

# 引江济淮工程驱动下江淮段植被动态响应分析

王亚琼<sup>1</sup>, 罗劲松<sup>1</sup>, 高曼莉<sup>1</sup>, 樊丙玉<sup>1</sup>, 王培晓<sup>\*2,3</sup>

1. 安徽林业职业技术学院资源与环境系, 安徽 合肥 230000;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所/地理信息科学与技术全国重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

**摘要:** 为评估和预测引江济淮工程驱动下的植被动态变化, 基于 2015—2024 年 Landsat 数据, 结合随机森林分类、Sen-MK 趋势检验和 Hurst 指数, 分析工程建设前后植被覆盖、生长状况 (VGP) 的时空变化及未来变化趋势。结果表明: 工程复用既有河道比例超 30%, 耕地占用 24.72 km<sup>2</sup>, 新增水体 37.81 km<sup>2</sup>、配套设施 12.87 km<sup>2</sup>; 36.42% 区域发生植被覆盖类型转换, 变化区域中 51.94% 植被长势改善, VGP 平均增幅 1.616, 48.06% 退化, 平均降幅 1.950 4; 稳定自然植被中, 250 个影响单元 VGP 上升 (均值+0.11), 137 个单元的耕地植被改善 (均值+0.81), 132 个影响单元耕地长势增幅显著高于对照区 ( $\Delta$ VGP: 0.598 2); Hurst 分析表明未来江淮引工程植被长势总体保持正向趋势, 6.10% 区域持续改善, 沿巢湖西北沿岸、天河入江口和派河 (合肥至寿县段) 两岸分布, 剔除城市扩张后植被退化趋势比例 5.49%, 三河镇临巢湖局部趋势不明确应加以关注。引江济淮工程建设短期内造成了局部植被退化, 水文条件改善和生态修复效应带来了长期的植被长势改善趋势, 整体上实现了对区域植被质量提升。

**关键词:** 引江济淮工程; 土地覆盖变化; 植被动态; 趋势检验; Hurst 指数

**DOI:** 10.16258/j.cnki.1674-5906.2026.05.009

**中图分类号:** Q948; X173

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2026) 05-0760-10

**引用格式:** 王亚琼, 罗劲松, 高曼莉, 樊丙玉, 王培晓, 2026. 引江济淮工程驱动下江淮段植被动态响应分析[J]. 生态环境学报, 35(5): 760-769.

WANG Yaqiong, LUO Jinsong, GAO Manli, FAN Bingyu, WANG Peixiao, 2026. Vegetation dynamics in response to the Yangtze-to-Huaihe water diversion project: An analysis of the Jianghuai section [J]. Ecology and Environmental Sciences, 35(5): 760-769.

引江济淮工程作为国家重大水利基础设施, 对长江和淮河流域的经济社会发展具有重要意义。工程在促进区域协调发展的同时, 对沿线生态环境产生了深刻影响。郭贝贝等 (2024) 研究发现工程沿线粮食生产呈现显著的时空变化特征, 为区域粮食安全提供了保障。然而, 工程建设也带来了生态环境挑战, 顾康康等 (2022) 发现工程安徽段沿线区域存在一定的生态安全风险, Sun et al. (2023) 研究表明菜子湖湿地重金属污染对植物群落物种多样性产生了显著影响。这些研究表明, 在工程建设推进过程中, 亟需开展系统的植被动态监测, 以科学评估工程建设对区域生态系统的影响。

现有研究已从多个角度探讨了引江济淮工程的生态环境效应。生态质量评估方面, Guo et al. (2024) 利用时空分析方法评估了工程区域土地生态变化, 发现工程建设对土地利用格局产生了显著影响, Ding et al. (2024) 从供需平衡角度分析了工程对安徽段生态系统服务的影响, 郭贝贝等 (2022)

以庐江段为例研究了工程沿线生态环境质量的时空分异特征。在栖息地影响研究方面, Li et al. (2019) 通过水文模拟预测了工程对菜子湖越冬水鸟栖息地可用性的影响, 发现水位变化显著改变水鸟的栖息环境, Cui et al. (2024) 从功能性角度分析了恒定高水位对菜子湖水鸟多样性的影响, Htay et al. (2024) 从环境因子与时空分布关系出发, 探讨了湿地景观中涉农鸟类栖息地动态及其保护管理。在植被群落研究方面, 王哲等 (2022) 通过野外调查和统计分析方法研究了巢湖派河口滩涂植物群落特征, 姚简等 (2022) 运用空间分析技术探讨了菜子湖冬季水鸟空间分布与环境因子的关系, 刘芷兰等 (2022) 研究了枯水期水位变化对菜子湖湿地植被生态修复的影响。研究方法层面, Zhai et al. (2021) 运用 CA-Markov 模型结合景观格局指数, 对湿地生态风险进行识别与情景预测, 实现了湿地景观格局与生态风险时空演变的动态模拟和评估, 顾康康等 (2022) 运用压力、状态、响应 (PSR) 概

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (42401524); 安徽省高校自然科学基金项目 (2023AH052985); 安徽省质量工程项目 (2024jyxm1198)

**作者简介:** 王亚琼 (1992 年生), 女, 讲师, 硕士, 主要从事空间数据挖掘与地理知识工程。E-mail: wyq920506@163.com

**\*通讯作者,** E-mail: wpx@reis.ac.cn

**收稿日期 (Received):** 2025-07-01

**修回日期 (Revised):** 2025-12-16

**接受日期 (Accepted):** 2026-03-10

念框架建立了生态安全评价指标体系, Sun et al. (2023) 采用地球化学分析和生态学调查相结合的方法, 揭示重金属污染对湿地植物群落结构和物种多样性的影响机制, Huang et al. (2024) 利用多尺度分析方法研究地下水生态系统服务价值的时空特征。然而, 现有研究仍存在明显不足: 一是多数研究局限于特定区域或单一生态要素, 缺乏对工程全线植被覆盖变化的系统性遥感监测; 二是现有研究缺乏高分辨率遥感数据和机器学习等技术在植被信息精确提取中的应用; 三是现有研究主要关注工程建设的即时影响, 缺少基于植被演变分析和未来趋势预测。

随着引江济淮工程的全面建成和长期运行，其对区域生态环境的长远影响将更加深刻，科学预测和评估工程驱动下的植被动态变化对于指导生态修复和环境管理具有重要意义。因此，本文拟利用多时相高分辨率遥感数据，结合机器学习方法精细提取引江济淮工程建设前后的植被覆盖时空分布信息，通过构建影响区与对照区分析框架，定量评估工程建设对不同植被类型长势变化的影响，识别植被变化的“损益”空间格局，并将 Sen 氏斜率趋势分析与 Hurst 指数相结合对未来植被变化趋势进行预测，旨在揭示工程建设期生态破坏与恢复过程的空间异质性规律，为制定科学合理的生态补偿标准、实施精准有效的生态修复措施以及优化区域生态环境管理提供数据支撑和决策依据。

