

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

郭贝贝 崔莹雪 方叶林 张毓¹

(安徽大学商学院, 安徽 合肥 230036)

【摘要】: 引江济淮工程施工对沿线与周边区域的生态环境质量有显著的影响, 为监测和研究工程区施工前后、项目区内外的生态环境质量时空差异, 收集 2013~2021 年收获季节的影像数据, 分析绿度、湿度、热度和干度指标, 使用主成分分析法计算遥感生态指数 (RSEI)。研究结果显示: (1) 研究期内庐江县域 RSEI 均值为 0.7395, 生态环境质量总体较好, 工程施工并未显著影响庐江县全域生态环境质量; (2) 施工区的 RSEI 值比施工前的历年均值低 38.70%, 施工结束后仍未明显改善, 仅恢复到施工前 84.13% 的水平; (3) 施工期项目 1km 缓冲区内 RSEI 平均值降低了 17.11%, 完工当年生态环境已逐渐恢复至施工前 88.28% 的水平, 将持续影响周边生态环境直至达到新的稳态; 庐江试验段工程施工后的环境恢复程度和施工效果较好, 可为重大工程建设过程中生态环境保护 and 区域空间规划提供参考和依据。

【关键词】: 生态环境质量 引江济淮工程 时空分异 遥感生态指数

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-2000-11

我国水资源分布时空不均衡, 现阶段立足流域整体和水资源空间均衡配置^[1], 在保护区域生态环境的基础上科学推进重大跨流域调水工程。引江济淮是全国重大水利工程中的标志性项目, 是第二条南北水运大通道^[2], 还是惠泽皖豫两省的重大民生和生态工程, 以城乡供水和发展江淮航运为主, 结合灌溉补水和改善巢湖及淮河水生态环境。项目于 2016 年底正式启动, 总工期 72 个月, 涉及安徽省 12 市和河南省 2 市共计 55 个区县, 总面积约 7.06 万 km², 输水线路总长 723km, 沿线区县生态资源丰富。该工程优化区域水资源配置缓解水资源难题, 还改善了区域水土生态环境和生态功能, 联通长江经济带、中原经济区、合肥经济圈三大战略区域, 对促进区域经济协调发展具有十分重要的战略意义。

调水工程任务艰巨, 跨流域水利工程的影响包括移民^[3]和生态环境等问题日趋凸现, 引江济淮工程陆续开工后相关的研究包括调水供应规划设计方案^[4,5,6]、生态补偿^[7,8]、征地^[9]、农户意愿和生计^[10]等。生态环境是人类赖以生存的物质基础, 调水工程实现在空间上重新分配水资源^[11]的同时, 不仅影响了区域的土地利用^[12], 还会对区域生态环境产生影响^[13,14,15,16]。各国比较重视大型跨流域调水工程的生态环境影响的研究, 探索在建立生态环境影响评价制度基础上, 制定相关的法规和政策等^[17], 但目前对其环境评估缺少统一的标准, 未建立系统的评价体系^[18]。学者们研究实施大型调水工程后流域生物种群的变化^[19,20,21]、水环境的变化^[22,23]、生态系统稳定性稳态转化^[24]等, 基于水质-经济的遗传算法优化模型、社会影响评价模型、资源-社会-经济-环境-工程技术模型^[25]等来评价流域农业和环境的经济损失; 根据跨流域调水对水源区、输水区和受水区的生态环境影响特征^[26], 基于物理-生物-社会生产要素模型等研究跨流域调水工程对流域生态环境的影响。跨流域水利工程与其他线性工程^[27]的影响类似, 包括廊道式工程^[28]和管线工程^[29,30], 会引起区域土地生态系统内农业、植被、生物量及土壤侵蚀等改变, 其中最主要是引起土地利用的

作者简介: 郭贝贝(1986~), 女, 副教授, 主要研究方向为土地利用和生态环境变化。E-mail: guobb@ahu.edu.cn

基金项目: 安徽省社科规划项目(AHSKQ2020D61)

变化。国家环保总局发布的适用于行政区、生态功能区、城市/城市群和自然保护区的生态环境状况指数较单一，难以综合评价和动态衡量生态环境状况。国内外学者基于遥感和 GIS 技术^[31]，结合生态指数^[32]对城市^[33, 34]、湿地、农田、工程区^[35]和矿区^[36]等生态系统的环境质量进行综合评价^[37]。遥感生态环境监测^[38]技术已较成熟，还可利用遥感和地面数据结合 BP 神经网络^[39]、驱动因素模型^[40]和大数据生态环境在线系统等^[41]等实时监测。

