引文格式：马丹,赵英英,吴红波. 近50年阿牙克库木湖水域面积及湖岸线变化[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 55-59. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.014

近50年阿牙克库木湖水域面积及湖岸线变化

马　丹[1]，赵英英[1]，吴红波[1,2,3*]
（1. 陕西理工大学 地理科学系，陕西 汉中 723000；2. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；
3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心，北京 100101）

摘　要：为了分析内陆湖泊水域面积和湖岸线的空间形态变化特征，基于Landsat MSS/TM/ETM/OLI影像，利用归一化水体指数提取1972—2022年阿牙克库木湖水域面积和湖岸线，重建湖区面积日值和年均变化曲线，并分析湖岸线变化的时空差异特征。结果表明：1972—2022年间阿牙克库木湖的水域面积呈扩张趋势；与1972年的湖区水域平均面积493.5 km²相比，2022年阿牙克库木湖水域平均面积为1 104.0 km²，湖区水域面积增加了610.5 km²。1971—2000年间阿牙克库木湖岸线和湖区水域面积缓慢增加，2000—2022年间阿牙克库木湖湖区东部和南部岸线快速增长。湖岸线长度与湖区水域面积、发育系数和复杂程度呈正比，与湖岸线的圆形度呈反比。与1972年湖区质心位置相比，2022年阿牙克库木湖的质心位置向东南移动了11.37 km。

关键词：湖泊测量；湖岸线；湖泊面积；空间特征
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0055-05

Lake Water Area and Shoreline Changes of Ayakkum Lake in Recent 50 Years

MA Dan[1], ZHAO Yingying[1], WU Hongbo[1,2,3]
(1. Department of Geographical Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;
2. Shaanxi Key of Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to analyze the spatial morphological variations of inland lake water area and shoreline, based on the Landsat MSS/TM/ETM/OLI images from 1972 to 2022, we used normalized difference water index (NDWI) to extract the lake water area and shoreline of Ayakkum Lake, reconstructed the time series of daily and annual lake water area, and analyzed the spatio-temporal differences of lake shoreline. The results showed that the water area of Ayakkum Lake had been expanding trend from 1972 to 2022. Compared to the average annual lake water area of 493.5 km² in 1972, the average annual lake water area of Ayakkum Lake was 1 104.0 km2 in 2022, the water area had increased by 610.5 km2. The shoreline length and lake water area of Ayakkum Lake slowly increased from 1971 to 2000, while the eastern and southern shorelines increased rapidly from 2000 to 2022. The length of lake shoreline was directly proportional to the water area, shoreline development index and complexity of the lake shoreline, and was inversely proportional to the circularity of lake shoreline. Compared with the centroid location on lake water area in 1972, the centroid had moved by 11.37 km to the southeast edge in 2022.

Key words: lake survey, lake shoreline, lake water area, spatial feature

湖泊作为全球陆地水文循环的重要组成部分和场所[1]，是连接大气圈、生物圈、水圈、土壤圈等自然要素的综合体。湖泊水域面积、湖岸线的扩张与萎缩直接反映出地区气候环境和人类活动的状态，影响着周边区域的生态环境[2]。在全球气候变暖的背景下，地处偏远且人类干扰较少的高原湖泊对气候变化的过程十分敏感[3]，能够指示某一区域的降水、蒸发、温度和湿度等气象要素的变化趋势。因而，高山内陆型湖泊经常作为气候变化的重要指示对象，逐渐受到研究人员的广泛关注。

近几十年来，山区降水和冰川融化变化，使得中国西部湖泊的水量和面积都发生了显著波动，收缩和扩张周期性交替，但总体已经呈扩张趋势[4]。流域降水量的增加直接驱动1995—2015年阿牙克库木湖水量增加[5]，其中山地冰川、积雪融水的贡献也不可忽视[6]。近年来，卫星遥感数据已成为监测较大空间尺度的湖泊水域面积变化的重要数据源。白瑞东[7]等利用NDWI（normalized difference water index）方法和

收稿日期：2023-04-12。
项目来源：国家自然科学基金重点资助项目（42130516）；国家自然科学基金青年基金资助项目（41601067）。
第一作者简介：马　丹（2002—），本科，研究方向为地理信息技术应用，E-mail：908616068@qq.com。
通信作者：吴红波（1984—），博士，副教授，硕士生导师，研究方向为卫星测高和地理信息技术应用，E-mail：wuhongbo12366@sina.com。