## 1 数据与研究区

### 1.1 研究区概况

引江济淮工程长江至淮河段(以下称“引江济淮工程”)位于安徽省中部( $31^{\circ}30'N-32^{\circ}45'N$ ,  $116^{\circ}20'E-117^{\circ}50'E$ ), 2016年12月开工建设, 2024年6月交工验收, 总输水线路约723 km(图1)。引江济淮工程包括引江济巢、江淮沟通两段, 涉及合肥、安庆、淮南等8个地级市。属东亚季风控制下的亚热带-暖温带过渡带, 年平均气温 $15-17^{\circ}C$ , 年降水量900—1100 mm, 雨热同期, 适宜水稻、小麦等农作物及落叶阔叶林生长。该工程旨在优化水资源配置, 多年平均引水量可达33.03亿 $m^3$ , 其中生态补水4.98亿 $m^3$ 。工程不仅为沿线市县提供生活及工业用水, 还显著改善了超过70万公顷耕地的灌溉条件, 为区域农业生产提供了稳定的水源保障。

本文将引江济淮工程矢量边界涉及的 262 个村级行政单元定义为影响区 (Impact Area, IA), 共计 262 个影响单元 (图 1), 确保所有直接的工程扰动 (如占地、施工) 均被纳入分析。为有效剥离区域性气候变化等背景因素的影响, 选取影响区所

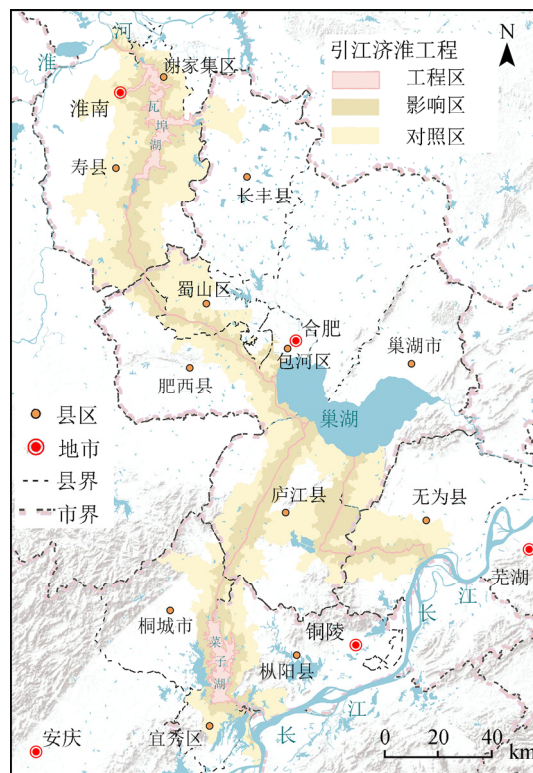


图 1 研究区概况

Figure 1 Survey of the study area

在的 67 个乡镇级行政区边界, 排除影响区范围, 将剩余部分作为对照区 (Control Area, CA), 共计 67 个对照单元 (图 1)。该设计通过对照区与影响区在宏观气候、土壤类型和农业耕作制度上具有高度相似性, 工程期间对照区未受到工程的直接物理扰动, 实现影响区和对照区 ‘受扰/未扰’ 的对比分析。

## 1.2 数据来源与预处理

本文采用陆地卫星 8 号 OLI/TIRS 集合 2 二级科学产品 (Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 Science Products) 作为主要数据源, 空间分辨率为 30 m, 由美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 基于 Landsat 8 OLI/TIRS 传感器数据在集合 2 标准下经过辐射/几何与大气校正后生成的标准化二级科学产品, 提供地表反射率 (SR) 与地表温度 (ST) 等物理量, 用于一致、可对比的长期地表监测与分析 (Roy et al., 2014)。本文使用两种时间尺度的数据集: 1) 2015 年 (建设前) 和 2024 年 (建成后) 两期年度合成影像, 用于土地覆盖分类及植被生长状态差异计算; 2) 2015—2024 年连续的年度合成影像时间序列, 用于植被生长趋势计算和未来长势预测。数据处理基于 GEE (Google Earth Engine) 平台 (Gorelick et al., 2017) 完成, 研究区范围共涉及 7 景 Landsat 8 影像 (轨道

号/行编号: P120/R38, P121/R39, P121/R37, P121/R38, P121/R39, P122/R37, P122/R38)。通过全年影像数据,利用质量波段进行去云和云影掩膜,利用线性插值方式建立连续年内生长季时间序列(1—12月,时间间隔16d)。该方法有效降低物候差异、异常值及传感器噪声的影响,得到代表全年典型生长状况的稳健数据。

县级及以上行政区等矢量数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.tianditu.gov.cn>)。乡镇和村级行政区划数据来源于中国自然资源部发布的官方地理信息数据(<http://www.webmap.cn>)。江淮工程区数据参考安徽省引江济淮工程官网(<https://www.ahyjjh.com.cn/>),采用Google Earth提供的0.5m分辨率卫星影像,通过人工目视解译获取引江济淮工程区矢量数据。

基于GEE平台,使用谷歌历史影像数据标记样本点,构建光谱波段(蓝、绿、红、近红外及短波红外)、多植被指数(NDVI、EVI、DBSI等)、纹理(对比度、相关性、熵等)、地形(高程、坡度、坡向)、时序(四分位距)5类39种多维特征集,采用随机森林方法,完成2015年(总体精度:81.97%, Kappa系数:0.76)和2024年(总体精度:85.13%, Kappa系数:0.81)土地覆盖分类数据集构建,该数据集包括6个一级类型:耕地、林地、稀疏植被、水体、建筑用地和裸土。

## 2 研究方法

### 2.1 植被生长总量计算

为定量评估引江济淮工程建设对区域植被生长的影响,本研究引入植被生长总量(Vegetation Growth Productivity, VGP)指标,该指标融合年内植被生长过程的强度和持续时间,表征植被的年度累积生长状况(Pettorelli et al., 2005)。通过对一个完整生长周期(通常为一年)内的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)时间序列积分来估算年度VGP(Tucker, 1979),公式为:

$$G_{VGP} = \int_{t_0}^{t_1} I_{NDVI}(t) dt \quad (1)$$

其中:

$G_{VGP}$ ——植被生长总量;

$I_{NDVI}$ —— $t$ 时刻的归一化植被指数;

$t$ ——代表时间;

$t_0, t_1$ ——生长周期(通常为一年)的起始和结束时刻。

本文利用“受扰/未扰”差分方法(Xia et al., 2024)计算工程影响区域(Impact Area, IA)与未受

工程直接影响但环境条件相似的对照区域(Control Area, CA)在工程前后( $t_0=2015$ 年,  $t_1=2024$ 年)VGP的变化差异,估算工程的实际影响。公式为:

$$\Delta G_{VGP} = (G_{VGP}^{t_1, IA} - G_{VGP}^{t_0, IA}) - (G_{VGP}^{t_1, CA} - G_{VGP}^{t_0, CA}) \quad (2)$$

其中:

