

引黄济青工程沿线生态因子 1990—2020 年 时空变化特征

马吉刚¹, 汤宇婷², 张立民³, 吴忠胜⁵, 崔子腾⁴, 窦智²

(1.山东省调水工程运行维护中心 山东 济南 250000; 2.河海大学 地球科学与
工程学院 江苏 南京 211100; 3.山东省调水工程运行维护中心昌邑管理站 山东 潍坊 261000;
4.青岛引黄济青水务有限公司 山东 青岛 266000; 5.山东省调水工程运行维护中心寿光管理站 山东 潍坊 261000)

摘要: [目的] 以引黄济青工程为研究对象,探究其通水 1990—2020 年间沿线生态因子的时空变化规律,为该区生态环境的保护和治理提供依据。[方法] 采用遥感技术对土地利用/覆盖、植被指数及覆盖度、地表温度、土壤干湿度等因子 1990—2020 年的时空演变特征展开研究,深入探究工程运行后沿岸生态环境的变化。[结果] 区域内水域、绿地、建筑用地面积逐年增加,未利用土地大幅减少;1990—2020 年间地表温度呈波动变化,温度植被干旱指数由 0.758 降至 0.433,土壤湿润程度提高显著,直接促进植被的高覆盖生长,植被指数均值上升近 0.2;此外,各生态因子间互不独立,都存在一定程度相关性。[结论] 引黄济青工程沿线的生态环境质量改善效果显著,且运行期间城乡建设得到迅速发展。

关键词: 引黄济青工程; 生态环境; 环境遥感监测; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0283-07

中图分类号: P641

文献参数: 马吉刚, 汤宇婷, 张立民, 等. 引黄济青工程沿线生态因子 1990—2020 年时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2021, 42(1): 283-289. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20211014.003; Ma Jigang, Tang Yuting, Zhang Limin, et al. Spatio-temporal variation characteristics of ecological factors along Yellow River in Qingdao Water Diversion Project during 1990—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 283-289.

Spatio-temporal Variation Characteristics of Ecological Factors Along Yellow River in Qingdao Water Diversion Project During 1990—2020

Ma Jigang¹, Tang Yuting², Zhang Limin³, Wu Zhongsheng⁵, Cui Ziteng⁴, Dou Zhi²

(1. Shandong Water Transfer Project Operation and Maintenance Center, Jinan, Shandong 250000, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 3. Changyi Management Station of Shandong Water Transfer Project Operation and Maintenance Center, Weifang, Shandong 261000, China; 4. Qingdao Yellow River Water Diversion Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China; 5. Shouguang Management Station of Shandong Water Transfer Project Operation and Maintenance Center, Weifang, Shandong 261000, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal variation of ecological factors along the Yellow River in the Qingdao Water Diversion Project during 30 years of water diversion was quantified in order to provide a basis for the protection and management of the ecological environment. [Methods] Using remote sensing technology, the temporal and spatial variation of ecological factors (land use/cover, vegetation index and coverage, land surface temperature, soil moisture, and other factors) in the study area during 1990—2020 was analyzed to determine changes in the coastal ecological environment after the project operation. [Results] The areas classified as water, green land, and building land increased over time, while the area classified as unused land decreased significantly. Surface temperature fluctuated over the 30-year study period, while the temperature vegetation dryness index decreased from 0.758 to 0.433 and soil moisture increased significantly. These

收稿日期: 2021-06-11

修回日期: 2021-08-12

资助项目: 山东省调水工程运行维护中心科技项目“引黄济青调水工程典型区段地下水生态环境演变规律及其影响关键技术研究”(2019001)

第一作者: 马吉刚(1963—), 男(汉族), 山东省临邑县人, 研究员, 主要从事水利工程建设管理研究。Email: jiaoddsjzbg@163.com。

通讯作者: 汤宇婷(1997—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为地质工程。Email: 850447016@qq.com。

changes directly promoted high cover growth of vegetation. The mean value of the vegetation index increased by nearly 0.2. In addition, ecological factors were not independent of each other, and there was a certain degree of correlation. [Conclusion] The ecological environmental quality along the Water Diversion Project improved remarkably over 30 years, and urban and rural construction has rapidly developed during the project operation.

