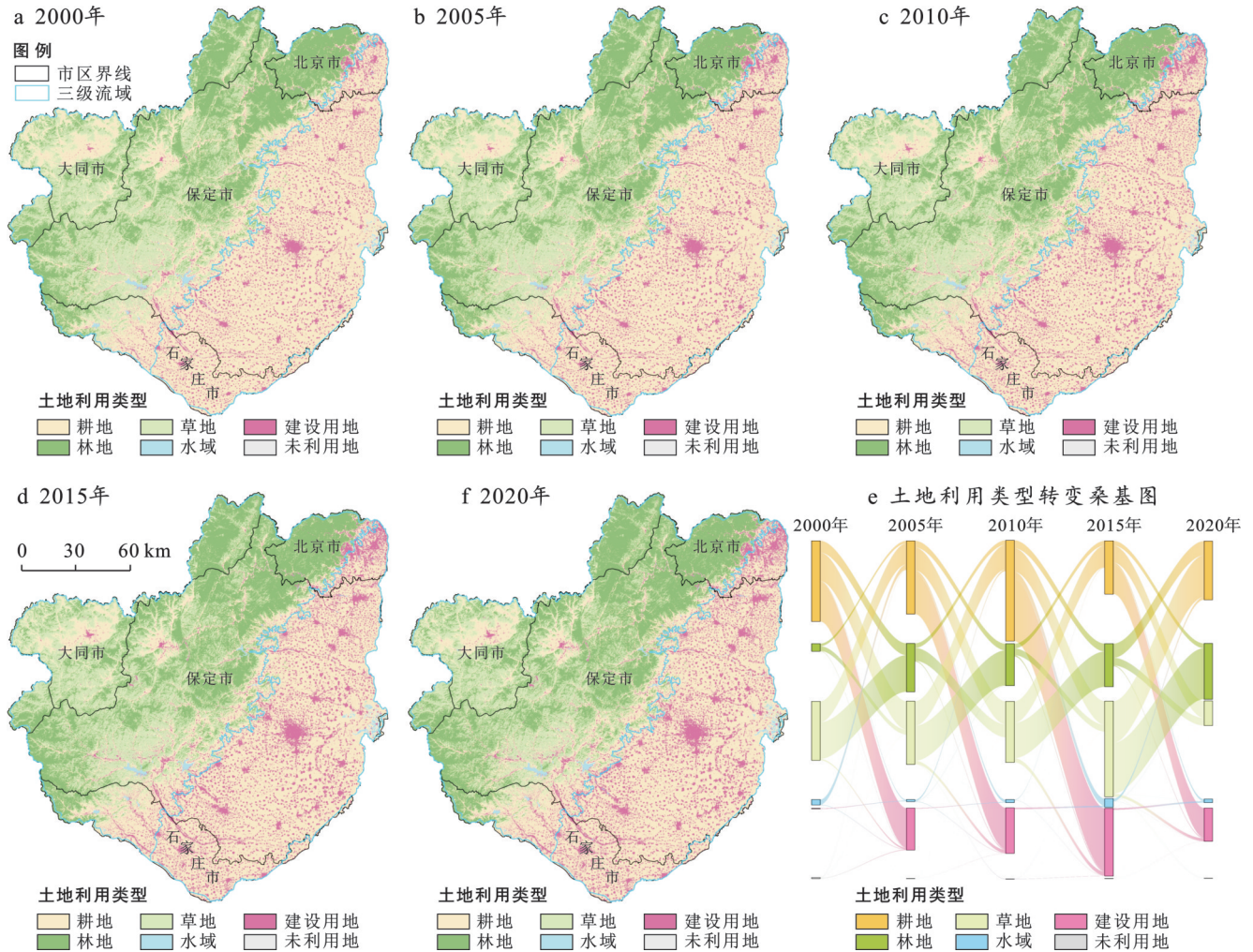


图 2 白洋淀流域 2000—2020 年土地利用空间分布及桑基图  
Fig.2 Spatial distribution and Sankey map of land use in Baiyangdian basin from 2000 to 2020