$\Delta G_{VGP}$ ——工程建设对植被生长总量造成的净影响效应;

$G_{VGP}^{t_1, IA}$ ——工程影响区在工程后期( $t_1=2024$ 年)的植被生长总量;

$G_{VGP}^{t_0, IA}$ ——工程影响区在工程后期( $t_0=2015$ 年)的植被生长总量;

$G_{VGP}^{t_1, CA}$ ——工程控制区在工程后期( $t_1=2024$ 年)的植被生长总量;

$G_{VGP}^{t_0, CA}$ ——工程控制区在工程后期( $t_0=2015$ 年)的植被生长总量;

$\Delta G_{VGP}$ 值理论上剔除了同期区域性气候波动等非工程因素对植被生长的普遍影响,从而更准确地反映了由引江济淮工程建设活动本身引起的VGP变化。由于VGP是基于年度生长季合成影像计算的年度总生产力指标,可以较大程度规避不同年份间特定时相不一致可能带来的偏差,确保比较的有效性。

### 2.2 变化趋势预测

计算Sen氏斜率(王亚琼等, 2024)识别研究区影响区2015—2024年植被生长总量变化趋势。公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (3)$$

其中:

$\beta$ ——Sen氏斜率;

$\beta > 0$ ——上升趋势;

$\beta < 0$ ——下降趋势;

$x_j$ 和 $x_i$ ——时间序列中第 $j$ 年和第 $i$ 年的VGP值。

通过MK方法(张成驰等, 2025)进行Sen氏斜率显著性检验:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, x_j - x_i > 0 \\ 0, x_j - x_i = 0 \\ -1, x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S_i > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时，接受原假设，认为趋势不显著；当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时，拒绝原假设，即认为趋势显著，显著性水平 0.05 的情况下， $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$ 。

Hurst 指数 ( $H$ ) (吴运力等, 2023) 衡量时间序列长期记忆性与趋势持续性，通过重标极差分析法 (R/S) 计算。当  $0.5 < H < 1$  时，时间序列表现出正持续性，意味着未来趋势大概率延续过去的状态；当  $0 < H < 0.5$  时，序列表现出反转特性，预示着未来趋势将与过去相反；当  $H$  等于 0.5 时，该序列为完全随机游走过程，其未来变化与过去无关。

本文通过 Sen 斜率量化植被覆盖实际变化的幅度，结合 Hurst 指数判定趋势类型 (趋势持续性)，实现对植被未来变化趋势的综合评估 (朱君瑶, 2023) (表 1)。

3 结果与分析

3.1 引江济淮植被覆盖变化分析

3.1.1 工程区土地覆盖变化分析

引江济淮工程区面积 59.06 km<sup>2</sup>，水体面积

32.65 km<sup>2</sup>。未发生变化面积 26.41 km<sup>2</sup>，其中水体未发生变化 18.00 km<sup>2</sup>，占工程区 30.47%，表明引江济淮工程建设充分考虑对现有河流的利用，复用率占全长约三分之一，分布在引江济巢段和菜子湖至巢湖输水线。工程区 64.02% 的区域土地覆盖类型发生变化 (见图 2b)，面积 37.81 km<sup>2</sup>，主要变化类型为变成水体 (14.65 km<sup>2</sup>)、建筑用地 (12.87 km<sup>2</sup>) 和稀疏植被 (8.38 km<sup>2</sup>)。变成水体主要为水体扩张和配套基础设施建设，由耕地、稀疏植被、林地和建筑用地转换；变成建筑物主要是河堤和航道两岸道路修建，主要由耕地转换。

3.1.2 影响区土地覆盖变化分析

引江济淮工程影响区内，36.42% 的区域土地覆盖类型发生变化 (见图 2b，重点变化区域分别见图 2c-h)，面积为 777.94 km<sup>2</sup>。在变化区域内，变成稀疏植被为主要变化类型，面积 360.88 km<sup>2</sup>，占影响区 16.90%；145.54 km<sup>2</sup> 的区域变成建筑用地，占影响区 6.81%，变成林地 (面积 83.26 km<sup>2</sup>)、耕地 (面积 78.08 km<sup>2</sup>) 和水体 (面积 68.32 km<sup>2</sup>) 的分别

表 1 植被长势未来变化趋势分类表

Table 1 A classification scheme for projected vegetation trends

| $\beta$ | $ Z $           | $H$       | 趋势类型  | 描述                            |
|---------|-----------------|-----------|-------|-------------------------------|
| >0      | $ Z  > 1.96$    | $H < 0.5$ | 反持续改善 | 过去呈现的植被改善趋势，在未来可能发生逆转，表现为退化趋势 |
| >0      | $ Z  > 1.96$    | $H > 0.5$ | 持续改善  | 过去呈现的植被改善趋势，在未来大概率会延续         |
| —       | —               | $H = 0.5$ | 不确定   | 未来变化趋势不确定                     |
| <0      | $ Z  > 1.96$    | $H < 0.5$ | 反持续退化 | 过去呈现的植被退化趋势，在未来可能发生逆转，表现为改善趋势 |
| <0      | $ Z  > 1.96$    | $H > 0.5$ | 持续退化  | 过去呈现的植被退化趋势，在未来大概率会延续         |
| >0      | $ Z  \leq 1.96$ | —         | 基本稳定  | 未来变化趋势基本稳定                    |

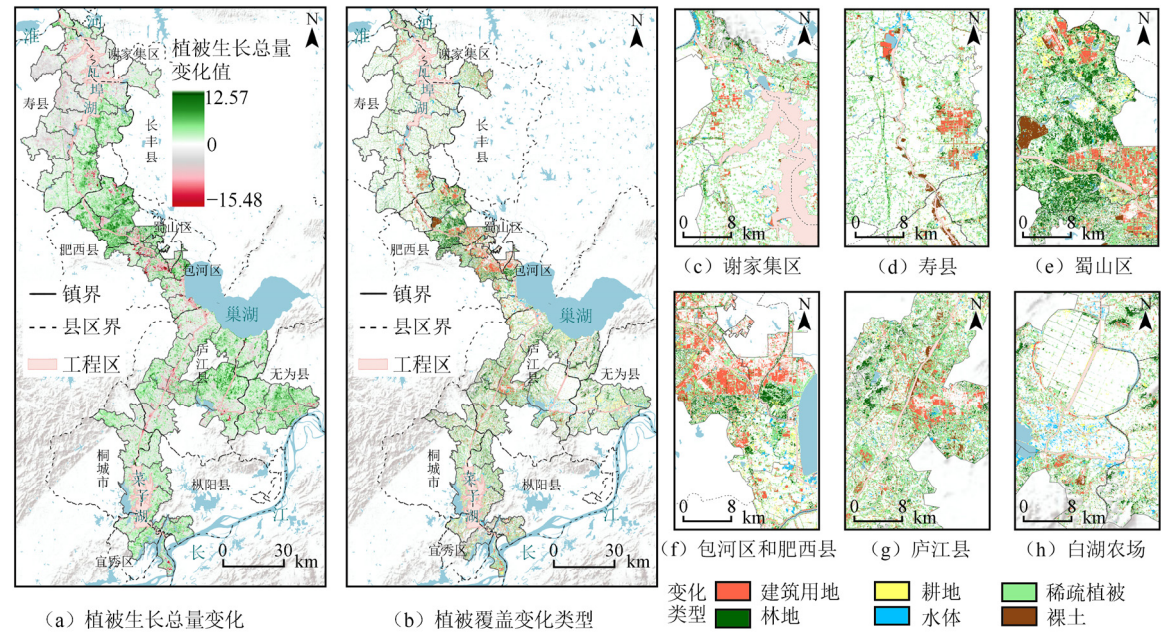


图 2 引江济淮影响区植被生长总量和变化类型空间分布

Figure 2 Spatial patterns of total vegetation growth and its variation types in the area affected by the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