2000—2011年的MODIS影像，提取出新疆地区水域面积大于100 km²的11个湖泊信息，发现阿牙克库木湖面积正在扩张；李均力[8]等采用1964—2015年长时间序列遥感数据分析阿牙克库木湖湖泊变化的季节性和年际特征；张文春[9]等利用Landsat卫星影像，发现阿牙克库木湖在1976—2019年间湖泊水域面积处于扩张状态，并且结合1980—2015年降水和气温数据的相关性分析，得出年均湖泊水域面积与年降水量和年均气温均呈正相关。以上所列文献参考数据时间较早，并且目前国内外有关于阿牙克库木湖的水域面积、水位变化及湖岸线等研究成果报道较少。新一代Landsat9卫星的成功发射在海岸线监测、气侯变化、极地与冰川监测、水资源研究等方面发挥重要作用[10]。为了获取阿牙克库木湖水域面积和湖岸线的变化特征，文中基于Landsat MSS/TM/ETM/OLI等影像，利用归一化水体指数NDWI，提取1972—2022年阿牙克库木湖水域面积和湖岸线，构建湖泊水域面积变化曲线，分析不同时段的湖岸线空间形态变化特征。阿牙克库木湖水域面积与湖岸线空间形态变化特征分析，有助于探究阿牙克库木湖水域的演化规律，也对湖岸线管理、冻土层退化对岸线变化的作用、野生动物栖息地管理、水域生态环境问题分析提供技术参考。

1 研究区概况与实验数据

1.1 研究区概况

阿牙克库木湖位于新疆维吾尔自治区若羌县境内，89°01′05″~89°40′30″E，37°22′30″~37°30′40″N。湖区南北宽约18 km，东西长约75 km，集水面积19 280.0 km²。湖泊水量补给主要源于山区降水、冰雪融水和冻土层水分释放，流域内依协克帕提河、色斯克亚河、库木开日河、皮提勒克河等河流汇入湖区。根据2017年7月发布RGI 6.0（Randolph Glacier Inventory 6.0）冰川编目数据显示，流域内发育的山地冰川有480条[11]，冰川面积为329.59 km²。

1.2 Landsat陆地卫星影像

1972年10月3日至2022年12月30日期间，阿牙克库木湖湖区无积雪、无云的Landsat卫星影像共计490幅，其中MSS影像19幅，TM影像280幅，ETM影像28幅，OLI影像163幅；Landsat卫星影像可从USGS Earth Explorer官网 https://earthexplorer.usgs.gov/下载。

1.3 Hydroweb数据

Hydroweb数据来源于法国LEGOS/CTOH（Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale / Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere）共建的数据中心平台 https://www.theia-land.fr/en/hydroweb/，记录了全球150余个湖泊和水库的水位和面积信息。其中，1995年6月29日至2022年6月22日阿牙克库木湖水域面积日值变化序列用于Landsat卫星影像中提取的水域面积的对比分析。

2 研究方法

2.1 湖泊水域面积提取

虑到湖泊水体像元的分类精度受云量大小、水汽含量和气溶胶厚度等因素干扰，Landsat卫星影像的绿色和近红外波段的预处理包括辐射校正、几何校正、定义投影、剪裁[11]。辐射校正通过绝对辐射定标完成，建立像元亮度与实际辐射值的数学关系，获取目标地表辐射量，得到大气顶层的辐射亮度 L_φ。

$$L_\varphi = K \times DN + C \tag{1}$$

式中，L_φ 为绿色或者近红外波段 φ 的辐射亮度值；K 和 C 分别为增益量和偏移量；DN 为像元亮度值。

Mcfeeters提出的归一化水体指数NDWI是基于绿色波段与近红外波段的归一化比值指数[12]，广泛地用于提取湖泊、河流、水库、沼泽等地表水体像元。归一化水体指数 ρ_{NDWI} 计算式为：

$$\rho_{\mathrm{NDWI}} = \frac{r_{\mathrm{green}} - r_{\mathrm{nir}}}{r_{\mathrm{green}} + r_{\mathrm{nir}}} \tag{2}$$