引江济淮工程跨越江淮分水岭^[9]，纵向上联结长江流域^[26]和淮河流域^[42, 43]，在改善区域水环境的同时将改变沿线部分地区生态功能，对生态安全提出了新的更高的要求，推进形成人与自然和谐发展的河湖生态新格局，从而提高生态系统稳定性与可持续性。本文选用主体完工最早的庐江段，研究“自然-人工”复合区域的生态环境变化，根据施工情况采取相应环境保护措施进行有效控制，既有助于减少工程建设对生态系统产生的不利影响，还可促进全域生态环境保护，为区域资源利用、生态保护和国土空间规划等提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究中的遥感数据选用 Landsat OLI 影像，空间分辨率为 30m。研究区作物一年两熟，影像季相分别选取春夏农作物收获季节，尽量避免季节差异造成影响，春季选择 3~4 月，夏季选择 7~8 月，同时因施工期较长选用施工前后云量较少的数据进行对比。在地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 和 USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 下载的数据为 1T 级，已进行了几何校正，具体数据日期和云量如表 1 所示。对影像进行辐射校准和 FLAASH 大气校正以消除大气和光照等因素的影响，同时将所有数据裁剪到项目和缓冲区边界。

表 1 研究区影像信息与气候数据

日期	云量 (%)	均温 (°C)	日期	云量 (%)	均温 (°C)
2013/04/02	0.11	15.3	2018/04/10	0.03	22.5
2014/03/14	0.48	9.3	2019/08/17	10.57	28.2
2016/07/25	0.64	31.6	2020/04/15	0.60	17.5
2017/07/28	4.07	32.5	2021/06/05	2.66	24.5

1.2 研究区域

引江济淮庐江段位于江淮丘陵南部，E117° 6' 50" ~ E117° 23' 56" 和 N31° 5' 9" ~ N31° 32' 2" 之间 (图 1)，属于北亚热带季风区，雨量充沛，无霜期较长，光热资源丰富，年均气温 16.3°C。庐江段连接菜子湖和巢湖，翻越长江和巢湖流域分水岭，周边沿湖海拔为 6~10m，东南丘陵区海拔 100~595m。庐江段占总工程量的近 1/4，跨越 7 个乡镇，工程一期总投资 875.37 亿元。2018 年 3 月 11 日入场施工，截至 2021 年 8 月柯坦镇境内 4.5km 样板段工程建设完工，为柯坦镇、乐桥乡约 12 万人口、1 万 hm² 农田灌区用水提供了保障。考虑工程对空间生态环境的影响^[44]具有异质性，为分析不同距离的影响程度，本文分别选择项目沿线 0.5km 和 1km 的缓冲区^[45, 46]作为施工对比区域，分别监测项目区与周边的生态环境质量，同时监测施工期前，期间和期后的生态环境质量变化来确定时空差异。

1.3 研究方法

工程实施对生态环境质量的影响在湿度、绿色、热度和干燥度等生态环境指标上^[47]可具体体现。其中，土壤水分和水资源的分布导致湿度的变化；与植物生长密切相关的植被类型、土壤肥力和水质会导致绿色变化，因此在研究区域湿度变化时需将区域大面积水域作掩膜处理，避免水域对湿度结果的影响；土壤温度、表面覆被和其他因素会导致热量变化；干燥度变化是由土壤质地、土壤温度、土地退化或工程建设活动引起的。利用主要信息增强技术从遥感图像中提取相关指标中表示信息，使用遥感生态指数评估模型与上述指数相结合，来监测和评估工程沿线和周边区域的生态环境质量变化。湿度、绿色、热度^[34]和干燥度分别由湿度分量、归一化植被指数、地表温度和干燥指数^[48]表示。

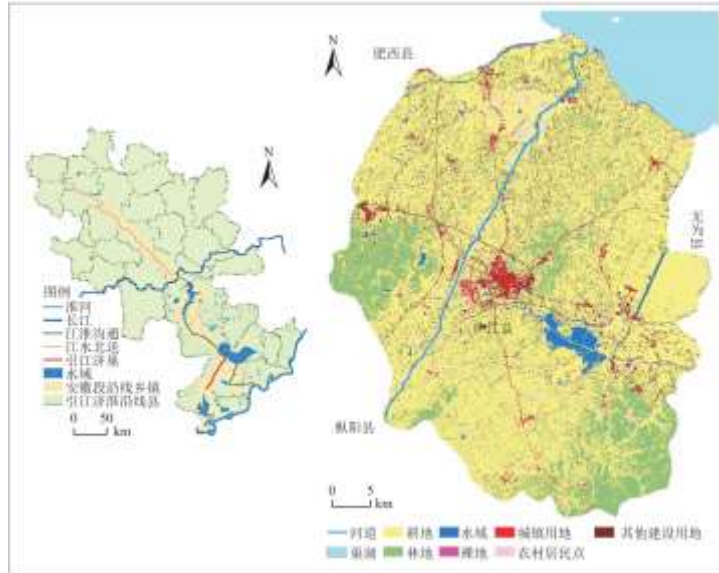


图 1 研究区示意图

注：中国全图基于标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1835 号的标准地图制作，底图无修改。参考《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017)与研究区的实际情况将土地类型分为 7 类，根据 2020 年 4 月 15 日的区域影像使用支持向量机和决策树模型监督分类方法解译得到区域土地利用现状类型图。