占 3.96%、3.66%和 3.20%。

由图 2a 可知, 植被显著改善的聚集区域主要集中分布在合肥市城区外围、巢湖沿岸、菜子湖至长江连通段及白湖农场等区域。其中, 合肥与巢湖周边的热点集聚效应尤为显著; 菜子湖至长江段、西兆河至长江段也呈现显著聚集; 值得注意的是, 位于引江济巢输水航运线路的大型农业区(白湖农场)内部呈现出显著改善。

植被显著退化的明显区域则高度集中于城市快速扩张地带, 分布在合肥市的高新区、蜀山区、滨湖新区、三河镇, 以及庐江县和枞阳县的周边乡镇, 表明植被退化是区域城镇化快速扩张与引江济淮工程建设双重压力叠加作用的结果。

### 3.2 引江济淮影响区植被长势动态分析

#### 3.2.1 变化区域的植被长势变化特征

影响区内, 404.06 km<sup>2</sup> 的区域植被长势变好, 占变化区域的 51.94%, 对 VGP 增长平均贡献值 1.6161。由图 3a 可知主要变化类型有 14 类, 其中, 耕地变成其他植被覆盖类型(3 类)占变好区域的 26.14%, 面积 105.63 km<sup>2</sup>; 水体变成其他植被覆盖类型(4 类)占 7.48%, 面积 30.24 km<sup>2</sup>; 稀疏植被变成其他植被覆盖类型(3 类)占 6.05%, 面积 24.45 km<sup>2</sup>; 林地变成其他植被覆盖类型(1 类)占 3.01%, 面积 12.06 km<sup>2</sup>; 建筑用地变成其他植被覆盖类型(1 类)占 2.45%, 面积 9.89 km<sup>2</sup>; 裸土变成其他植被覆盖类型(2 类)占 1.79%, 面积 7.22 km<sup>2</sup>。

不同植被类型转变带来的 VGP 增加程度来看(图 3b), “裸土→稀疏植被”VGP 增加最高(3.739 5), 由耕地(2.150 4)、稀疏植被(2.115 0)转换为林

地的 VGP 增加值均超过了 2.0, 水体到其他植被覆盖类型的转变 VGP 增加也相对较高, 除转换为建筑用地外, VGP 增加值也均超过了平均值, 稀疏植被与耕地之间的转换, VGP 增加值低于了平均值, “稀疏植被→建筑用地”VGP 增加值最少为 0.706 0。结果表明由非植被向植被转变, VGP 增加最为显著。相比之下, 植被类型间的相互转换以及部分植被向建筑用地的转化, 其贡献值相对较低。

引江济淮工程影响区共有 373.88 km<sup>2</sup> 的区域发生 VGP 显著减少, 占总变化区域面积的 48.06%, 其对 VGP 减少的平均影响值为-1.950 4。由图 3c 可知, 以耕地转出为主, 其转变面积达 121.45 km<sup>2</sup> (占 VGP 减少区域的 32.48%, 涉及 4 种主要转变类型)。其次是林地(19.19 km<sup>2</sup>, 5.13%, 3 类)、稀疏植被(16.88 km<sup>2</sup>, 4.52%, 2 类)以及水体转为建筑用地(3.71 km<sup>2</sup>, 0.99%)。不同植被类型转变对 VGP 减少影响程度来看(图 3d), “林地→建筑用地”和“耕地→水体”的影响值分别高达-3.279 5 和 -3.173 7, “耕地→裸土”(-2.835 0)、“耕地→建筑用地”(-2.514 8)和“稀疏植被→建筑用地”(-2.268 8)的影响值也显著高于平均水平, 植被类型间的转换(如“林地→稀疏植被”-1.315 5, “林地→耕地”-1.217 7, “耕地→稀疏植被”-1.127 7)或水体转为建筑用地(-1.420 7)的影响程度相对较低。

#### 3.2.2 未变化区域的植被长势分析

引江济淮工程影响区内 63.58% 的区域植被覆盖类型未发生变化, 面积 1 357.91 km<sup>2</sup>。未变化区域内, 主要以耕地(面积 982.57 km<sup>2</sup>)为主, 105.92 km<sup>2</sup> 的自然植被、129.90 km<sup>2</sup> 的水体、77.53 km<sup>2</sup> 建

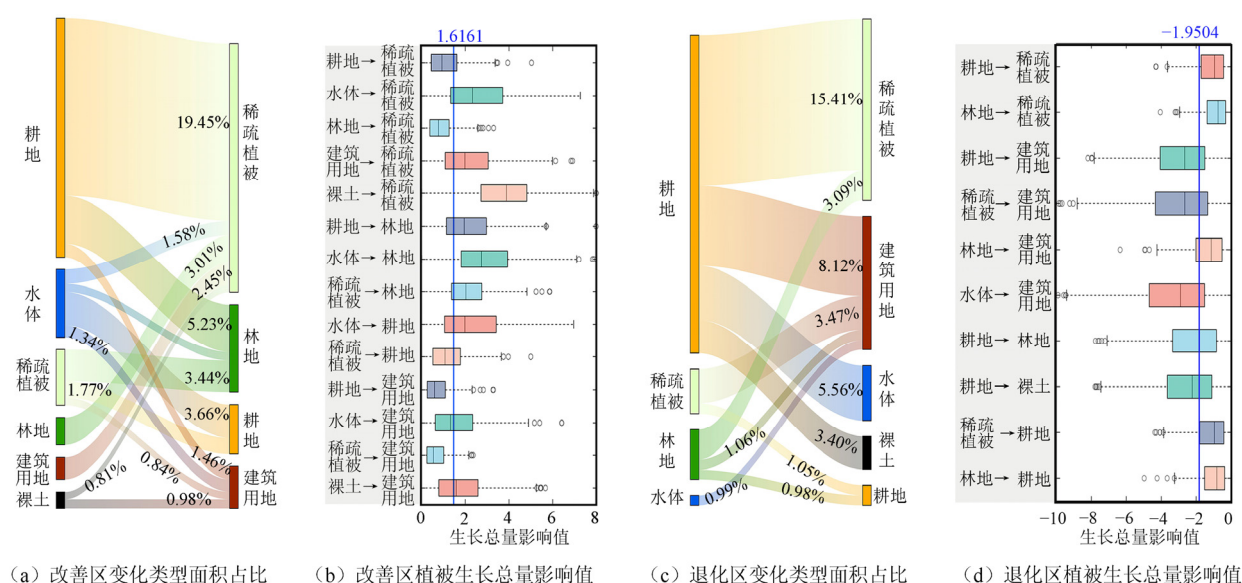


图 3 引江济淮工程影响区植被变化类型统计及其对植被生长总量的影响分析

Figure 3 Statistics of vegetation change types and an analysis of their impact on total vegetation growth in the impact zone of the Impact Zone of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