Keywords: Yellow River to Qingdao Water Diversion Project; ecological environment; environmental remote sensing monitoring; changes in time and space

跨流域调水工程区域内的生态环境变化,本质上是生物、土壤、气候、地形等生态因子的演变^[1]。因此,基于对水生态环境质量及生态因子演变的研究,有利于工程对生态影响的分析,更有助于环境问题的对症治理。遥感技术作为调水工程水生态环境研究中的重要手段,具有多空间性^[2]、多时间性^[3]、高效性^[1]。不仅能对水生态环境进行有效的实时监测,还便于展开长期动态工作,快速、准确地反映大面积水生态环境的生态质量现状及发展趋势。目前,国内外不少学者对遥感技术在调水工程中的应用作了深入的研究。包洪福^[4]以南水北调中线工程丹江口水源地为研究区,基于遥感技术对区域内水生态环境中的动植物变化规律进行了研究,探究其生物多样性。Yang等^[5]使用无人机技术结合遥感数据对南水北调工程地下水位上升引起的生物量改变和缓冲带宽度进行了安全评估。Gao等^[6]结合了 geographic information system (GIS)和 remote sensing (RS)技术,以生态系统服务价值法为手段,对江苏省东部干线水源地的生态系统服务价值进行了计算并对该地的生态补偿情况展开了进一步研究。朱长明等^[7]综合地表水、地下水等数据和多源遥感长时间序列数据,对塔里木河下游生态输水前后区域水环境变化和生态响应进行监测和分析。

引黄济青调水工程通水以来,有效缓解了青岛及沿线城市水资源供需不均的矛盾^[8]。但在其建设和运行过程中,也对沿线的水生态环境产生了一定影响^[9]。本文以工程沿线为研究区,基于遥感技术对土地利用/覆盖、植被指数及覆盖度、地表温度、土壤干湿度等生态因子的时空变化规律展开讨论,进一步探究远距离调水工程沿岸生态环境的演变规律,为沿线生态的保护和治理提供了数据支撑和科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

引黄济青工程是中国“七五”期间重要的水利工程,位于 118°07′—120°12′E, 36°22′—37°16′N 的山东半岛^[10],由山东省滨州市打渔张闸引黄河水到青岛市崂山区白沙河净水厂。该地区地势平坦,受海洋影响,属暖温带季风气候区,具有大陆性气候的明显

特征,年平均气温 12.0~12.6 °C,年平均降雨量在 600~770 mm,常年平均蒸发量在 1 000 mm 以上,且起伏变化较大。地带性土壤为典型棕色森林土,分布在缓坡地和排水良好的平地。天然植被类型为暖温带落叶阔叶林,主要树种有栎类,以麻栎居多。

调水工程线路全长 291.14 km,其中棘洪滩水库以上为水源工程,长 253.14 km,以明渠为主,水库以下为供水工程,长 38 km,以管道为主。本文以水库以上水源工程输水段为研究对象,综合考虑研究结果的代表性、准确性,建立了干渠向外左右各 2 km 的缓冲区,以此展开讨论。

1.2 数据来源

研究区范围广阔、地形复杂,适合卫星遥感进行大面积、多角度、高时效的生态环境监测。考虑到研究周期和影像精度的综合要求,最终选用 Landsat 系列影像作为初始数据。

工程通水至今已有 30 a 余,为研究其沿程生态因子的历史演变规律,选择以 4 个时期作为时间研究对象,分别是 1990, 2000, 2010, 2020 年。此外,考虑到春夏两季植被生长旺盛,识别度高,而夏季云层覆盖度广,可见度低等多种因素,最终选择了 5, 6 月日期较接近的八景影像进行数据的处理和分析,具体影像资料见表 1。

表 1 研究区遥感影像基本信息

传感器	时间	条带号	行号
TM	19900609	120	35
TM	19900616	121	34
TM	20000519	120	35
TM	20000611	121	34
TM	20100515	120	35
TM	20100607	121	34
OLI	20200510	120	35
OLI	20200501	121	34

为解决光学遥感数据获取时的误差问题,需先对下载好的影像进行预处理,包括了辐射定标和大气校正过程。其中辐射定标是为了消除传感器本身误差,大气校正是为了消除大气散射、吸收、反射引起的误差^[11]。校正后的影像再根据研究区的范围进行裁剪和镶嵌处理。

2 研究方法

2.1 技术路线

将研究区按地级市范围划分为 4 个区段,分别为滨州市、东营市、潍坊市及青岛市区段,基于生态遥感监测技术,选择了土地利用/覆盖、植被指数及覆盖度、地表温度、土壤干湿度等生态因子,探究其时空演变规律,讨论工程运行后沿线生态环境的变化。