1.3.1 水体指数

研究区内的大面积水域会对区域的湿度指标结果有影响，利用 MNDWI 水体指数^[49]进行水体提取后掩膜处理，具体见公式(1)。

$$MNDWI = (\rho_{SWIR1} - \rho_{Green}) / (\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}) \quad (1)$$

式中： ρ_{Green} 和 ρ_{SWIR1} 分别代表与 OLI 影像相对应的绿色和短波红外波段的反射率。

1.3.2 遥感生态指数和主成分分析

主成分分析方法(PCA)用于综合各生态环境的指标，主成分的方差用作权重，以评估各种生态指标。因遥感调查获得的指标不统一，采用标准差的方法对指标进行标准化，并将范围统一为[0, 1], 如式公式(2)所示。

$$NI = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (2)$$

式中：NI 是归一化指标值；I 是指标的数值； I_{\max} 和 I_{\min} 分别是指标的最大值和最小值。

将标准的湿度、绿度、热度和干燥度指数进行图层合成和主成分变换。如公式 (3) 所示，使用 PCA 结果构建初始的遥感生态指数 (RSEI)。

$$RSEI = PCA [f(WET, NDVI, LST, NDBSI)] \quad (3)$$

式中：WET、NDVI、LST 和 NDBSI 分别表示湿度、归一化植被指数、地表温度和干燥指数。为了促进指标间的比较，还需要对 RSEI 进行标准化，RSEI 越接近 1，则生态环境质量越好^[50]。将 RSEI 的结果均分为 5 段，分别为质量差 [0, 0.2)，较差 [0.2, 0.4)，中等 [0.4, 0.6)，良好 [0.6, 0.8)，优 [0.8, 1]^[51]。

2 研究结果

2.1 庐江段生态环境质量时空变化

区域内重大工程的建设将会对社会、经济和生态环境产生综合影响，为了计算结果一致性和可对比性，以县域为本底来研究典型区域时空综合发展变化。通过主成分分析，统计出指标的载荷值与特征值，其中第一主成分 (PC₁) 特征值的贡献率均超过 59%，最大贡献率为 89.15%，如表 2 所示。主成分中 PC₂-PC₄ 的符号和大小不稳定，解释力度弱，因此采用 PC₁ 进行模型构建。结果显示不同年份 NDBSI 的影响均最大，变化幅度为 -0.9687~0.9023 之间，载荷绝对值均高于其他因子。指标的载荷值不同年份间差别较大，与第一主成分的相关性还会产生正负效应，其中 NDVI 与 WET 呈正相关，LST 与 NDBSI 呈正相关，而 NDVI 与 LST 呈负相关。依据分指标的正负效应来确定 RSEI 的值，因大面积水域掩膜处理得到的湿度影响较为准确，研究结果中湿度对区域环境的影响也相对减弱。

表 2 因子对第一主成分的载荷值和贡献率

	NDVI	WET	LST	NDBSI	贡献率 (%)
2013	0.0444	0.1898	-0.5925	-0.7817	78.81
2014	0.2203	0.2776	-0.102	-0.9295	80.83
2016	-0.5404	-0.2106	0.3378	0.7413	74.86
2017	0.0413	0.078	-0.3386	-0.9368	89.15
2018	0.5621	0.1776	-0.1472	-0.7942	76.68
2019	-0.5362	-0.4543	0.2645	0.6604	59.65
2020	0.2204	0.0893	-0.0709	-0.9687	81.18

2021	-0.4059	-0.0992	0.1062	0.9023	66.02
------	---------	---------	--------	--------	-------

植被覆盖指数与生态环境质量应呈正相关，当 NDVI 和 PC_i 呈正相关时，RSEI=PC_i；当 NDVI 与 PC_i 呈负相关时，使用分段函数处理 RSEI 结果，即当 NDVI<0 时，RSEI=1-PC_i；当 NDVI≥0 时，RSEI=PC_i，再对 RSEI 进行标准化处理。采用相关系数检验模型的适用性，当相关系数值越接近于 1，表明模型的准确性越高。计算方法如公式 (4)：

$$\bar{C}_a = \frac{|C_b| + |C_c| + \dots + |C_n|}{n - 1} \quad (4)$$

式中：a、b、c、n 等是 n 个进行相关分析的指标， \bar{C}_a 为指标 a 的平均相关度，C_b、C_c、C_n 分别表示同期指标 a 与 b、c、n 的相关系数。

根据各分指标与 RSEI 相关系数的平均相关度可知，多数年份的 NDBSI 与 RSEI 的平均相关度最高且均高于 0.5，年际平均值为 0.6806，WET、LST、NDVI 的平均相关度依次减少，年际相关系数绝对值均值也都高于 0.5，具体见表 3。按照相关系数检验模型结果，RSEI 与分指标的相关系数均约为 0.7 以上，平均值达到 0.7395，可见相对于单一指标，RSEI 精度有所提高且具有一定的代表性。