不同土地类型的土壤保持强度统计结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,6 种土地利用类型的平均土壤保持强度排序为:林地>草地>耕地>建设用地>未利用地>水域。研究结果与已有成果研究较为一致。

2000—2020 年,耕地、草地和建设用地的土壤保持强度均呈先减少后增加的趋势,2010 年为转变的节点;林地仅在 2010—2015 年呈下降趋势,其余时间段内均为上升趋势。白洋淀流域在 2000—2020 年各土地利用类型的土壤保持量在总体上呈现上升的趋势。林地的土壤保持量占主要部分,平均比例大于 60%,其次是草地的土壤保持量,平均比例为 28.46%,耕地、水域、建设用地和未利用地的土壤保持量相对较少。

### 3.3 气候变化和土地利用变化对土壤保持量的贡献率

土地利用和气候变化对白洋淀流域土壤保持量变化的贡献率如图 5 所示。气候变化贡献率在 80% 以上的区域面积比例为 76.14%,分布面积最大,主要位于大清河山区和大清河淀西的南部。其次为贡献率在 60%~80% 地区面积比例为 13.94%。土地利用变化贡献率在 40%~80% 的区域面积比例为 8.4%,主要分布在大清河淀西的北部地区。2000—2020 年,仅气候变化主导土壤保持量呈增加趋势的区域占研究区总面积的 32.14%,主要分布在大清河山区,包括保定市西北部、北京市中西部、张家口市和大同市、忻州市。仅土地利用变化主导土壤保持量呈增加趋势的区域占研究区总面积的 0.13%,主要分布在大清河淀西东北部的部分区域。