2.2 土地利用/覆盖的量化

土地利用/覆盖中绿地、水域、建筑用地、裸地面积的提取,是在遥感影像经过预处理的基础上,利用 ENVI 软件中监督分类的方式进行划分的^[12],结合影像和地图对分类样本进行多次调整直至样本间具有较好的可分离性。分离器的选择也是同时对比了多种分离试验结果,最终选择了支持向量机法进行分类。分类结果再以高分辨率的影像作为参照,对混淆部分进行人工目视解译,解决同物异谱或异物同谱带来的误差问题^[13],最后利用 ENVI 软件中的混淆矩阵精度评价法进行验证,并对比“地理国情监测云平台”(http://www.dsac.cn/)相关数据产品,分类结果的精度达到 80% 以上。

2.3 植被的量化

植被的量化采用的是 NDVI 指数法^[14],通常反映植被覆盖、生长等信息,其计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中: NIR 为近红外波段的反射率; R 为红波段的反射率。

在现有 NDVI 值的基础上,进一步分析植被的覆盖情况,这里采用了像元二分法^[15]计算得到植被覆盖度 P_V ^[16],其具体计算模型如下:

$$P_V = \frac{NDVI - NDVI_{Soil}}{NDVI_{Veg} - NDVI_{Soil}} \quad (2)$$

式中: P_V 为植被覆盖度; NDVI 为植被指数; $NDVI_{Soil}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{Veg}$ 为完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值。

2.4 地表温度的量化

本文采用大气校正法^[17](辐射传输方程)进行地表温度的反演,其本质是通过消除大气对地表热辐射的影响误差,将得到的地表热辐射强度转化为相应的地表温度。卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 由 3 部分组成: ①大气向上辐射亮度; ②地面的真实辐射亮度经过大气层后到达卫星传感器的能量; ③大气向下辐射到达地面反射的能量,其计算公式如下:

$$L_\lambda = [\epsilon B(T_s) + (1 - \epsilon)L \downarrow] \tau + L \uparrow \quad (3)$$

式中: ϵ 为地表比辐射率; T_s 为地表真实温度(K); $B(T_s)$ 为黑体热辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过率; $L \downarrow$ 为大气下行辐射亮度; $L \uparrow$ 为大气上行辐射亮度。则温度为 T 的黑体的辐射亮度 $B(T_s)$ 可表示为:

$$B(T_s) = \frac{L_\lambda - L \uparrow - \tau(1 - \epsilon)L \downarrow}{\tau \epsilon} \quad (4)$$

式中: $\tau, L \uparrow, L \downarrow$ 参数可在 NASA 提供的网站上 (http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/) 通过提供时间、经纬度等数据信息进行获取。而地表比辐射率 ϵ 则采用 NDVI 阈值法计算,公式如下:

$$\epsilon = 0.004 P_V + 0.986 \quad (5)$$

获得所需数据参数后,利用普朗克公式计算得到地表真实温度 T_s ,具体公式如下:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right]} \quad (6)$$

式中: K_1, K_2 为定标系数,可通过影像的元数据获取。

结合沿线滨州、东营、潍坊、青岛市气象站点收集到的实测均温数据,对地表温度的反演结果进行验证,结果显示两者波动变化一致,说明方法具有可行性。

2.5 土壤干湿度的量化

土壤干湿度的量化方法选用的是 NDVI 即温度植被干旱指数法^[18],其原理是在光学与热红外遥感通道数据的基础上反演植被覆盖土层表面的水分情况,本质是结合归一化植被指数(NDVI)和地表温度(T_s)两个参数,构建 T_s -NDVI 特征空间,其公式表示为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (7)$$

式中: T_s 为地表温度值; T_{smin} 为 NDVI 相同值所对应的最低地表温度值,为 T_s -NDVI 特征空间的湿边; T_{smax} 为 NDVI 相同值所对应的最高地表温度,为特征空间的干边。根据像元构造的特征空间,同时对干边和湿边进行线性拟合,其方程为:

$$T_{smax} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (8)$$

$$T_{smin} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (9)$$

式中: a_1, b_1 为干边拟合方程的系数; a_2, b_2 为湿边拟合方程的系数。如此 TVDI 指数的计算方法可以进一步转化为:

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \times NDVI)}{(a_1 + b_1 \times NDVI) - (a_2 + b_2 \times NDVI)} \quad (10)$$