筑用地未发生变化。

自然植被（林地、稀疏植被）在工程施工前后长势变化分布如图 4a，影响单元中，绝大多数（250 个）影响单元表现出 VGP 增加的趋势，平均增幅为 0.11。105 个影响单元的 VGP 增长幅度显著高于其对照区， $\Delta VGP$  平均为 0.035 9，集中在瓦埠湖东南及北侧区域、菜子湖东侧的山区林地，以及巢湖西侧引江济淮工程沿线的部分地带。157 个影响单元的 VGP 变化表现劣于其对照区， $\Delta VGP$  平均为 -0.042 3，分布在合肥市周边、部分县城邻近区域及工程线路穿越带，考虑受城市化影响较大。

耕地区域在工程施工前后长势变化分布如图 4b，有 137 个单元（占 52.29%）在工程建设后呈现 VGP 增加，平均增幅达 0.81。有 125 个单元（占 47.71%）表现出 VGP 减少，平均降幅为 -0.62。132 个影响单元的 VGP 增长表现优于其对照区， $\Delta VGP$  平均为 0.598 2，分布在寿县邻近瓦埠湖区域及瓦埠湖北侧、合肥市蜀山区、庐江县的白湖农场区域。130 响单元的 VGP 变化表现劣于其对照区， $\Delta VGP$  平均为 -0.607 0，分布在肥西县上派镇邻近区域、庐江县和寿县部分村庄。

### 3.3 影响区植被长势变化趋势分析

影像区内，植被长势稳定区域占 85.25%，植被长势持续改善占 2.34%，反持续退化占 3.76%，植被未来表现出改善趋势合计占 6.10%；持续退化占 4.85%，反持续改善占 2.44%，植被未来表现出退化趋势的占 7.29%。在退化区中，有 1.80%位于合肥市区及其周边，主要受城市化扩张驱动。剔除这部

分影响后，因自然或其他非城市化因素导致的退化比例仅为 5.49%。因此，与 6.10%的总体改善比例相比，工程影响区植被未来改善趋势占优。

从空间分布上来看（图 5a），植被长势未来持续改善集中引江济淮（天河入长江段）（图 5b）、引江济淮（菜子湖至长江段）（图 5c）和兆河入巢湖地带（图 5d）；反持续退化主要集中在引江济淮（蜀山至寿县段）（图 5e）和白湖农场段（图 5f），引江济淮工程两岸植被受工程建设退化严重，未来改善趋势明显；持续退化则集中在合肥市周边的引江济淮（蜀山至巢湖段）（图 5g）、庐江县周边的引江济淮（庐江段）（图 5h）以及引江济淮菜子湖输水线（庐江至菜子湖段）区域；反持续改善集中在合肥市外围城市化新兴区域；未来植被长势趋势不确定区域则集中在引江济淮（三河段）的巢湖沿岸地带（图 5i）、引江济淮与淮河连接、菜子湖与长江连接等区域。

## 4 讨论

### 4.1 工程区土地覆盖变化特征

在工程区，重视对现有河流的疏浚和拓宽实现水资源的再利用，其中菜子湖至巢湖的输水线和引江济巢段河流的利用率达 63.61%；尽管工程提升航运交通和经济发展，但其建设也不可避免地导致了 24.72 km<sup>2</sup> 耕地被占用，转变为河道、河堤、航道两岸道路及边坡绿化植被（宋有权等，2023）。表明大型水利工程在改善水资源管理的同时，会影响土地资源和生态环境，这与 Ding et al. (2024) 在长江

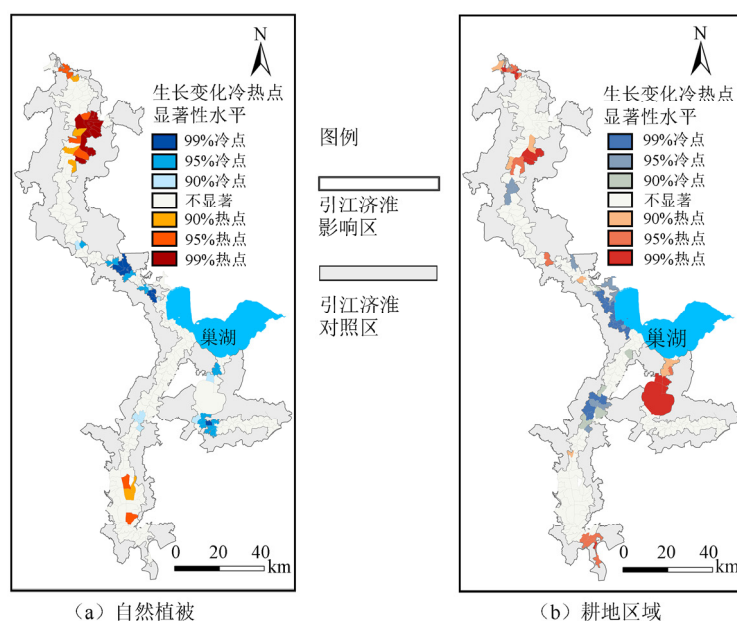


图 4 引江济淮影响区内植被长势变化分布热图

Figure 4 Heatmap showing the spatial distribution of changes in vegetation vigor within the impact zone of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