式中，r_{green} 为MSS的绿色波段即第4波段的反射率；TM/ETM的绿色波段即第2波段的反射率；OLI的绿色波段即第3波段的反射率；r_{nir} 为MSS的近红外波段即第6波段的反射率，TM/ETM的近红外波段即第4波段的反射率，OLI的近红外波段即第5波段的反射率。

2.2 湖岸线的形态分析方法

湖岸线可简单地定义为湖泊水体和陆地之间的可变线，其空间形态结构是动态的[13]，与河流入湖水量、降水量、蒸发量、湖盆有关。湖泊水域面积与湖岸线长度是湖泊形态的基础指标，表征着湖泊的区域范围、水位和水量等特征[14]。基于湖泊面积与湖岸线长度能够计算出湖泊其他形态特征指标的数值，可以更加具体地量化湖泊形态变化。

1）岸线发育系数（shoreline development index，SDI）。P_{SDI} 是用来评估湖岸线不规则程度的指标[15]，其值越大，表明湖岸线越曲折。发育系数 P_{SDI} 计算式为：

$$P_{SDI}=\frac{L}{2\sqrt{\pi\times S}} \tag{3}$$

式中，L 为湖岸线长度；S 为湖泊水域面积。

2）岸线的圆形度 P_R。圆形度是用来描述岸线的形状与圆形接近程度的指标，P_R 的取值范围为0~1，值越大，则说明湖泊岸线的形态越接近圆形。圆形度 P_R 计算式为：

$$P_R=\frac{4\pi S}{L^2} \tag{4}$$

3）湖泊形状复杂程度 P_e。湖岸线的形状复杂程度用离散数值 P_e 表示，数值越大，形状越复杂；数值越小，形状则越简单。湖泊形状的复杂程度 P_e 计算式为[15]：

$$P_e=\frac{L^2}{S} \tag{5}$$

4）湖泊水域质心。湖泊水域质心指在二维平面上湖泊水域形状的质量中心[16]。湖区水域可视为不规则多边形，将不规则多边形分割为多个三角形，通过计算每个三角形的面积得出多边形的总面积。那么，湖泊水域质心的经度 C_x 和纬度 C_y 计算式为：

$$C_x=\frac{\sum C_{ix}\times A_i}{\sum A_i},\quad C_y=\frac{\sum C_{iy}\times A_i}{\sum A_i} \tag{6}$$

湖区多边形 X 被分割为 i 个简单三角形 $X_1,X_2,\cdots,X_i$，每个简单三角形的重心点为 C_i，任一简单三角形面积为 A_i，那么湖区多边形的质心点坐标为（C_x，C_y）。每个三角形的重心（x，y）计算式为[17]：

$$x=\frac{(x_1x_2x_3)}{3},\quad y=\frac{(y_1y_2y_3)}{3} \tag{7}$$

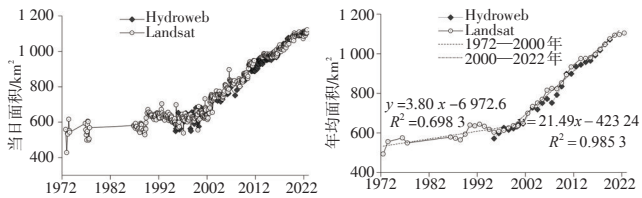
式中，C_x 为湖区质心的经度；C_y 为湖区质心的纬度；x 为简单三角形的经度；y 为简单三角形的纬度。每年的湖区质心坐标点（C_x，C_y）投影在平面坐标上，用矢量线段连接各个质心点，构成湖泊质心的移动轨迹的变化图。

3　结果与讨论

3.1　湖泊水域面积的日变化和年变化

基于Hydroweb和Landsat卫星影像提取湖泊水域当日面积和年均面积，见图1a和1b；由图1a可知，1972—2022年间阿牙克库木湖水域面积整体上呈增长趋势，尤其是2000年以来湖泊面积急剧扩张；1972—2000年阿牙克库木湖水域面积呈“增加－减少－增加”变化，其中1972—1986年间湖泊水域面积略有增加，增加了139.5 km²；1986—1988年间水域面积呈萎缩状态，减少了14.2 km²；1988—2000年湖泊水域面积呈扩张趋势，增加了74.7 km²。总体上，1972—2000年间湖泊水域日均面积增加缓慢；2000—2022年间阿牙克库木湖水域面积快速增长，流域受气候暖湿化和冰雪融水增加影响显著。