TVDI 的值在 0—1 之间,干边对应的 TVDI 值为 1,湿边对应的 TVDI 值为 0,TVDI 的值越趋向于 0,土壤的湿润度越高,反之,土壤的湿润度越低。

3 结果与分析

3.1 土地利用/覆盖

基于监督分类和目视解译结合的方法将研究区

内土地分为了:绿地、水域、建筑用地、裸地 4 大类。其中,绿地包括了林地、草地、耕地等;水域涵盖了江、河、湖、渠等;建筑用地指城乡住宅、公共用地等;裸地一般为无植被生长的未利用土地,总体空间分布见图 1。为探究各地类的变化规律,进一步统计了 1990,2000,2010,2020 年各类土地利用/覆盖信息的面积及比例情况如表 2。

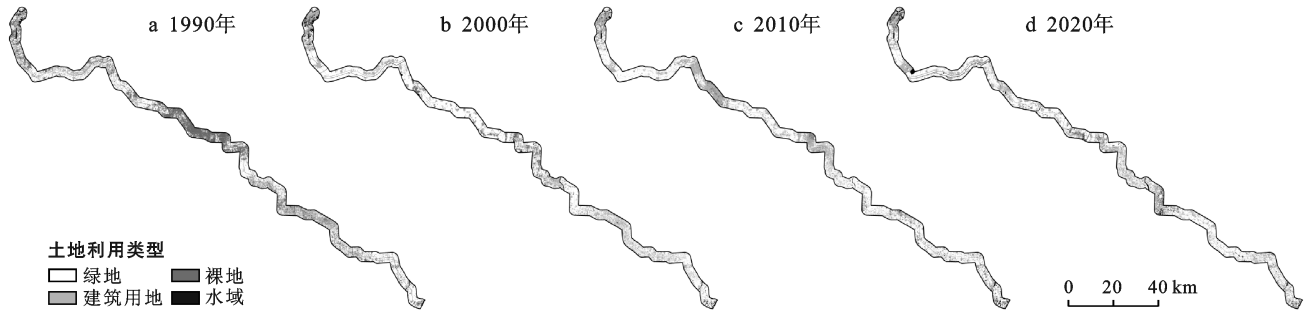


图 1 研究区 1990,2000,2010,2020 年土地利用分类

表 2 研究区土地利用分类面积及比例统计

土地利用类型	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
绿地	578.60	54.39	639.03	60.07	649.32	61.04	652.25	61.32
裸地	314.03	29.52	98.36	9.25	58.79	5.53	27.77	2.61
建筑用地	133.26	12.53	286.80	26.96	305.32	28.70	328.70	30.90
水域	37.86	3.56	39.56	3.72	50.32	4.73	55.04	5.17
总面积	1 063.75	100.00	1 063.75	100.00	1 063.75	100.00	1 063.75	100.00

由图 1 可知,在时间维度上,1990 年研究区内土地结构以绿地和裸地为主,建筑用地较少,水域地区更为稀缺,说明工程沿线土地资源丰富,但城镇化水平较低,城市基础设施建设较落后。1990—2010 年期间,绿地面积变化幅度不大,相比之下建筑用地面积增势明显,同时裸地区域也在以肉眼可见的速度减少。2020 年区域内地类主要以绿地和建筑用地为主,裸地区域被大面积开垦利用,可见当地城市化建设发展迅速。

在空间维度上,按研究区内 4 个地级市区段划分并对各区段地类进行统计,进一步分析得到滨州和青岛区段的水域面积较其他区段相对较大。可能受其地理位置的影响,滨州地处引黄济青工程黄河入水口,而青岛东、南濒临黄海,带来的河湖水源较充足。同时,水源和地理的优势也使得青岛区段的耕地、林地、草地发展的较好,其绿地面积比例在 4 个区段中一直都居于前列。建筑用地区域在 4 个区段中区别并不大,说明研究区内各地区城镇化发展

相对较为均衡。

从表 2 数据分析,1990—2020 年,绿地面积比例共增长 6.93%,长期占据研究区内一半以上土地;建筑用地面积比例增加 18.37%,尤其以 1990—2000 年增势明显,增幅近 15%。由此可见,这 10 a 的城镇化发展效果显著。相比之下水域面积增加并不明显(30 a 间面积增长 17.18 km²),增幅 1.61%,大部分河流湖泊位于滨州和青岛地段,主要受黄河和黄海影响。当然调水工程作为沿线重要的生态纽带也会直接促进水资源面积的增长。此外,城市的发展离不开城乡建设,工程运行以来,大面积的未利用土地被开垦翻新以开展房屋、基础设施建设,相对的裸土地区域大幅缩减,占总面积比例降低近 27%,现阶段研究区内仅有 2.61% 的区域为裸土区。