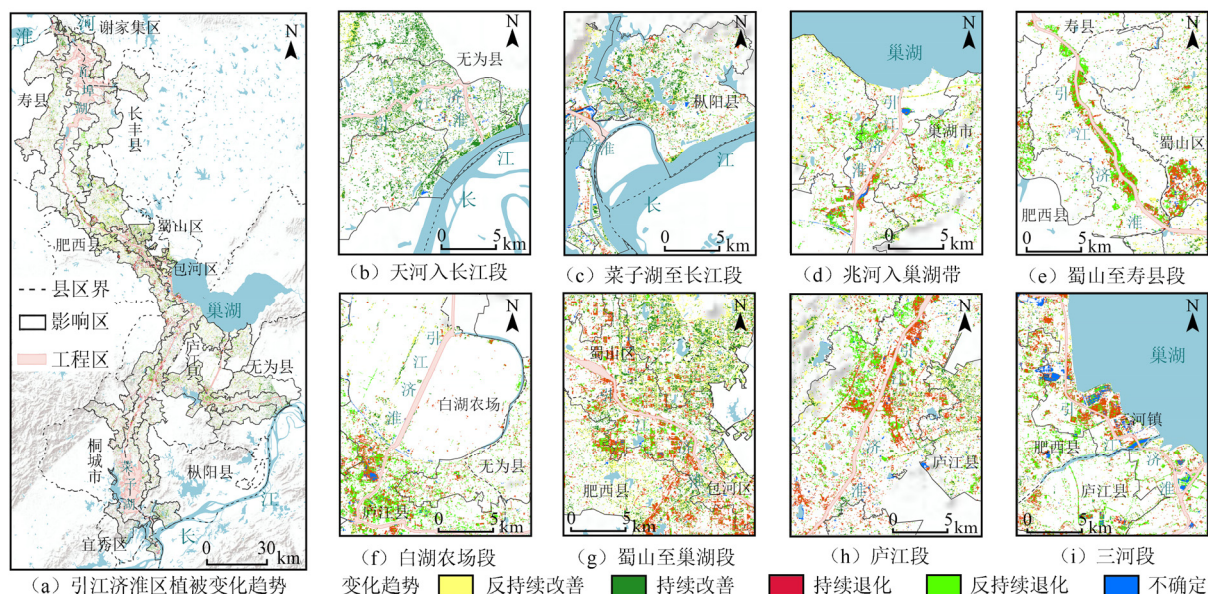


图5 引江济淮工程影响区植被未来长势变化趋势空间分布图

Figure 5 Spatial distribution of future vegetation growth trends in the impact zone of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

至淮河水利调配工程安徽段生态服务供需变化研究得到的大型水利工程为经济发展提供了水资源保障的同时,导致耕地减少和生态环境退化的问题一致。这一现象反映了大型水利工程对原文水文环境和生态系统的深远影响,此类项目实施,应该格外注意生态保护和可持续发展(Yan et al., 2012)。

#### 4.2 影响区植被长势变化

影响区内,植被覆盖类型变化中  $404.06 \text{ km}^2$  的植被长势得到改善。在合肥市周边区域,部分耕地转变为经济林和园林,这与该地区农业结构调整、追求更高经济效益以及合肥市近年来大力推进的生态公园建设、水源涵养林保护等政策密切相关(陆雨婷等, 2018; 李涛等, 2023)。此外,在引江济淮工程沿线,观察到其他植被(特别是非植被)向稀疏植被和林地的转变,庐江段和肥西段的分布尤为显著,这一变化反映了工程建设过程中滩涂和边坡的生态防护措施,以及工程完工后实施的生态修复举措(Guo et al., 2024),通过种植护坡植被和构建生态缓冲带,部分原有水域或临时非植被区域转化为植被覆盖区,整体区域的植被生长状况(VGP)得到改善。在变化区域内,  $373.88 \text{ km}^2$  的植被生长状况(VGP)出现减少,主要情况如下:城市化发展及引江济淮工程相关的基础设施建设直接占用了部分耕地,同时,受湖泊湿地生态修复和调蓄能力规划的影响,在菜子湖和瓦埠湖周边部分沿湖耕地被转变为水域或湿地(黄芸梦, 2016);此外,在派河(肥西段)和兆河(无为至庐江段)沿线,区域内改进的水利条件促进了水产养殖业的

发展(祁国华, 2021);菜子湖至长江段、天兆河入江口附近的港口、工业及城镇发展重点区域,因引江济淮工程提升了江淮航运能力,港口物流和临港产业发展加大了对原有水域滩涂的开发利用(Zhao et al., 2022);值得关注的是,在菜子湖线(庐江段)和派河(蜀山至寿县段),工程开挖、堆土及场地平整等建设活动对地表植被造成了显著破坏,施工后部分植被在恢复初期仍处于低覆盖状态,此情况亟需引起重视并加快恢复(郭贝贝等, 2022)。

稳定未变化自然植被区域,在远离主要人类活动中心地带,工程带来的水系连通和水位调节改善了区域水热条件,植被生长状况(VGP)增长优于未受工程影响的对照区(王亚琼等, 2024)。相反,在靠近城市建成区以及工程建设活动频繁、人类干扰强度大的区域,工程建设的短期扰动叠加城市扩张的影响,植被生长状况(VGP)增长滞后于对照区,甚至出现相对下降。针对耕地而言,引江济淮工程带来了灌溉条件改善、水热条件优化、灌排能力提升,影响区内耕地植被生长状况(VGP)明显优于对照区(郭贝贝等, 2024),白湖农场作为重要的农业生产基地,利用工程带来的水源保障,规划建设高效节水灌区,耕地长势显著改善。

引江济淮工程影响区植被变化表现出明显的空间分异特征,在快速城市化区域,城市建设导致的植被退化与受政策倾斜或生态工程影响的城市内部及周边特定区域的植被改善交织在一起。工程带来的局部水文条件改善及生态廊道保护措施对

远离城市区域的植被产生了显著的改善效应, Liu et al. (2020) 也通过相关研究指出, 引江济淮区域内植被变化受到城市化进程、政策实施和生态建设等多重因素的影响, 展现出复杂的空间分布特征。

尽管本文采用的  $\Delta VGP$  方法在最大程度地剥离区域性的气候波动背景, 但我们也认识到, 局地微气候、政策调整等复杂因素仍可能与工程影响交织。例如, 对照区与影响区之间可能存在的微小环境异质性, 或非工程因素的非平行演变, 都可能为结果带来一定不确定性。未来的研究可尝试结合更高分辨率的气象数据与社会经济统计, 构建更复杂的计量模型, 以期实现更精准的效应归因。

### 4.3 未来变化趋势

2015—2024 年工程建设虽在派河(蜀山至寿县段)造成地表植被显著破坏, 但沿线 64.69% 的区域仍被预测为未来呈现改善趋势(孙康茜等, 2019), 表明该河段总体上将进入恢复阶段, 这一转变得益于工程建设后实施的河道整治与生态修复工程在未来发挥的成效。合肥市蜀山区、高新区与肥西县大面积地表植被未来呈持续退化趋势, 随着合肥市近年快速向外围扩张, 长期、高强度的城市化开发已成为上述区域植被退化的主导驱动力。三河镇临巢湖地带呈现“持续退化、反持续退化、趋势不确定”交错分布特征。持续退化区主要分布于城镇建设用地和近岸鱼塘集中, 其植被下降与快速城市扩张及水产养殖面增大密切相关(Cheng et al., 2020), 相反, 反持续退化区与三河湿地生态修复工程的实施范围重叠, 表明近年来的湿地恢复措施已初显成效, 然而, 该区域不确定趋势仍占据一定比例, 提示后续需对该区域开展重点监测与管控。菜子湖至庐江河段沿线乡镇带及庐江县城周边未来以持续退化为主, 而运河西岸的老虎山片区则出现大面积改善趋势, 主要原因是老虎山地势起伏、坡度较大, 自然条件限制了建设蔓延, 加上生态修复与水源涵养林措施。引江济巢西线流域整体呈现改善态势, 仅在少数乡镇建成区受城镇化而持续退化, 白湖镇周边由先前的退化转变为“反持续退化”轨迹, 可能是实施“退耕还林/草”与湿地重建的原因, 而毗邻长江口的大片滩涂、耕地带在长江大保护政策的叠加效应下未来持续改善。