由图1b可知，阿牙克库木湖水域的年均面积从1972年的493.5 km²，增加到2000年平均面积的636.4 km²，年均湖泊水域面积增加了142.9 km²；2000—2022年间，阿牙克库木湖面积迅速增长，湖泊水域年均面积增加了467.6 km²。与1972年年均水域面积相比，2022年阿牙克库木湖年均水域面积为1 104.0 km²，水域面积增加了610.5 km²，湖泊水域面积的增加速率为22.1 km²/a。2020年以来，阿牙克库木湖水域面积仍会持续增加。



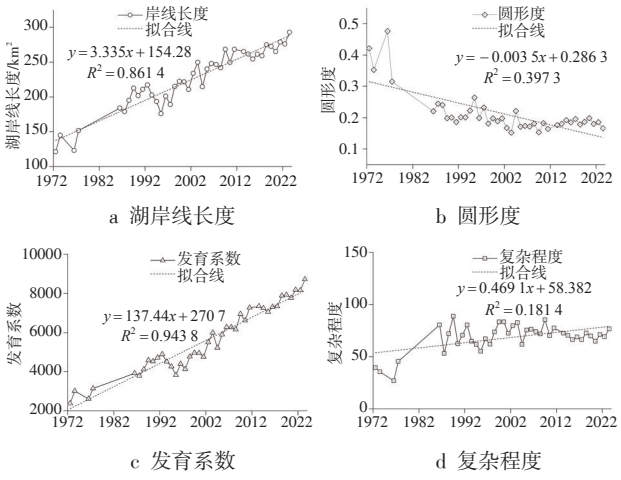
a 当日水域面积　　b 年均水域面积

图1　1972—2022年阿牙克库木湖湖泊水域面积变化曲线

3.2　湖岸线变化分析

3.2.1　湖泊水域形态变化特征

湖泊水域空间形态会随着时间变化而变化，除了湖泊水域面积指标，文中描述了阿牙克库木湖沿岸轮廓随着时间变化的指标，如湖岸线长度、发育系数、圆形度、复杂程度等指标，见图2a、b、c、d。由图2a可知，湖岸线长度与湖泊水域面积呈正比，随着水域面积的增加，湖岸线的长度变长。1972—2022年间湖岸线长度呈增加趋势，净增长了142.52 km，且湖泊水域面积与湖岸线长度、发育系数、圆形度、复杂程度的简单相关系数分别为0.811、0.946、−0.388、0.244，通过 $p=0.01$ 相关性显著检验；由图2b可知，1972—2022年间阿牙克库木湖水域的圆形度与湖岸线长度呈反比，圆形度从1972年的0.42下降至2022年的0.20；由图2c可知，随着湖泊水域面积的增加，湖岸线的发育系数也增加；1972—2022年间，阿牙克库木湖水域以不规则的形态向外扩张，导致湖岸线变得细碎，岸线长度增长，湖岸线发育系数与形状复杂度增大，圆形度下降。由图2d可知，湖岸线的复杂程度与湖泊面积、湖岸线长度和发育系数呈正相关，随着湖泊水域面积增加，湖岸线的复杂程度也会向着不规则的方向的扩张和演化。