3.2 植被指数及覆盖度

3.2.1 植被指数 植被指数的值一般在[-1,1]区间,通常植被长势越好、覆盖程度越高对应的指数越高。整个研究区的 NDVI 空间分布见图 2。

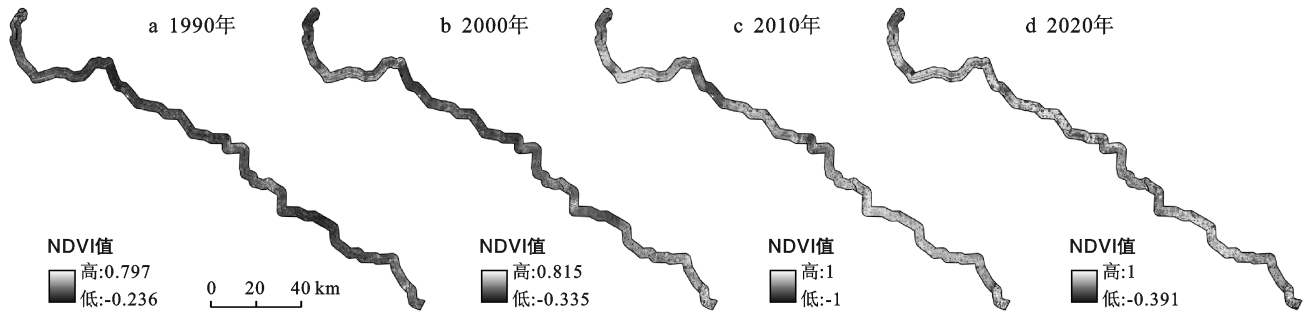


图 2 研究区 1990, 2000, 2010, 2020 年 NDVI 空间分布特征

利用均值法统计了不同时间研究区各地市级区段的平均 NDVI 指数(如图 3 所示)。引黄济青工程沿线各个时期的 NDVI 均值分别为 0.296 2, 0.335 7, 0.430 1, 0.487 4。从整体变化趋势来看,指数呈现不断上升趋势。在 1990 年植被指数处于较低的状态,说明当时的研究区内植被生长并不茂盛,植被的覆盖率也比较低。经过 30a 多的发展,植被指数均值增加了近 0.2,增势明显,可见当地的生态发展进步显著。

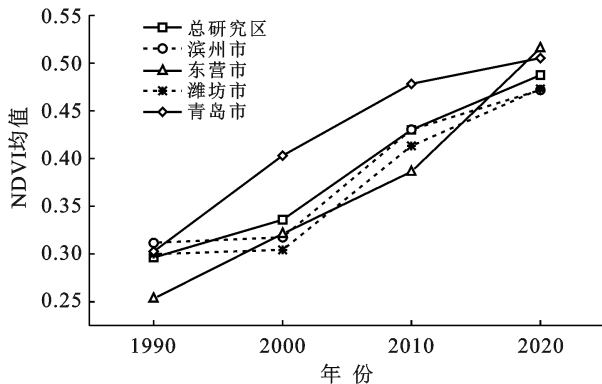


图 3 总研究区及各地级市区段 NDVI 均值变化趋势

通过对图 3 的进一步分析,发现各地市级区段的 NDVI 均值变化趋势与沿线总趋势基本保持一致。其中,青岛区段的均值变化较为显著,大体上都高于其他地区,前文曾提及青岛区段中的水域面积也居于前列,而水资源对于植被作物的生长不可或缺。加之青岛市地理位置优越,气候适宜,对草木的生长和农作物的培育更是十分有益。此外,可以看到在 1990 年,滨州、潍坊、青岛 3 区段的 NDVI 均值几乎接近,而东营区段的植被指数却远低于 3 者,说明当时东营区段内虽然耕地、林地、草地的占地面积不少,但植被的茂密程度相对于其他区域较弱。到了 2020 年,4 地市级区段的植被指数均值都相接近,可见当下研究区各地的生态发展均衡且逐渐趋于稳定。