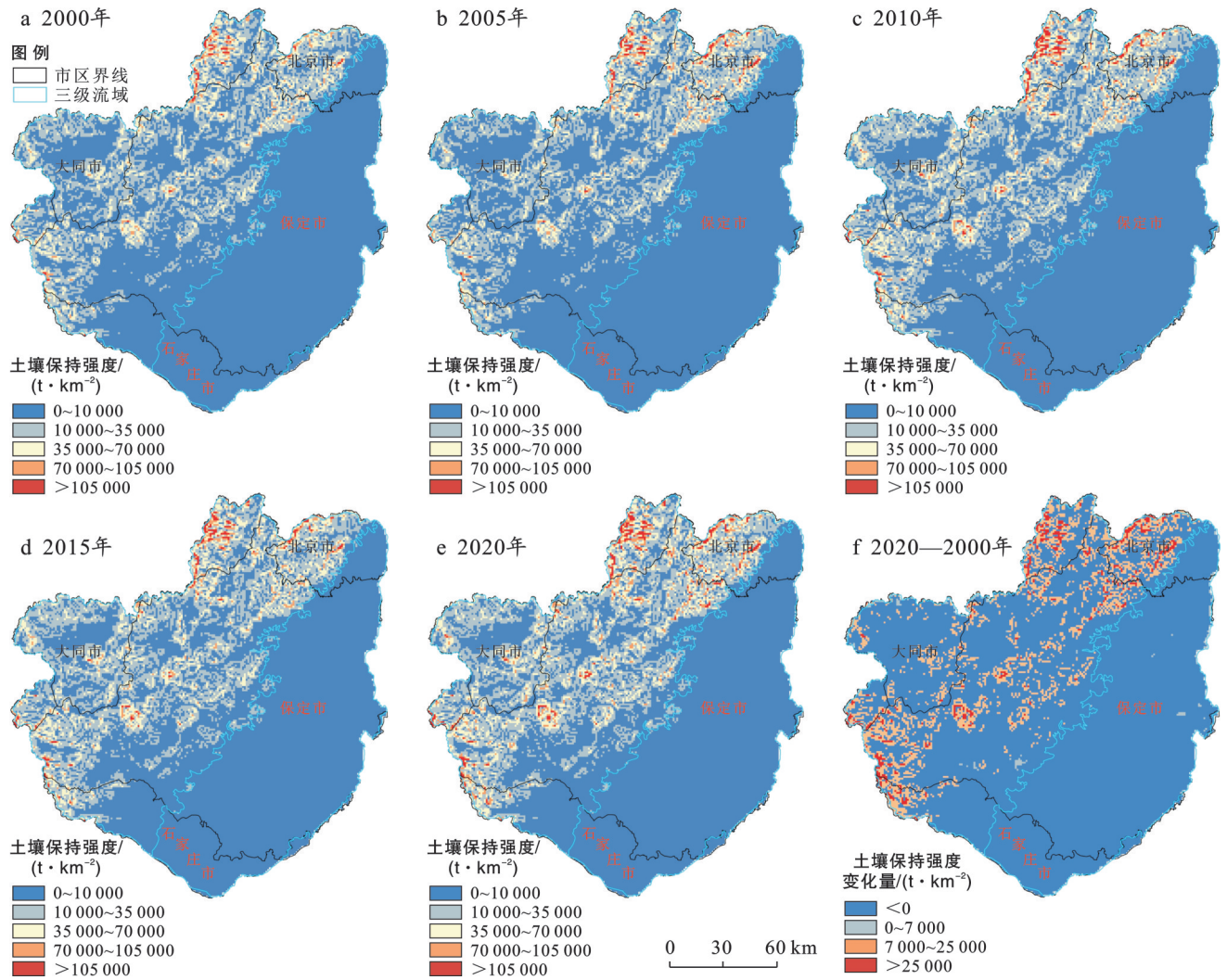


图 3 白洋淀流域 2000—2020 年土壤保持强度时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of soil conservation intensity in Baiyangdian basin from 2000 to 2020

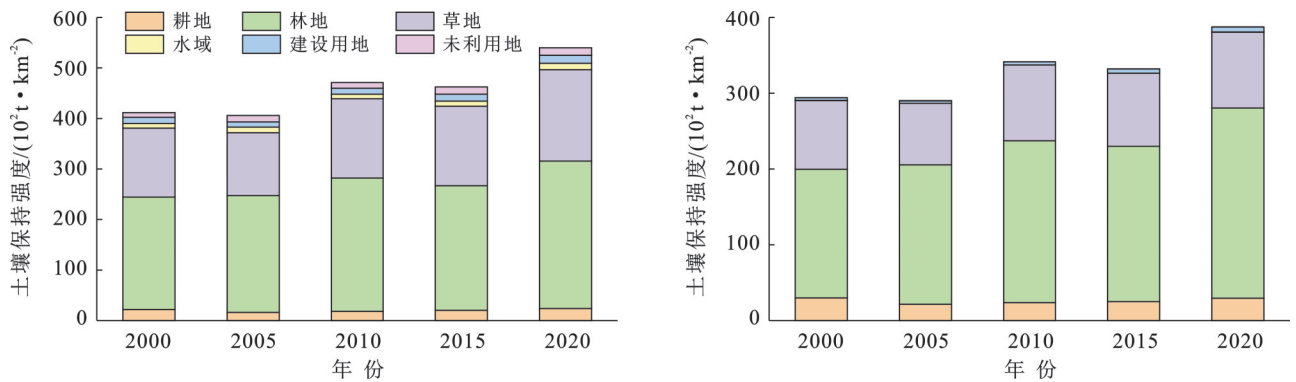


图 4 白洋淀流域 2000—2020 年不同土地利用类型的土壤保持强度和土壤保持量

Fig.4 Soil conservation intensity and soil conservation amount of different land use types in Baiyangdian basin from 2000 to 2020