表 3 各指标与 RSEI 指数的平均相关度

	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI
2013	0.4131	0.5979	0.5547	0.7001	0.7005
2014	0.5619	0.6366	0.3910	0.7002	0.7162
2016	0.6222	0.6855	0.6703	0.7745	0.8118
2017	0.7179	0.7835	0.7474	0.8573	0.7875
2018	0.5248	0.6046	0.5127	0.7118	0.7075
2019	0.4934	0.6380	0.6722	0.6326	0.7480
2020	0.5744	0.6533	0.5222	0.5463	0.7453
2021	0.4793	0.5606	0.5393	0.5216	0.6991
平均	0.5484	0.6450	0.5762	0.6806	0.7395

依据公式计算出庐江县县域 RSEI 和分指标的均值，再进行等级划定，庐江县历年 RSEI 均值为 0.7391，整体生态环境良好（表 4）。此外 NDVI 和 LST 的均值随季节变化，县域平均湿度为负值，干度的均值随着时间有增加趋势，2016 年后每年约增加 10.97%，直至 2021 年才较少改善。

表 4 RSEI 和指标均值

	RSEI	NDVI	WET	LST	NDBSI
2013	0.7673	0.2947	-0.0192	21.8994	-0.1172
2014	0.6456	0.2876	-0.0368	16.5463	-0.0567
2016	0.8601	0.4191	-0.0099	32.4024	-0.4589
2017	0.6621	0.4810	-0.0153	32.0989	-0.2353
2018	0.7533	0.3307	-0.0756	27.9530	-0.1193
2019	0.8063	0.4084	-0.0018	28.0543	0.0059
2020	0.6519	0.3180	-0.0338	25.5508	0.0896
2021	0.7658	0.3155	-0.0289	32.5499	0.0829

空间范围上，依据 2013~2021 年 RSEI 均值和空间分布，庐江县本底生态环境质量总体良好(图 2)，研究期呈现“下降→上升→下降→上升”的波动，主要受区域年际气候变化的影响；生态质量良好的区域面积基本保持在 85.97%以上；生态质量差的区域较少，仅占总面积的 1.5%左右；RSEI 均值变化趋势逐年稳中有降，平均变化幅度为-1.22%，主要原因是受土地利用活动影响后生态环境质量下降。

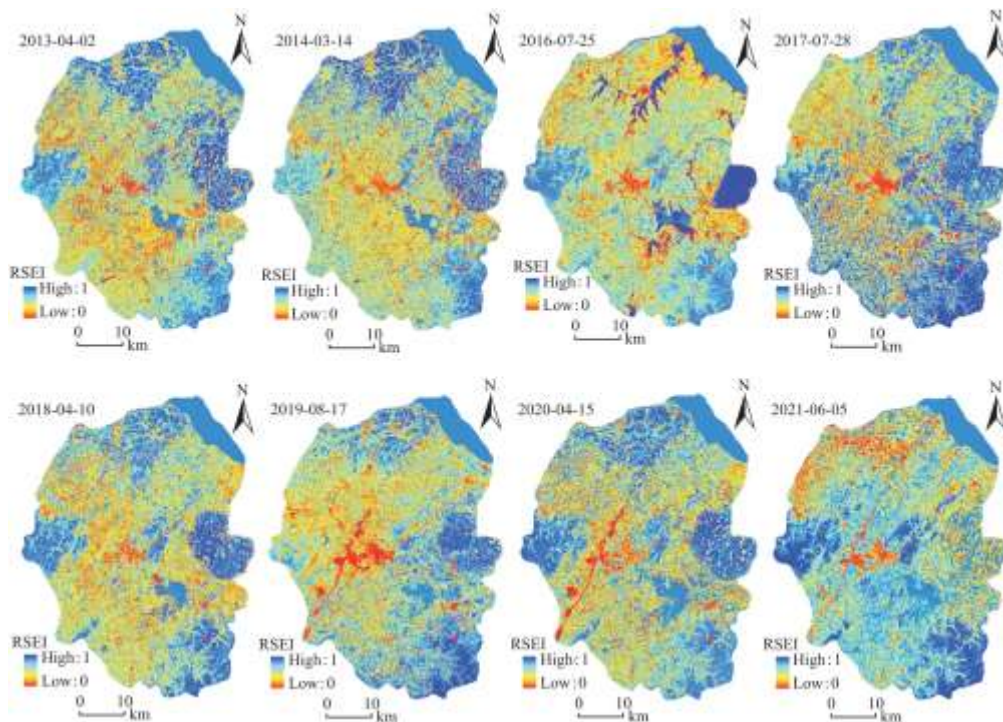


图 2 2013~2021 年庐江县生态环境质量时空变化图

注：掩膜水域的 RSEI 值显示均为 1.