3.2.2 植被覆盖度 植被覆盖度相较于植被指数,是更能衡量地表植被覆盖状况的重要指标,实际研究中常将两者结合起来反映植被的生长情况。植被覆盖度

的计算值在 0~1 之间,根据阈值范围和研究区植被覆盖特点将其分为 5 个等级,具体分级和各覆盖度面积比例统计情况见表 3。

表 3 研究区各级植被覆盖度比例统计 %

植被覆盖度分级	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
0~0.3 低植被覆盖	36.81	26.46	14.61	16.52
0.3~0.45 中低植被覆盖	45.57	35.75	14.31	12.92
0.45~0.6 中植被覆盖	11.84	17.92	19.21	12.33
0.6~0.75 中高植被覆盖	3.70	10.56	20.86	12.35
0.75~1 高植被覆盖	2.08	9.31	31.01	45.89

据表 3 可知,1990 年引黄济青工程沿线面积的 45.57% 为中低植被覆盖程度区域,低植被覆盖程度区域次之,比例约 36.91%,高植被覆盖程度区域比例最小,仅有 2.08%,总体植被覆盖程度以低、中低覆盖为主。2000 年,研究区内低、中低覆盖区域比例较 1990 年下降了约 20%,中高植被覆盖区域相对增多,但总体覆盖程度仍以低、中低植被覆盖度为主。2000—2010 年间,区域内的植被发育较好,覆盖度等级也发生了变化,由原先的以中低植被覆盖为主转变为以中高植被覆盖为主,其中高植被区域比例约 31.01%,处于遥遥领先地位,相比之下其他覆盖等级相对均衡。现阶段,研究区已完全以高植被覆盖区域为主,且所占面积近总区域的一半。与前文中土地利用分类和植被指数的解译结果一致,说明研究区内的植被不仅区域在增加,长势也越来越茂盛。

3.3 地表温度

利用大气校正法得到的 1990—2020 年研究区内总体温度分布情况(如图 4 所示)。为了更清晰的研究其空间分布和变化趋势,最终根据其值域范围将地表温度值划分为为了 6 个区间,分别为低于 20, 20~25, 25~30, 30~35, 36~40 °C, 高于 40 °C。

对各区域的地表温度均值进行统计(见图 5)。从图 5 地温均值变化趋势可知,4 个时期研究区地表温度均值分别为 30.263, 33.825, 31.909, 34.865 °C,整体上呈现波动式变化。从滨州、东营、潍坊、青岛 4 市区段的地温变化来看,与总体的波动变化趋势大体