a 湖岸线长度　　b 圆形度

c 发育系数　　d 复杂程度

图2　1972—2022年阿牙克库木湖岸线年均形态变化

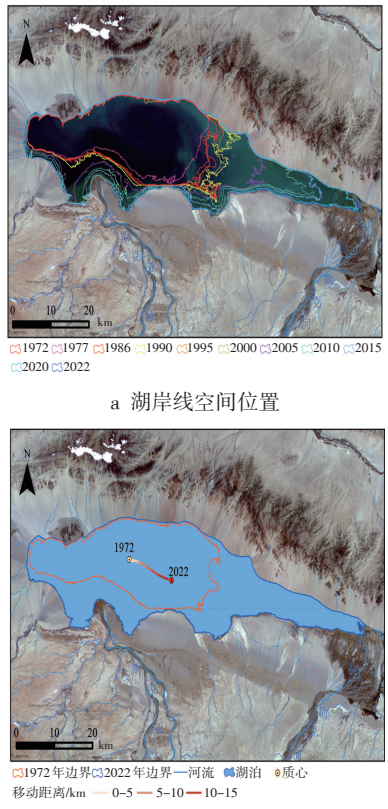
3.2.2　湖岸线空间位置和质心变化

为了更直观地描述和对比湖岸线的范围和质心位置变化情况，选取1972、1977、1986、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020、2022年的湖岸线叠加在2022年7月23日Landsat 8卫星OLI真彩色影像上，见图3。由图3可知，阿牙克库木湖岸线发育主要体现在西部、南部、东部水域，东部水域岸线变化较为显著，其次是南部和西部区域，而北部水域的湖岸线变化不明显。1972—1977年间湖泊水域扩张不明显，湖岸线复杂程度较低；1977—1995年间湖泊水域面积开始扩张，岸线的复杂程度和发育系数变大；1995—2000年间湖泊水域面积略有萎缩，湖岸线回落至湖盆内部；2000—2022年间湖泊水域面积扩张速度较快，湖岸线复杂程度增加，并在几何形态上由近似椭圆的湖盆演化为东西狭长的条形湖盆，而且湖岸线变得复杂细碎。与1972年湖岸线的位置相比，2022年阿牙克库木湖东部水域的岸线位置向东移动的最大距离为39.65 km，南部水域的岸线向南移动的最大距离为9.29 km。

借助GIS软件计算出湖泊水域多边形的质心经度和纬度，按照Landsat卫星过境时间绘制出阿牙克库木湖湖区质心的移动轨迹，阿牙克库木湖的湖区质心位置在1972—2022年间由西北向东南方向移动，其中1972—2000年间的移动速度较为缓慢，湖区质心累积向东南方向移动了2.65 km；而2000—2022年间的移动速度则较快，累积向东南方向移动了8.72 km。总体上，湖区质心的移动方向和速率变化可直接反映出湖岸线发育和湖区扩张趋势。

3.3　讨　论

阿牙克库木湖作为高原内陆型湖泊，在全球暖湿化的背景下，1972—2000年间的区域气候暖湿化使得



a 湖岸线空间位置

b 湖泊质心变化

图3　1972—2022年阿牙克库木湖岸线位置和质心变化

阿里金山保护区冰川消融加速，增加了湖泊的径流补给，同时，暖湿气流带来的降水量的增加，两者共同成为其水域面积扩大的主要驱动因素[5]；除了气候变暖和水循环过程加速，2000年以来新疆退耕还林工程使得植被覆盖率的增加，降低了区域内的地表蒸发量，也成为阿牙克库木湖21世纪以来水域面积扩大的主要驱动力。此外，高原内陆构造湖泊的变化驱动力研究[8]，也证实了阿牙克库木湖受气候影响的直观性，湖泊水量增加更容易受到气候变化的影响。

4　结　论

1）1972—2022年间阿牙克库木湖的水域面积呈扩张趋势；1972—2000年间，湖泊水域面积略有增加，而2000年以来湖泊面积扩张明显，这是由于湖泊面积与降水和气温具有较好的正相关性，其中降水量增加，湖泊面积也随之增加，并且随着气候暖湿化，冬季气温上升使得湖泊冰冻时间延迟，消融期冰川消融加速，也使得湖泊面积扩张。与1972年湖泊水域平均面积相比，2022年湖泊水域面积增加了610.5 km^2，湖泊水域面积扩大了123.7%。在青藏高原气候暖湿化的背景下，阿牙克库木湖水域面积将会持续扩张。

2）从湖岸线的空间形态特征来看，阿牙克库木湖的水域面积与湖岸线长度、发育系数和复杂程度成

正比，与圆形度呈反比。1972—2022年间湖岸线在湖区东部和南部区域的增长较快，湖区质点向东南方向移动了11.37 km。随着湖泊水域面积扩张，湖岸线向着不规则方向变化，岸线变得复杂细碎。

3）Landsat卫星影像提取阿牙克库木湖湖泊面积与湖岸线空间形态指标，不仅可以持续观测较长时段变化特征，也能揭示其变化趋势，为湖泊质心变化、湖岸线变化、湖泊面积变化等方面的专题地图制图提供数据源。此外，利用归一化水体指数提取湖泊湖岸线的不确定性，需要结合实地观测、冻土层厚度、生态植被等变化，进一步分析存在的问题与不足。