不同程度的土地利用对区域内生态环境影响有差异。①生态环境质量等级为优的区域主要分布在县域西部大别山山脉、东南部三公山和中部冶父山等大面积森林和山地，约占总面积的 17.16%，年际间变化较小。②生态环境质量等级为差到中等区域主要分布在县域建设用地上，约占总面积的 16%，受区域人为活动的影响显著，其中环境质量差的区域主要集中在中心城区、城镇和工程建设区等。2018 年庐江试验段进场施工开始，施工过程中新开挖河道及临时用地的生态环境质量由良好变差；庐江县城和高新技术产业开发区等建设用地扩张区域的生态环境差，城镇化扩张过程中不可避免地影响区域生态环境。③县域耕地的生态环境质量等级在中等到良好之间，整体上差异较小，但局部空间差异较大，年际间耕地生态环境的变化主要与地表湿度和利用方式密切相关，如白湖农场水田的 RSEI 高于旱地，生态环境质量呈优。圩区耕地生态环境质量较好，同时还产生了季节性差异，其中水田季节变化差异较大，春季整体优于夏季；县域旱地较分散，年际间变化较小，生态环境质量均比较差；县域基本农田的生态环境质量明显优于一般农田区域。④大面积水域已做掩膜处理，生态环境质量未与其他地类进行比较。

2.2 工程区范围内外生态环境质量变化

引江济淮工程施工对河道和周边生态环境产生了较大的影响(见图 3),对比项目区内外年际间分量指标和 RSEI 均值变化情况,监测工程施工对区域内外与施工前、中、后阶段生态环境质量,具体见图 4。

(1) 分量指标变化情况:

引江济淮工程庐江段开挖深度为 28m,上口开口宽度为 280m,两边打抗滑桩和护坡。①工程施工前、中、后阶段,施工前工程区范围内(河道中线距离 140m 缓冲区)绿度均值有增加趋势,而 2018 年施工中期和后期的绿度指标逐渐降低;施工中的湿度较施工前显著降低,施工后短时间内还未恢复到施工前水平;施工前后的地表温度变化仅与季节气候密切相关,与所在县的平均温度变化一致;施工中的干度逐年上升,2018~2020 年增加 17.3%,高于县域平均水平,可见项目区施工对干度的影响较大,施工后干度有减少趋势;②对比工程项目区范围和周围 0.5km 和 1km 范围,发现施工前工程区内和周边各分量指标年际间差值较少。施工中期项目区内的绿度、湿度和干度与周边 0.5km 和 1km 范围均有较大差异,其中施工中期绿度和湿度指标离河道较远的区域较高,干度指标离河道较远的区域低,但随着与河道距离增加,这些分指标量的变化较小;分量指标中仅温度差别较小,可能与温度计算时的波段精度有关。

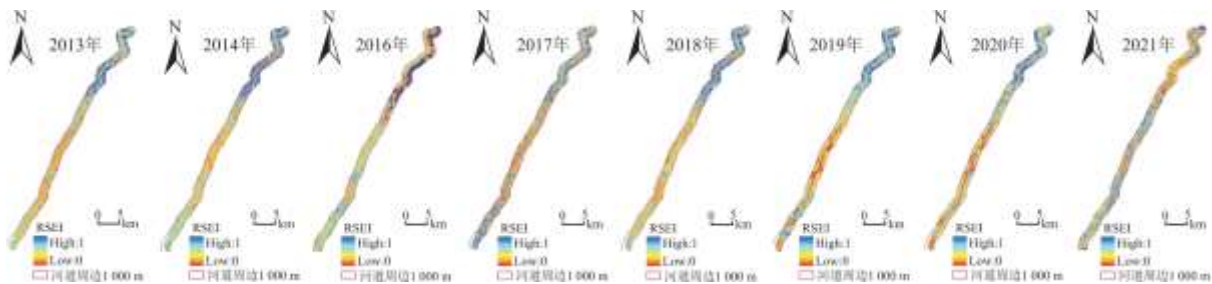


图 3 2013~2021 年引江济淮工程庐江段周边生态环境变化

(2) RSEI 均值变化情况:

同分量指标变化趋势相似,依据生态环境质量的表征定义,依据图 4 所示,①项目施工前区域生态环境质量良好,河道周围 1km 范围内的 RSEI 增加值在-1.65%到 2.22%间波动,可见区域 RSEI 均值波动较小;②施工期生态环境有变差的趋势,施工初期周边生态环境仍有波动,项目区外生态环境质量优于项目区内,施工中期距离项目区越远 RSEI 值越高,项目区的 RSEI 值在 2020 年达到低值 0.478,比施工前的历年均值低 38.70%,施工后仅恢复到施工前 84.13%的水平;2019 年工程区外 0.5km 的 RSEI 值比工程区内至少高 15.22%,2020 年达到 21.13%,在施工期间 RSEI 值平均降低了 17.11%,2021 年施工尾期 RSEI 已经改善,逐渐恢复

至施工前 88.28%的水平,可见有逐渐改善的趋势。③从图 3 和空间数据的统计结果可见,施工前河道 1km 范围内多年平均 RSEI 依次从差到优的区域比例分别占 6.31%、10.23%、21.21%、32.07%和 30.18%;施工后周围平均 RSEI 等级比例分别为 15.00%、18.51%、20.87%、27.84%和 18.50%。施工后生态环境质量差和较差的区域比例分别增长了 8.7%和 8.28%,而优和良的区域比例分别减少了 11.68%和 4.23%。空间上这些环境变差的区域分布在新开挖河道、周边的临时用地和部分拓宽的河道上。