一致。其中,平均温度最低的地区通常为青岛区段。原因在于,青岛临靠黄海,受季风性和海洋性气候共同作用。夏季温湿多雨,但无酷暑,较其他地区温度

相对低;冬季风大温和,且持续时间较长。相比之下,潍坊市、东营市、滨州市区段地理较为内陆,受海洋性气候影响小,因此地表温度表现的比青岛区段高。

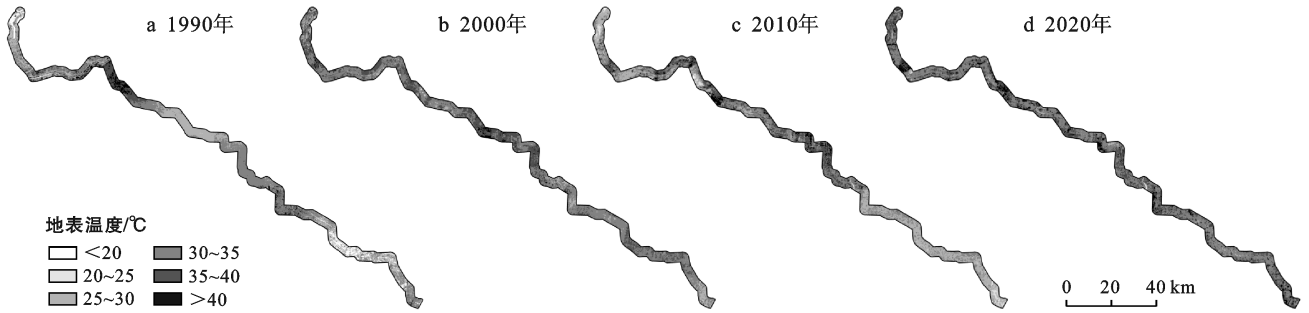


图 4 研究区地表温度空间分布

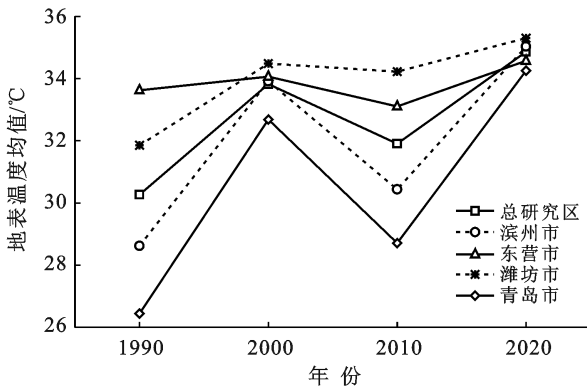


图 5 总研究区及各地级市区段地表温度均值变化趋势

结合土地分类结果,发现地表温度值在空间分布上也有一定的差异性,水域地区温度最低,大多处于10~25 °C区间内。植被的蒸腾对温度也有一定的降低作用,使得研究区内农田、林地、草地的地温都在25~35 °C之间。而其余的建筑用地和裸地区域受太阳直射,较为炎热干燥,因此温度大都在35 °C以上。

3.4 土壤干湿度

利用温度植被指数公式可以得到1990—2020年研究区总体土壤干湿度(即 TVDI 指数)的空间分布(图6)。如图6所示,1990,2000,2010,2020年研究区内的 TVDI 均值分别表现为 0.758, 0.694, 0.568, 0.433, 由于 TVDI 指数的值与土壤湿度呈负相关,因此区域内的土壤呈现越来越湿润的状态。

图7统计了1990—2020年研究区和各地级市区段土壤干湿度均值的变化趋势,分析可知,滨州、东营、潍坊、青岛市区段的 TVDI 均值变化呈现和总区域相同的下降趋势,即土壤湿润度越来越高。其中,青岛区段的土壤湿润度最高,滨州次之,潍坊、东营区段相对于沿海的青海和与黄河接壤的滨州,土壤都较为干旱。1990年,东营区段的 TVDI 指数高达0.866,土壤湿润程度远低于其他3区段,可能受到了水域、温度、降雨等多方面因素的影响,由于土壤的干湿性对于植被的生长有很大的作用,因此这也在另一方面解释了同年该区段内 NDVI 指数值不高的原因。