研究区土壤保持量受气候变化和土地利用变化共同主导呈增加趋势的区域面积占研究区面积 67.57%,其中 60.82%的地区气候变化的贡献率高于土地利用变化的贡献率,土壤保持量增加的主导因素是气候变化,主要分布在保定市西南部和石家庄市。大清河山区中仅气候变化主导土壤保持量呈增

加趋势的面积比例为 50.08%,气候变化和土地利用变化共同主导土壤保持量呈增加趋势的面积比例为 49.74%,其中气候变化贡献率大于土地利用变化贡献率的面积比例为 48.55%。大清河淀西中仅气候变化主导土壤保持量呈增加趋势的面积比例为 4.99%。仅土地利用变化主导土壤保持量呈增加趋势的面积

比例为0.29%。气候变化和土地利用变化共同主导土壤保持量呈增加趋势的面积比例为94.54%,其中气候变化贡献率大于50%的面积比例为79.38%。2000—2020年白洋淀流域土壤保持量呈减少趋势的区域远小于呈增加趋势的区域,且土壤保持量的减少仅由气候和土地利用变化共同主导引起。由气候变化和土地利用变化共同主导的土壤保持量呈减少趋势的区域占研究区面积的0.16%,其中气候变化为主导因素导致土壤保持量减少的面积占0.11%,土地

利用变化为主导因素导致土壤保持量减少的面积占0.05%,零星分布在保定西南部区域和保定市东北部区域。大清河山区中气候变化和土地利用变化共同主导土壤保持量呈减少趋势的面积比例为0.18%,其中气候变化贡献率大于土地利用变化贡献率的面积比例为0.04%。大清河淀西中气候变化和土地利用变化共同主导土壤保持量呈减少趋势的面积比例为0.18%,其中气候变化贡献率大于50%的面积比例为0.02%。

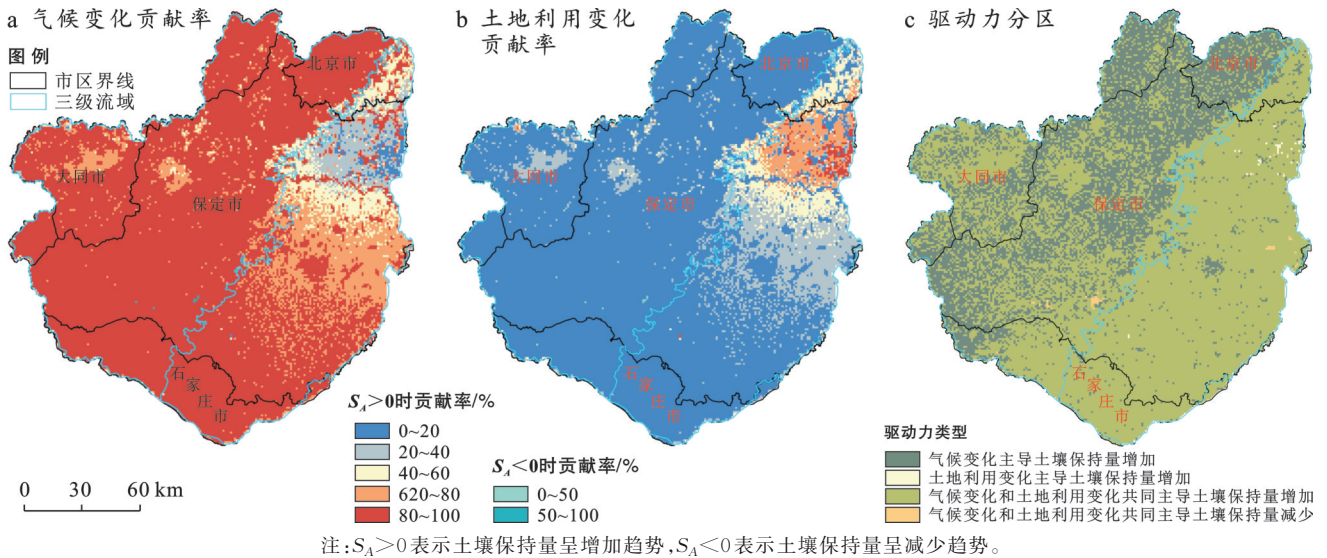


图5 白洋淀流域2000—2020年气候变化和土地利用变化对土壤保持功能的相对贡献及驱动力分区

Fig.5 Relative contributions of climate and land use change to soil conservation function and driving factors zoning in Baiyangdian basin from 2000 to 2020