## 5 结论

本文基于 Landsat 数据识别引江济淮工程建设前后植被覆盖变化时空格局和植被生长变化特征, 结合 Sen+MK 检验和 Hurst 方法识别影响区内植被未来变化特征, 得到结论如下:

1) 引江济淮工程建设, 既有河流复用率超

30%, 引江济巢段以对既有河道进行疏浚、拓宽为主, 江淮沟通段则主要依靠新开挖河道实现连通。工程区内 24.72 km<sup>2</sup> 的耕地占用, 新增水体 37.81 km<sup>2</sup>, 以及配套基础设施用地 12.87 km<sup>2</sup>。

2) 引江济淮工程影响区内, 36.42% 的区域植被覆盖类型发生变化, 呈现城区内改善与退化交错、外围区域则连片改善的空间分布格局。变化区域中, 51.94% 植被长势改善, 对 VGP 增长平均贡献值 1.616, 表现为城市周边耕地转园林/经济林及引江济淮沿线(庐江、肥西段)实施护坡绿化与生态修复; 48.06% 区域发生 VGP 显著减少, VGP 减少平均影响值为 -1.9504, 集中发生于城市及基础设施扩张、水域湿地调整、渔业与港口产业开发及工程施工扰动区。

3) 影响区内稳定为变化自然植被中, 250 个单元 VGP 呈增长趋势(平均增幅 0.11), 其中 105 个远离人类活动中心的单元增势显著优于其对照区( $\Delta VGP$  均值 0.0359), 而受城市化影响的 157 个单元则表现退化( $\Delta VGP$  均值 -0.0423); 137 个单元的耕地植被改善(平均增幅 0.81), 132 个影响单元耕地长势增长表现远超对照区( $\Delta VGP$  均值 0.5982), 白湖农场等核心农业区, 因工程带来的稳定水源保障, 耕地长势得到显著改善。

4) 在工程影响区未来植被长势总体向好, 6.10% 区域呈未来改善趋势, 剔除城市化影响后, 退化比例 5.49%。改善趋势沿巢湖西北沿岸、天河入江口和派河(合肥至寿县段)两岸分布; 三河镇临巢湖地带局部趋势不明确应加以关注; 退化趋势主要位于城市扩张带。

### 参考文献:

- CHENG Z Y, ZHANG X F, 2020. Exploring the Habitat Restoration and Landscape Construction of the Wetland Lakeside Zone in the Lujiang Section on the Southern Bank of the Chaohu Lake [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing: 012037.
- CUI L L, WEI Z H, ZHOU L Z, et al., 2024. Effects of constant high water levels in winter on waterbird diversity in Caizi Lakes: A functional perspective [J]. *Global Ecology and Conservation*, 52: e02934.
- DING W Q, SHI G Z, ZHA H, et al., 2024. Ecological impacts and supply demand evolution of the Yangtze to Huaihe water transfer project in Anhui section [J]. *Scientific Reports*, 14(1): 20311.
- GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27.
- GUO B B, LI W, KONG X M, et al., 2024. Evaluating the spatiotemporal land ecological changes in the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(16): 10299-10313.
- HTAY T, HTOO K K, RØSKAFT E, et al., 2024. Environmental factors

- affecting spatio-temporal distribution of crop-exploiting species: Implications for coexistence between agricultural production and avifauna conservation in wetlands [J]. *Environmental Management*, 74(4): 664-683.
- HUANG J, GUANG P H, GAO J M, et al., 2024. Multiscale spatiotemporal characteristics and influencing factors of ecosystem service value of groundwater in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 368: 122196.
- LI C L, LI H F, ZHANG Y, et al., 2019. Predicting hydrological impacts of the Yangtze-to-Huaihe Water diversion project on habitat availability for wintering waterbirds at Caizi Lake [J]. *Journal of Environmental Management*, 249: 109251.
- LIU Z Z, WANG H, LI N, et al., 2020. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018 [J]. *Sustainability*, 12(6): 1-18.
- PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9): 503-510.
- ROY D P, WULDER M A, LOVELAND T R, et al., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research [J]. *Remote Sensing of Environment*, 145: 154-172.
- SUN H Q, ZHENG Z Y, CHEN S Q, et al., 2023. Source apportionment of heavy metals and their effects on the species diversity of plant communities in the Caizi Lake wetland, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(21): 60854-60867.
- TUCKER C J, 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- XIA Z L, LI Y J, GUO S C, et al., 2024. Satellites reveal spatial heterogeneity in dryland photovoltaic plants' effects on vegetation dynamics [J]. *Earth's Future*, 12(6): e2024EF004427.
- YAN D H, WANG H, LI H H, et al., 2012. Quantitative analysis on the environmental impact of large-scale water transfer project on water resource area in a changing environment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8): 2685-2702.
- ZHAI T L, WANG J, FANG Y, et al., 2021. Identification and prediction of wetland ecological risk in key cities of the Yangtze River Economic Belt: from the perspective of land development [J]. *Sustainability*, 13(1): 411-428.
- ZHAO Q Y, PENG J, ZHU Z Q, et al., 2022. Evolution and driving forces analysis of wetland landscape pattern around Chaohu Lake from 1975 to 2020 [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 39(5): 45-53.
- 顾康康, 刘飞, 汤晶晶, 等, 2022. 基于压力-状态-响应模型的引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全评价[J]. *安徽建筑大学学报*, 30(5): 1-9.
- GU K K, LIU F, TANG J J, et al., 2022. Regional ecological security assessment of Anhui section of Yangtze River to Huaihe River diversion project based on the Pressure-State-Response Model [J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 30(5): 1-9.
- 郭贝贝, 崔莹雪, 方叶林, 等, 2022. 引江济淮工程沿线生态环境质量时空分异研究——以庐江段为例[J]. *长江流域资源与环境*, 31(9): 2000-2010.
- GUO B B, CUI Y X, FANG Y L, et al., 2022. Spatio-temporal differentiation of ecological environment quality in the Yangtze-to-Huaihe River water diversion project area: A case study of the Lujiang Section [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 31(9): 2000-2010.
- 郭贝贝, 李卫, 孔雪敏, 等, 2024. 引江济淮工程沿线(安徽段)粮食生产时空变化特征[J]. *巢湖学院学报*, 26(2): 51-59.
- GUO B B, LI W, KONG X M, et al., 2024. Spatiotemporal changes of grain production along the anhui section of Yangtze-to-Huaihe water diversion project [J]. *Journal of Chaohu University*, 26(2): 51-59.
- 黄芸梦, 2016. 瓦埠湖生态环境现状评价及湿地生态系统构建研究[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- HUANG Y M, 2016. The ecological environment present situation assessment and wetland ecosystem construction in Lake Wabu [D]. Hefei: Hefei University of Technology.
- 李涛, 曹卫东, 王雪妍, 2023. 长三角一体化下城市规模提升的水环境风险——以合肥市为例[J]. *自然资源学报*, 38(5): 1366-1377.
- LI T, CAO W D, WANG X Y, 2023. Study on water environment risk of city size increase under the integration of Yangtze River Delta: A case study of Hefei city [J]. *Journal of Natural Resources*, 38(5): 1366-1377.
- 刘芷兰, 李红清, 石义军, 等, 2022. 枯水期水位变化下菜子湖湿地生态修复[J]. *人民长江*, 53(12): 63-68.
- LIU Z L, LI H Q, SHI Y J, et al., 2022. Ecological restoration of Caizi Lake wetland under water level change in dry period [J]. *Yangtze River*, 53(12): 63-68.
- 陆雨婷, 姚梦园, 朱娴飞, 等, 2018. 合肥市建设扩张与生态格局时空演变特征分析[J]. *安徽农业大学学报*, 45(3): 492-500.
- LU Y T, YAO M Y, ZHU X F, et al., 2018. The spatial-temporal evolution of the construction land expansion and ecological pattern in Hefei city [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 45(3): 492-500.
- 祁国华, 2021. 基于多源遥感数据的巢湖水华长时序时空变化分析与预警研究[D]. 合肥: 安徽大学.
- QI G H, 2021. Long-Term spatiotemporal variation analysis and early warning research of algal blooms in Chaohu Lake based on multi-source remote sensing data [D]. Hefei: Anhui University.
- 宋有权, 杨燕华, 程奎, 等, 2023. 引江济淮工程安徽段生态岸坡防护结构形式综述[J]. *水运工程* (8): 70-76.
- SONG Y Q, YANG Y H, CHENG K, et al., 2023. Summary of ecological bank protection structure in Anhui section of Yangtze-to-Huaihe water diversion project [J]. *Port & Waterway Engineering* (8): 70-76.
- 孙康茜, 刘花台, 曹文志, 等, 2019. 引江济淮工程对派河水环境的影响[J]. *环境工程*, 37(12): 49-54.
- SUN K Q, LIU H T, CHAO W Z, et al., 2019. Effects of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project on the Pai River's aquatic environment [J]. *Environmental Engineering*, 37(12): 49-54.
- 王亚琼, 高曼莉, 罗劲松, 等, 2024. 2001—2021年巢湖流域植被覆盖时空变化及驱动分析[J]. *长江科学院院报*, 41(6): 58-68.
- WANG Y Q, GAO M L, LUO J S, et al., 2024. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and driving forces in Chaohu Lake Basin from 2001 to 2021 [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 41(6): 58-68.
- 王哲, 田胜尼, 张永梅, 等, 2022. 巢湖派河口滩涂植物群落特征研究[J]. *生态环境学报*, 31(9): 1823-1831.
- WANG Z, TIAN S N, ZHANG Y M, et al., 2022. Study on the plant community characteristics of the estuary of Pai River in Chaohu Lake [J]. *Ecology and Environment*, 31(9): 1823-1831.
- 吴运力, 张钰, 田佳榕, 2023. 气候变化和人类活动对内蒙古高原不同植被类型NDVI的影响[J]. *中国农业气象*, 44(12): 1155-1168.
- WU Y L, ZHANG Y, TIAN J R, 2023. Impacts by climate change and