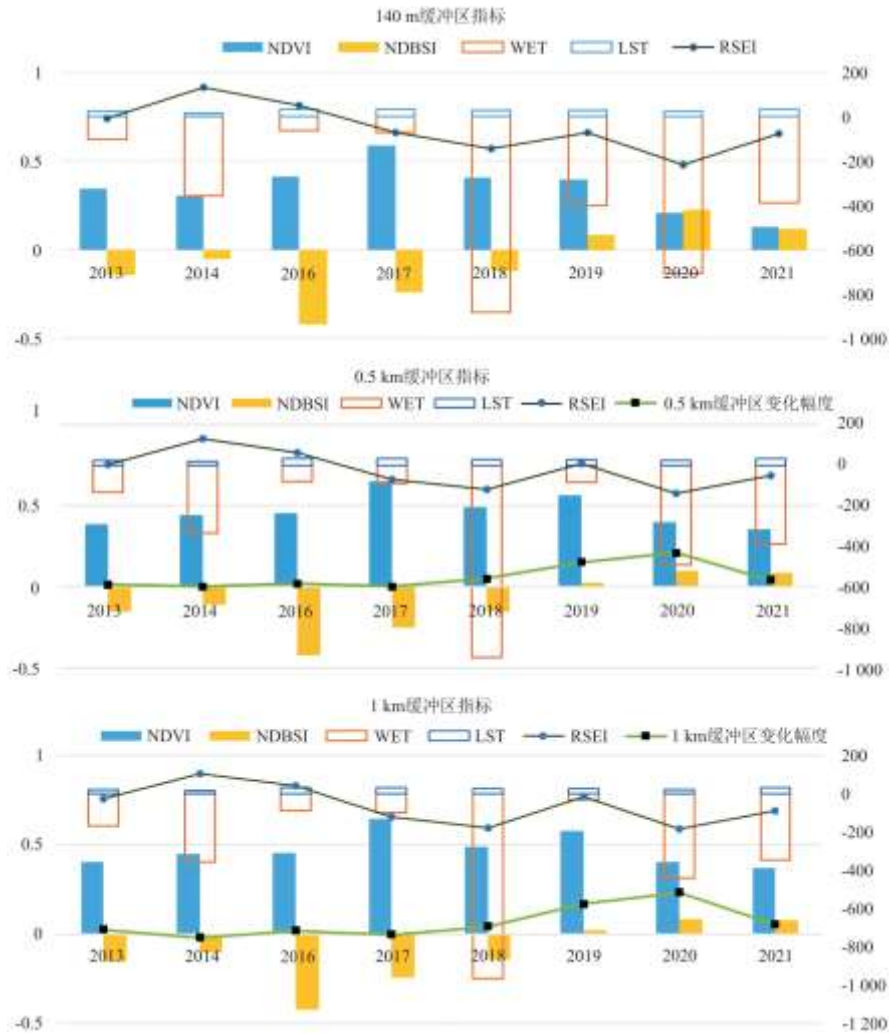


图 4 项目区内外生态环境因子均值年际变化

3 讨论

引江济淮工程施工以来,新开挖河道和临时用地因地表裸露,植被覆盖、含水量和温度等均发生显著变化,拓宽河道的材质虽较环保,也会对周围生境产生较大影响,工程初步完工后还未投入使用。时间上,工程施工前后生态环境变化较大,尤其是施工中受人干扰影响生态环境质量显著下降,而施工后生态系统即可逐渐恢复平衡。通过区域调研还发现,施工进展、工艺和材料等也会影响生态环境恢复的速度;空间上,除施工区外,工程施工建设并未长时间给周围环境造成较大的影响,该段工程建设中的用地管控和生态管控效果较好。

(1)生态环境质量与干度、湿度、绿度和温度等密切相关,而这些分量指标受制于自然环境因素。庐江县全域生态环境质量因自然因素变化,尤其是耕地的生态环境受气候和季节等因素影响。当年降雨量较少时,干度指数将增加从而使得生态环境质量

产生波动并逆向变化，如 2014 年庐江县受旱灾面积较大，对整体和局部的生态环境均有负面影响；地表土壤含水量减少会导致生态环境恶化，区域太阳辐射和地表蒸发量等也会影响生态环境质量。自然因素对区域生态环境的影响还会产生空间差异，本研究使用主要的生态指标整体上能监测区域生态环境质量变化的时空趋势。

(2) 人为活动的干扰必然是影响区域局部环境变化的主要动因之一，从土地利用和生态保护角度来看，庐江县域重视生态环境的保护，林地总面积增加，划定红线保护生态空间将全面提高区域生态环境质量，部分水土流失严重和生态脆弱的山区退耕还林将改善区域生态环境；在生态环境质量方面，非粮化和粮食产量减少等干扰作用较弱。县域建设用地面积增加，局域生态环境质量产生空间差异，重点体现在城镇化发展建设区域，研究期内变化最显著的区域即为引江济淮工程区。