综上所述,研究区内的土壤保持量的变化受气候变化和土地利用变化共同主导。气候变化主导土壤保持量变化的面积比例为93.07%,土地利用变化主导土壤保持量变化的面积比例为6.93%。

## 4 讨论

### 4.1 白洋淀流域的土壤保持功能变化

土壤保持功能的时空分布格局、动态变化趋势及其影响机制研究是很多领域的重要课题。本研究结果表明,2000—2020年白洋淀流域的土壤保持强度范围为9 380~12 500 t/(km<sup>2</sup>·a)。整体呈增长趋势,但在2000—2005年及2010—2015年两次出现下降趋势,结合气候变化和土地利用变化发现在2000—2005年降水量减少,土地利用变化不大;在另一时间段内(2010—2015年),林地面积减少,而土壤保持能力较弱的建设用地面积比例不断攀增,这无异于削弱流域的土壤保持能力。土壤保持量在空间分布上呈现西北高东南低的分布特征,空间分布趋于相对稳定状态。土壤保持强度高值区主要分布于

研究区地势较高的大清河山区,可能因为山区部分地形陡峭,水力侵蚀和风力侵蚀强度更大,土壤的潜在侵蚀量更高,但该区域的植被覆盖类型主要为林地和草地,能够有效固定土壤,降低风力和水力的侵蚀,从而使土壤的实际侵蚀量较低,土壤保持强度较高。

### 4.2 气候和土地利用变化对白洋淀流域土壤保持功能的影响

气候变化是通过改变二氧化碳浓度和水文过程来影响生态系统服务功能的重要因素<sup>[24]</sup>。土壤保持对降水非常敏感,本研究结果显示,土壤保持强度的变化趋势与降水量的变化趋势基本一致<sup>[25]</sup>,土壤保持量随降水量增加而增加,减少而减少,证明土壤保持强度和降水量之间存在正相关性。土壤保持量为潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量之间的差值。潜在土壤侵蚀量是指无植被覆盖和水土保持措施情况下的土壤侵蚀量,实际土壤侵蚀量则是考虑植被覆盖和水土保持措施的情况下的土壤侵蚀量。降水量的增加会引起潜在土壤侵蚀量的增加,潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量的差值随之增加,即土壤保

持量增加。当降水量在一定范围内,土壤保持量会随着降水量的增加而增加<sup>[26]</sup>。本研究结果表明,2000—2020年白洋淀流域气候变化对土壤保持量的影响显著高于土地利用变化,表明影响土壤保持量的主导因素是气候变化,之前的研究也报告了类似的发现<sup>[27]</sup>。并且降水的增加会促进植被的生长,有利于增加植被覆盖度,能有效减少土壤侵蚀并增加土壤保留<sup>[28]</sup>。

土地利用变化是通过改变土地类型的组成、比例来影响生态系统服务功能的另一个重要因素。2000—2020年,土地利用模式发生了变化,主要表现在耕地减少,林地增加和建设用地增加。林地植被覆盖度高,植被的根系作用能够有效截留泥沙,降低土壤侵蚀力从而提高土壤保持能力。草地植被不如林地植被覆盖度高,土壤保持能力低于林地。而耕地和建设用地区虽无较高的植被覆盖度,但其土壤保持能力也高于地表裸露、直接承受降雨冲刷的未利用地。土地利用转移矩阵结果中,草地向林地的大面积转化与河北省实施造林绿化有关,以及耕地的减少,水域的增加得益于白洋淀流域响应退耕还淀政策。城市化进程的推进,GDP和人口密度的快速增长导致了建设用地的激增。而耕地和林地作为白洋淀流域的主要土地利用类型,其中林地表现出相对较高的土壤保持能力,耕地向林地草地等的转化可以增强土壤保持能力,而林地向其他土地利用类型的转化则会削弱土壤保持能力。同时建设用地的激增也会对土壤保持量造成消极影响。