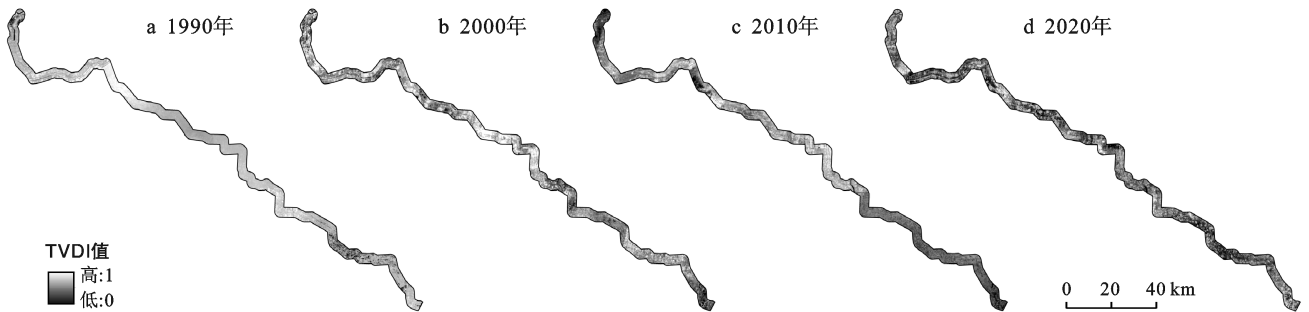


图 6 研究区 TVDI 空间分布

现阶段,研究区内的土壤干湿程度已相对均衡,各地级市区段的平均 TVDI 指数值保持在 0.39~0.45 的区间内。

4 结论

本文以引黄济青工程输水段沿线为研究区,采用

遥感技术对生态因子的时空分布特征进行探究,得出结论如下。

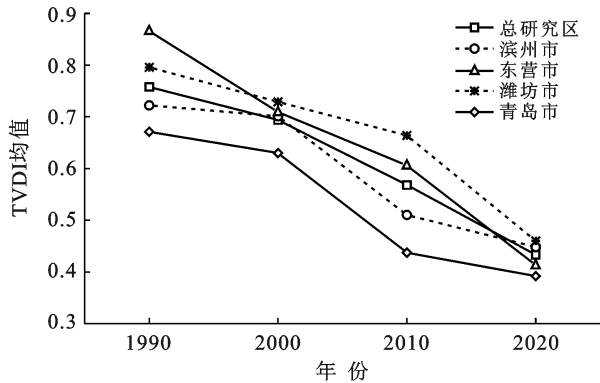


图 7 总研究区及各地级市区段 TVDI 均值变化趋势

(1) 研究区生态环境质量改善明显,城镇化水平发展迅速。30 a 间,水域面积比例增长 1.61%,绿地面积比例增长 6.93%,裸地面积比例由 29.52% 缩减至 2.61%,多用以建设基础设施和发展生态、农业等。此外,各地级市区段土地结构变化与研究区总趋势大致相同。

(2) 研究区内土壤湿润度及植被覆盖度显著提升,且现阶段发展趋于均衡。工程运行期间,土壤含水量增加,直接促进着区域内植被的繁茂生长及覆盖程度的大幅提高。其中,青岛区段植被生长状况最好,土壤也最湿润。

(3) 各生态因子间彼此不独立。温度的波动性、水域面积的增加、土壤的湿润程度必然都影响着植被的生长,而植被的生长又促使着绿地面积的增加和裸土区域的利用,说明因子间存在一定程度上的相关性。

(4) 利用遥感技术研究较大区域的生态变化规律是一种可行、实用、便捷的方法,可以推广应用于类似研究和实践。

[参 考 文 献]

[1] Wang Kuifeng. Evolution of Yellow River Delta coastline based on remote sensing from 1976 to 2014, China [J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(2): 181-191.

[2] Fei Weicheng, Zhao Shuqing. Urban land expansion in China's six megacities from 1978 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019, 664: 60-71.

[3] Antunes R R, Blaschke T, Tiede D, et al. Proof of concept of a novel cloud computing approach for object-based remote sensing data analysis and classification [J]. GIScience & Remote Sensing, 2019, 56(4): 536-553.

[4] 包洪福.南水北调中线工程对丹江口库区生物多样性的影响分析[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2013.

[5] Yang Shengtian, Bai Juan, Zhao Changsen, et al. The assessment of the changes of biomass and riparian buffer width in the terminal reservoir under the impact of the South-to-North Water Diversion Project in China [J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 932-943.

[6] Gao Xin, Shen Juqin, He Weijun, et al. Changes in ecosystem services value and establishment of watershed ecological compensation standards [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(16): 2951.

[7] 朱长明,李均力,沈占锋,等.塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析[J].地球信息科学学报,2019, 21(3): 437-444.

[8] 孙杰豪.胶东调水工程输水效率与水资源优化调度研究[D].山东 济南:山东大学,2020.

[9] 黄泽钧.调水工程对环境的影响分析[J].水科学与工程技术,2011(6): 27-29.

[10] 周婕.基于 AHP 的山东省农业适度规模效益测度[J].中国农业资源与区划,2019, 40(1): 68-73.

[11] 张泽民,吕昌河,谢苗苗,等.基于 WorldView 2 影像的矿区植被重建效果评估[J].生态学报,2018, 38(4): 1301-1310.

[12] Babykalpana Y, Dr T K. Supervised/Unsupervised classification of LULC using remotely sensed data for Coimbatore City, India [J]. International Journal of Computer Applications, 2010(7): 26-30.

[13] 范树平,程从坤,刘友兆,等.中国土地利用/土地覆盖研究综述与展望[J].地域研究与开发,2017, 36(2): 94-101.

[14] Wiegand C L, Richardson A J, Nixon P R. Spectral components analysis: A bridge between spectral observations and agrometeorological crop models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE-24(1): 83-89.

[15] 孟沌超,赵静,兰玉彬,等.基于像元二分法的冬小麦植被覆盖度提取模型[J].华南农业大学学报,2020, 41(3): 126-132.

[16] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].自然资源学报,2018, 33(12): 2084-2097.

[17] Coll C, Galve J M, Niclòs R, et al. Angular variations of brightness surface temperatures derived from dual-view measurements of the Advanced Along-Track Scanning Radiometer using a new single band atmospheric correction method [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 223: 274-290.

[18] 沙莎,郭锐,李耀辉,等.温度植被干旱指数(TVDI)在陇东土壤水分监测中的适用性[J].中国沙漠,2017, 37(1): 132-139.