(3) 引江济淮工程逐步推进，工程对沿线项目区的生态环境影响非常显著，庐江试验段建设完成后遥感生态指数结果显示工程区及周围生态系统趋于稳定并达到新的平衡，但工程沿线区域总体上仍处于恢复阶段。经调查，引江济淮庐江段工程还在洪水期间起到了蓄洪的作用。庐江段工程区内外的遥感生态监测方法与结果对该工程后期其他段的工程施工、管理和调控上有一定的指导意义，同时还能指导其他工程区的生态管理和调控。

水利工程关系到民生，但流域的生态平衡和局部小气候等遭到破坏，难以维持其生态环境的稳定，施工过程中应注意对河岸的保护，监测周边环境的变化，减缓生态环境恶化；施工完成后做好植被恢复、生境修复、连通性恢复、水量合理调度、栖息地保护等措施。

4 结论

本文使用 8 期 Landsat 8 OLI 收获季节的影像数据，使用主成分分析法计算遥感生态指数，监测区域生态环境质量时空变化。考虑区域生态环境质量变化与自然因素和人文干扰均相关，以庐江县全域作为自然因素变化的背景，对比研究工程区施工前后与项目区内外的生态环境质量时空差异，监测施工情况对区域生态环境质量的影响。研究结果发现引庐江县生态环境质量总体较好，工程施工并未对县域生态环境质量产生较大影响；工程沿线生态环境质量在施工期较差，分段施工结束后工程区短期内生态环境仍未明显改善；工程沿线 0.5km 和 1km 缓冲区内生态环境在施工期间均有变差的趋势，但变化幅度相对较小；空间上环境质量变差的区域主要分布在新开挖、拓宽的河道和周边的临时用地范围，施工完成后周边生态环境已逐渐恢复，但整体上仍未恢复到施工前的水平，将持续影响周边生态环境直至形成新的稳态，工程建成后的生态环境质量仍需持续监测。

研究中采用 RSEI 方法来表征引江济淮工程区生态环境质量，变化特征显著，既能呈现工程区与全域的环境比较，还能凸显局部变化。全域 RSEI 变化与区域社会经济发展和自然环境状况具有较强的相关性，局部区域差异显著，可为优化区域空间等做参考。本研究仍有不足，如 RSEI 方法适宜使用夏季的影像却因云量大无法使用，若能够长期遥感监测可解决该问题。后续将结合工程实际开展情况持续研究引江济淮工程区全域变化。

参考文献:

[1] SUN S, ZHOU X, LIU H, et al. Unraveling the effect of inter-basin water transfer on reducing water scarcity and its inequality in China[J]. Water Research, 2021(7578):116931.

[2] 刘涛, 彭东方. 引江济淮工程航运功能研究[J]. 人民长江, 2020, 51(1):154-159.

[3] 上官子恒, 施国庆, 吴蓉, 等. 基于 ISM 与 MICMAC 的引江济淮移民生计脆弱性影响因素分析[J]. 统计与信息论坛, 2019, 34(5):94-100.

-
- [4]SINHA P,ROLIASON E,LOUISE J B,et al.A new framework for integrated,holistic,and transparent evaluation of inter-basin water transfer schemes[J].Science of the Total Environment,2020,721:137646.
- [5]MA Y,CHANG J,GUO A,et al.Optimizing inter-basin water transfers from multiple sources among interconnected river basins[J].Journal of Hydrology,2020,590(2):125461.
- [6]骆进仁,刘姗.跨流域调水工程水资源供应链利益博弈分析[J].软科学,2018,32(5):49-54.
- [7]汪定盼.跨流域调水工程生态补偿研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [8]SUN J,DANG Z,ZHENG S.Development of payment standards for ecosystem services in the largest interbasin water transfer projects in the world[J].Agricultural Water Management,2016.
- [9]杨琛.跨流域调水工程土地征用社会稳定风险综合评价研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [10]SOFIE A,ENYEW A,TESFAALEM G,et al.Impacts of the hydropower-controlled Tana-Beles interbasin water transfer on downstream rural livelihoods (northwest Ethiopia) [J].Journal of Hydrology,2019,569:436-448.
- [11]MING B,LIU P,CHANG J,et al.Deriving operating rules of pumped water storage using multiobjective optimization:Case study of the Han to Wei interbasin water transfer project,China[J].Journal of Water Resources Planning and Management,2017,143(10).
- [12]郭尚武,张友安.南水北调中线工程对湖北省土地利用影响分析[J].长江流域资源与环境,2004(5):434-437.
- [13]王凌河.雅砻江流域生态水文过程模拟及调水影响研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [14]刘远书,高文文,侯坤,等.南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(3):440-446.
- [15]张建,雷刚,漆良华,等.2003-2018年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(4):1280-1290.
- [16]贾毅,张松林.南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化[J].生态学报,2021,41(18):7226-7237.
- [17]宋晓,迎黄伟,王丹凤.公众积极参与社会治理总是有效么?——基于生态水利工程建设博弈分析[J].管理评论,2020,32(11):299-309.
- [18]徐鑫,倪朝辉,沈子伟,等.跨流域调水工程对水源区生态环境影响及评价指标体系研究[J].生态经济,2018,34(7):174-178.
- [19]GUO C,CHEN Y,LIU H,et al.Modelling fish communities in relation to water quality in the impounded lakes of China's South-to-North Water Diversion Project[J].Ecological Modelling,2019,397:25-35.
- [20]GUO C,CHEN Y,GOZLAN R E,et al.Patterns of fish communities and water quality in impounded lakes of

China's south-to-north water diversion project[J]. Science of the Total Environment, 2020.