- human activities on NDVI in different vegetation types across the Inner Mongolia Plateau [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 44(12): 1155-1168.
- 姚简, 周立志, 魏振华, 等, 2022. 菜子湖冬季水鸟空间分布与环境因子的关系研究[J]. *生态科学*, 41(1): 1-10.
- YAO J, ZHOU L Z, WEI Z H, et al., 2022. Relationship between environmental factors and spatial distribution of wintering waterbirds at Caizi Lake, China [J]. *Ecological Science*, 41(1): 1-10.
- 张成驰, 姚慧芳, 马秀枝, 2025. 新疆天山地区净生态系统生产力时空动态及归因分析[J]. *生态环境学报*, 34(11): 1690-1704.
- ZHANG C C, YAO H F, MA X Z, 2025. Spatiotemporal dynamics and attribution analysis of net ecosystem productivity in the Tianshan Region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 34(11): 1690-1704.
- 朱君瑶, 2023. 2000—2020 年饶河流域 NDVI 时空变化及驱动因素分析 [D]. 南昌: 江西农业大学.
- ZHU J Y, 2023. NDVI spatio-temporal changes and Its driving factors in Rao River Basin from 2000 to 2020 [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University.

## Vegetation Dynamics in Response to the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project: An Analysis of the Jianghuai Section

WANG Yaqiong<sup>1</sup>, LUO Jinsong<sup>1</sup>, GAO Manli<sup>1</sup>, FAN Bingyu<sup>1</sup>, WANG Peixiao<sup>\*2, 3</sup>

1. Anhui Vocational & Technical College of Forestry, Hefei 230000, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System/Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China;

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China

**Abstract:** To evaluate and predict vegetation dynamics driven by the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project, this study used Landsat data from 2015 to 2024. The analysis combines random forest classification, the Sen-MK trend test, and the Hurst index. The focus is on the spatial and temporal changes in vegetation cover and vegetation growth performance (VGP) before and after project construction, as well as on future trends. The results show that the project reused more than 30% of existing river channels, while occupying 24.72 km<sup>2</sup> of cropland. The project also created 37.81 km<sup>2</sup> of new water bodies and 12.87 km<sup>2</sup> of supporting facilities. Vegetation cover types changed in 36.42% of the study area. Within these changed areas, vegetation conditions improved in 51.94% of the land, where the mean VGP increase was 1.616. However, vegetation degraded in 48.06% of the area, with a mean VGP decrease of 1.950 4. In areas with stable natural vegetation, 250 impact units showed an increase in VGP, with a mean change of +0.11. For cropland, 137 impact units experienced improved vegetation conditions, with a mean increase of +0.81. Additionally, 132 cropland impact units showed a significantly higher VGP increase compared to the control areas, with a difference ( $\Delta$ VGP) of 0.598 2. The Hurst analysis indicates that vegetation growth under the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project is likely to maintain an overall positive trend. About 6.10% of the area exhibited a pattern of continuous improvement. These areas are mainly located along the northwest shore of Chaohu Lake, near the Tianhe River inlet to the Yangtze River, and along both sides of the Paihe River from Hefei to Shouxian. After accounting for urban expansion, areas with a future degradation trend make up 5.49%. The future trend in some parts of Sanhe Town near Chaohu Lake is unclear and requires further attention. In the short term, the construction of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project caused some local vegetation degradation. However, the project also led to long-term vegetation recovery, supported by improved hydrological conditions and ecological restoration efforts. Overall, the project has resulted in a net improvement in the quality of regional vegetation.

**Keywords:** Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project; land cover change; vegetation dynamics; trend test; Hurst index