#### 4.3 局限性及建议

需要注意的是,基于InVEST模型的模拟结果具有一定的局限性。如参数设置的不唯一性与实际情况存在的差异可能对结果造成的影响。以及本研究气候影响仅选取了降水变化作为影响因子,考虑了主要影响因素但是没有分析其他因素的影响。还需在后续的研究综合考虑相关因素,精确参数提高分析模拟的准确性和实用性。

本研究结果表明气候变化和土地利用变化共同主导土壤保持功能的变化。对于土壤保持强度较高的林地和草地,应加强保护和治理,对退化林地、草地进行生态修复,减少流失现象,提高植被覆盖度,增强对泥沙的截留能力以减少降水对土壤的冲刷侵蚀。对于分布在大清河山区的未利用地应促进植被恢复,处于大清河淀西耕地节点中的未利用地,可以考虑退耕还林,植树造林。提高未利用地的植被覆盖度、控制建设用地的增长来减少降水对土壤的侵蚀,增强土壤保持强度。近年来,随着太行山造林绿

化工程的实施,在太行山营造的水源涵养林、水土保持林、发展果业经济林,恢复和扩大了森林植被,提高了山区的水土保持能力。

## 5 结论

(1) 2000—2020年白洋淀流域降水量多年平均值为445 mm。时间上降水量呈上升趋势。空间上降水量高值区主要集中在大清河淀西,行政区划上北京市和保定市东北部的降雨量均高于流域多年平均值。

(2) 白洋淀流域的主要土地利用类型为耕地和林地,面积比例分别为40.16%~44.13%和24.71%~27.72%。耕地主要分布在大清河淀西,包括保定市东南部,石家庄市东部和北京市东部;林地主要分布在大清河山区。2000—2020年,耕地、草地、未利用地面积呈下降趋势,林地和建设用地区面积显著增加。其中耕地面积的减少主要转化为建设用地和草地。林地面积的增加主要是由草地转化而来。

(3) 2000—2020年白洋淀流域的土壤保持强度分别为9 500,9 380,11 000,10 700和12 500 t/km<sup>2</sup>。年际变化整体上呈现上升趋势,空间分布上呈西北高东南低的格局。多年平均土壤保持量为3.30×10<sup>8</sup> t/a。林地和草地的土壤保持强度高于其他土地利用类型,整体呈上升趋势。

(4) 2000—2020年,气候变化主导土壤保持量变化的面积比例为93.07%,土地利用变化主导土壤保持量变化的面积比例为6.93%。气候变化对流域土壤保持量变化的影响显著高于土地利用变化。流域土壤保持量受气候变化和土地利用变化共同主导总体呈增加趋势,气候变化和土地利用变化两个影响因子共同促进了流域土壤保持量的变化,气候变化为主导因素。应加强生态工程管理,采用退耕还林、造林绿化等措施,提高植被覆盖度来减少降水的侵蚀,增强土壤保持能力。

#### 参考文献(References)

- [1] Benra F, De Frutos A, Gaglio M, et al. Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 138: 104982.
- [2] Zhao Jing, Shao Zhuang, Xia Chuyu, et al. Ecosystem services assessment based on land use simulation: A case study in the Heihe River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109402.
- [3] Luo Rui, He Daming. The dynamic impact of land use change on ecosystem services as the fast GDP growth in Guiyang City [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111275.