参考文献

[1] Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate Change Will Affect the Asian Water Towers[J]. Science,2010,328(5 984):1 382-1 385

[2] Meyer M F, Labou S G, Cramer A N, et al. The Global Lake Area, Climate, and Population Dataset[J]. Scientific Data,2020,7(1):174

[3] Yao T, Bolch T, Chen D, et al. The Imbalance of the Asian Water Tower[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022,3(10):618-632

[4] Bai J, Chen X, Li J, et al. Changes in the Area of Inland Lakes in Arid Regions of Central Asia During the Past 30 a[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2011, 178(1):247-256

[5] 陈军,汪永丰,郑佳佳,等. 中国阿牙克库木湖水量变化及其驱动机制[J]. 自然资源学报,2019,34(6): 1 345-1 356

[6] Perico R, Brunner P, Frattini P, et al. Water Balance in Alpine Catchments by Sentinel Data[J]. Water Resources Research,2022,58(11):e2021WR031355

[7] 白瑞东,何隆华,吴敬禄. 基于MODIS数据的近期新疆主要湖泊水面变化分析[J].干旱区研究,2012,29(4):561-566

[8] 李均力,白洁,王亚俊. 1964—2015年阿牙克库木湖时序变化的气候响应[J]. 干旱区研究,2018,35(1):85-95

[9] 张文春,张理想,马金锋,等. 近40余年阿牙克库木湖的时序变化研究[J].吉林建筑大学学报,2019,36(6):23-26

[10] 曾成强,王理根. 新一代Landsat卫星星座特征及应用前景[J].城市勘测,2022(5):78-85

[11] Randazzo G, Barreca G, Cascio M, et al. Analysis of very High Spatial Resolution Images for Automatic Shoreline Extraction and Satellite-derived Bathymetry Mapping[J]. Geosciences,2020,10(5):172-174

[12] Mcfeeters, S K J. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 (7):1 425-1 432

[13] Kale M M, Ataol M, Tekkanat I S. Assessment of Shoreline Alterations Using a Digital Shoreline Analysis System: A Case Study of Changes in the Yesilırmak Delta in Northern Turkey from 1953 to 2017[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2019,191(6):398-403

[14] 马晨燕,颜湘槟. 杞麓湖形态时空变化分析及地图可视化[J]. 测绘地理信息,2022,47(1):86-90

[15] 祁苗苗,姚晓军,刘时银,等. 1973—2018年青海湖岸线动态变化[J]. 湖泊科学,2020,32(2):573-586

[16] Wootton C. Calculate Centroid of Area Developing Quality Metadata[M]. Boston: Focal Press,2007

[17] Rocchini D, Cateni C. On the Measure of Spatial Centroid in Geography[J]. Asian Journal of Information Technology, 2006,5(7):729-731

（上接第45页）

[7] 刘良云,陈良富,刘毅,等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报,2022,26(2):243-267

[8] 卫冬丽. 中国燃煤电厂二氧化碳排放量计算方法研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2014

[9] Nassar R, Hill T G, Mclinden C A, et al. Quantifying CO_2 Emissions from Individual Power Plants from Space [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(19):10 045-10 053

[10] 李特雅,宋妍,于新莉,等. 卫星热红外温度反演钢铁企业炼钢月产量估算模型[J]. 自然资源遥感,2021,33(4):121-129

[11] Quick J C, Marland E. Systematic Error and Uncertain Carbon Dioxide Emissions from US Power Plants [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(5): 646-658

[12] Li S, Wang J, Li D, et al. Evaluation of Landsat8-like Land Surface Temperature by Fusing Landsat8 and MODIS land Surface Temperature Product [J]. Processes, 2021, 9(12): 2 262-2 280

[13] 陈春辉,马苗苗. 基于多源遥感数据的城市热岛特征与机理研究[J]. 地理空间信息,2023,21(1):119-122

[14] 金丽娜,李雄飞,杜萌萌,等. 基于FY-3卫星数据的西安市城市热岛特征分析[J]. 气象与环境科学,2019,42(4):74-82

[15] Ahmed M, Seraj R, Islam S M S. The K-means Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation [J]. Electronics, 2020, 9(8): 1 295-1 307