[21]周盛. 基于遥感反演预测“引江济淮”对菜子湖越冬水鸟栖息地的影响[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.

[22]WOO S Y, KIM S J, LEE J W, et al. Evaluating the impact of interbasin water transfer on water quality in the recipient river basin with SWAT[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776(1):145984.

[23]KARAMOUZ M, MOJAHEDI S A, AHMADI A. Interbasin water transfer: Economic water quality-based model[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2010, 136(2):90-98.

[24]陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 等. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3):52-63.

[25]李大鸣, 张星瑞, 罗珊, 等. 渤海新区海岸带陆域环境研究III: 生态环境综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3):96-103.

[26]ZHANG Y. 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, 2019, 249, 109251.

[27]EHSAN A, ROUZBEH A, VIKRAM G, et al. An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 135:1117-1127.

[28]陈利顶, 王计平, 姜昌亮, 等. 廊道式工程建设对沿线地区景观格局的影响定量研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2):161-167.

[29]王晓岩, 马俊杰, 刘文宗, 等. 中低山区管线建设的生态环境影响与保护对策[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6):73-77.

[30]徐庭馨, 方远. 浙东山地丘陵地区天然气管道工程水土保持措施研究——以临海-仙居天然气管道工程为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1):148-150.

[31]ARIKEN M, ZHANG F, LIU K, et al. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data[J]. Ecological Indicators, 2020, 114:106331.

[32]ZHENG Z, WU Z, CHEN Y, et al. Exploration of eco-environment and urbanization changes in coastal zones: A case study in China over the past 20 years[J]. Ecological Indicators, 2020, 119:106847.

[33]FIROZJAEI K M, KIAVARZ M, HOMAEE M, et al. A novel method to quantify urban surface ecological poorness zone: A case study of several European cities[J]. Science of the Total Environment, 2020.

[34]YANG C, ZHANG C, LI Q, et al. Rapid urbanization and policy variation greatly drive ecological quality evolution in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area of China: A remote sensing perspective[J]. Ecological Indicators, 2020, 115:106373.

[35]单薇, 金晓斌, 孟宪素, 等. 基于多源遥感数据的土地整治生态环境质量动态监测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):234-

242.

[36]LI J,LIANG J,WU Y,et al.Quantitative evaluation of ecological cumulative effect in mining area using a pixel-based time series model of ecosystem service value[J].Ecological Indicators,2020,120.

[37]HU X,XU H.A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality:A case from Fuzhou City,China[J].Ecological Indicators,2018,89:11-21.

[38]李双成,赵志强,王仰麟.中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制[J].地理科学进展,2009(1):63-70.

[39]李丽,张海涛.基于BP人工神经网络的小城镇生态环境质量评价模型[J].应用生态学报,2008(12):2693-2698.

[40]黄莘绒,管卫华,陈明星,等.长三角城市群城镇化与生态环境质量优化研究[J].地理科学,2021,41(1):10.

[41]熊丽君,袁明珠,吴建强.大数据技术在生态环境领域的应用综述[J].生态环境学报,2019,28(12):2454-2463.

[42]陈玲玲,苏善真.基于成本路径的引水工程线路规划建模研究——以安徽引江济淮工程为例[J].测绘与空间地理信息,2021,44(7):59-63.

[43]PAN L,XIA H,YANG J,et al.Mapping cropping intensity in Huaihe basin using phenology algorithm,all Sentinel-2 and Landsat images in Google Earth Engine[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2021,102:102376.

[44]蔡宏,何政伟,安艳玲,等.基于遥感和GIS的赤水河水质对流域土地利用的响应研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):286-291.

[45]龚围,李丽,柳钦火,等.“一带一路”区域水电站工程生态环境影响遥感监测[J].地球信息科学学报,2020,22(7):1424-1436.3

[46]曹银贵.典型矿农城复合区土地利用格局演化与管理对策[D].武汉:中国地质大学,2015.

[47]GUO B,FANG Y,JIN X,et al.Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing:A case study of Chaohu Lake Basin,China[J].Land Use Policy,2020,95:104569.

[48]徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.

[49]徐涵秋.城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J].生态学报,2009,29(5):2456-2462.

[50]XU H,WANG M,SHI T,et al.Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI)[J].Ecological Indicators,2018,93:730-740.

[51]徐涵秋,施婷婷,王美雅,等.雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测[J].生态学报,2017,37(19):6289-6301.