- [4] Deng Meirong, Mao Dehua, Li Yeye, et al. Spatiotemporal variation in water-related ecosystem services during 2000—2020 and ecological management zoning in the Xiangjiang River basin, China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(22):16012.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Shao Yajing, Liu Yansui, Wang Xiaochen, et al. Exploring the evolution of ecosystem health and sustainable zoning: A perspective based on the contributions of climate change and human activities [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 951:175674.
- [8] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. *生态学报*, 2017, 37(8):2497-2505.  
Jiang Bo, Chen Yuanyuan, Xiao Yang, et al. Evaluation of the economic value of final ecosystem services from the Baiyangdian wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8):2497-2505.
- [9] 李曼, 崔敏华, 刘焕才. 疏勒河流域土壤保持服务供需风险探讨[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(5):123-132.  
Li Man, Cui Minhua, Liu Huancai. Discussion on supply and demand risk of soil conservation service in Shule River basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(5):123-132.
- [10] Chen Jingshu, Chen Yiping, Wang Kaibo, et al. Impacts of land use, rainfall, and temperature on soil conservation in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2024, 239:107883.
- [11] Jian Zhen, Sun Yingjun, Wang Fang, et al. Soil conservation ecosystem service supply-demand and multi scenario simulation in the Loess Plateau, China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 49:e02796.
- [12] He Xu, Miao Zimei, Wang Yiming, et al. Response of soil erosion to climate change and vegetation restoration in the Ganjiang River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158:111429.
- [13] 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.
- [14] Bhattacharya R K, Das Chatterjee N, Das K. Modelling of soil erosion susceptibility incorporating sediment connectivity and export at landscape scale using integrated machine learning, InVEST-SDR and Fragstats [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353:120164.
- [15] 郭佳昊, 李纯斌, 吴静. 基于 InVEST 模型的金塔县土壤侵蚀和土壤保持状况评价[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(5):106-113.  
Guojia Hao, Li Chunbin, Wu Jing. Research on soil erosion and soil conservation status in Jinta County based on InVEST model [J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(5):106-113.
- [16] 石建丽, 仲俊涛, 刘美娟. 基于 InVEST 模型的祁连山地区土壤保持功能时空演变及驱动因素分析[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2):455-464.  
Shi Jianli, Zhong Juntao, Liu Meijuan. Spatiotemporal evolution and driving factors of soil conservation function in Qilian Mountains based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(2):455-464.
- [17] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 等. 土地利用变化对生态系统服务的影响: 以张家口—承德地区为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(20):7493-7501.  
Xu Dingxue, Wu Fang, He Lihuan, et al. Impact of land use change on ecosystem services: Case study of the Zhangjiakou-Chengde area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7493-7501.
- [18] 何莎莎, 朱文博, 张静静, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤保持功能研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5):542-553.  
He Shasha, Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, et al. The function of soil conservation on Taihang Mountain Qihe River basin based on InVEST model [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2018, 48(5):542-553.
- [19] 廖珍梅, 杨薇, 蔡宴朋, 等. 大清河—白洋淀流域生态功能评价及分区初探[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1):131-140.  
Liao Zhenmei, Yang Wei, Cai Yanpeng, et al. Assessment and regionalization of ecological functions in the Daqing River-Baiyangdian Lake basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1):131-140.
- [20] Ma Shuai, Li Yan, Zhang Yinghu, et al. Distinguishing the relative contributions of climate and land use/cover changes to ecosystem services from a geospatial perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108645.
- [21] 李庆, 周娜, 王盛, 等. 气候变化和人类活动对土壤风蚀影响的定量评估: 以内蒙古自治区为例[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(1):178-188.  
Li Qing, Zhou Na, Wang Sheng, et al. Quantitative assessment the impacts of climate change and human

- actives on wind erosion: A case study of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(1):178-188.
- [22] 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 driving factors in the Jing-Jin-Ji region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [23] 刘金龙. 生态系统服务的模拟与时空权衡:以京津冀地区为例[D]. 北京:北京大学, 2013.  
Liu Jinlong. Simulation and temporal-spatial trade of ecosystem services: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Beijing: Peking University, 2013.
- [24] Cui Fengqi, Wang Bojie, Zhang Qin, et al. Climate change versus land-use change: What affects the ecosystem services more in the forest-steppe ecotone? [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 759:143525.
- [25] 王盛, 李亚文, 李庆, 等. 变化环境影响下张承地区水源涵养和土壤保持服务及其权衡与协同关系研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(13):5391-5403.  
Wang Sheng, Li Yawen, Li Qing, et al. Water and soil conservation and their trade-off and synergistic relationship under changing environment in Zhangjiakou-Chengde area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13):5391-5403.
- [26] 张恩伟. 滇中城市群产水服务和土壤保持服务时空格局演变及其影响因素研究[D]. 云南昆明:云南师范大学, 2021.  
Zhang Enwei. Spatiotemporal pattern changes and influencing factors of water yield service and soil conservation service in central Yunnan urban agglomeration [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan Normal University, 2021.
- [27] Xiao Junzhu, Song Fei, Su Fangli, et al. Quantifying the independent contributions of climate and land use change to ecosystem services [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153:110411.
- [28] 熊茂秋, 刘晓煌, 张雪辉, 等. 基于RUSLE模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究[J]. *地质通报*, 2024, 43(4):641-650.  
Xiong Maoqiu, Liu Xiaohuang, Zhang Xuehui, et al. Spatio-temporal variation of soil conservation in the upper reaches of the Tarim River basin based on RUSLE model [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4):641-650.

(上接第330页)

- [27] 徐维祥, 李露, 周建平, 等. 乡村振兴与新型城镇化耦合协调的动态演进及其驱动机制[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9):2044-2062.  
Xu Weixiang, Li Lu, Zhou Jianping, et al. The dynamic evolution and its driving mechanism of coordination of rural rejuvenation and new urbanization [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9):2044-2062.
- [28] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. *地理科学*, 2013, 33(11):1323-1329.  
Wang Fuxi, Mao Aihua, Li Helong, et al. Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong Province based on the entropy method [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(11):1323-1329.
- [29] Bai Yujie, Zha Tianshan, Bourque C P A, et al. Variation in ecosystem water use efficiency along a south-west-to-northeast aridity gradient in China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110:105932.
- [30] 常媛媛, 刘俊娜, 马静, 等. 干旱半干旱区耕地非粮化空间格局及驱动因素[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(2):333-344.  
Chang Yuanyuan, Liu Junna, Ma Jing, et al. Spatial pattern and driving factors of non-grain conversion on cultivated land in arid and semi-arid regions [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2):333-344.
- [31] Wang Huiqin, Sun Baoping, Yu Xinxiao, et al. The driver-pattern-effect connection of vegetation dynamics in the transition area between semi-arid and semi-humid northern China [J]. *Catena*, 2020, 194:104713.
- [32] 祁新华, 叶士琳, 程煜, 等. 生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(19):6411-6417.  
Qi Xinhua, Ye Shilin, Cheng Yu, et al. The game analysis between poverty and environment in ecologically fragile zones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19):6411-6417.
- [33] 高强, 薛洲. 以县域城乡融合发展引领乡村振兴: 战略举措和路径选择[J]. *经济纵横*, 2022(12):17-24.  
Gao Qiang, Xue Zhou. Leading rural revitalization with county urban-rural integrated development: Strategic measures and path selection [J]. *Economic Review Journal*, 2022(12):17-24.
- [34] 赵康杰, 景普秋. 新中国70年城乡互动与城乡一体化演进: 基于对外开放视角[J]. *南开学报(哲学社会科学版)*, 2019(4):23-35.  
Zhao Kangjie, Jing Puqiu. The urban-rural interaction and the evolution of urban-rural integration in the 70 years of new China: From the perspective of opening-up [J]. *Nankai Journal (Philosophy, Literature and Social Science Edition)*, 2019(4):23-35.