

顾小凡,石建省,陈宝辉,等.大柴旦矿区生态环境影响要素变化特征.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1675-1684. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230027.

Gu Xiaofan, Shi Jiansheng, Chen Baohui, et al. Variation Characteristics of Meteorological Elements Influencing Ecosystem Environment in Da Qaidam Mining Area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1675 - 1684. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230027.

大柴旦矿区生态环境影响要素变化特征

顾小凡^{1,2}, 石建省³, 陈宝辉⁴, 常亮², 犹香智², 林川⁵

1.中国地质科学院,北京 100037

2.中国地质调查局西安地质调查中心,西安 710054

3.中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083

4.中煤科工集团西安研究院有限公司,西安 710054

5.北京天地华泰矿业管理股份有限公司,北京 100020

摘要:气象要素变化对矿区生态环境的影响极为重要,尤其是在我国青藏高原寒旱区,全面系统地了解历史气象要素变化特征对高寒矿区生态环境保护具有指导作用。本研究首先基于青藏高原大柴旦矿区1956—2022年的逐月降水、气温、蒸发数据,采用线性倾向估计法、集合经验模态分解(EEMD)、Morlet小波变换等方法对大柴旦地区的降水、气温、蒸发等气象要素的变化趋势进行了全面分析研究;然后选取三期空间分辨率为30 m的Landsat卫星数据,从卫星图像中计算了归一化差异植被指数(I_{NDV})。结果表明:大柴旦矿区气候呈现暖湿化态势,在此因素驱动下,降水量呈现轻微增加趋势,气温呈现明显增高趋势,蒸发量呈明显减小趋势;降水量和气温序列没有突变点,而蒸发量在1979年存在突变,在1956—1979年蒸发量缓慢增加,在1979—2022年缓慢减小;降水量在2000—2016年具有显著12个月的震荡周期,气温和蒸发量在整个时间尺度上都具有12个月的震荡周期;植被多集中分布在水体附近,研究区内整体呈现覆盖增加、生长活动增强趋势。预测大柴旦矿区未来几年降水量仍处于增加状态,温度处于增高阶段,年蒸发量将处于偏少期,植被生长活动整体呈增强趋势。

关键词:高寒矿区;气象要素;集合经验模态分解;Morlet小波函数;降水;气温;蒸发

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230027

中图分类号:X24;P49

文献标志码:A

Variation Characteristics of Meteorological Elements Influencing Ecosystem Environment in Da Qaidam Mining Area

Gu Xiaofan^{1,2}, Shi Jiansheng³, Chen Baohui⁴, Chang Liang², You Xiangzhi², Lin Chuan⁵

收稿日期:2022-02-15

作者简介:顾小凡(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事西北地区水资源与水文地质调查方面的研究,E-mail: 251335419@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42177346);中国地质调查局地质调查项目(DD20160291, DD20221751, DD20230082)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42177346) and the Project of China Geological Survey (DD20160291, DD20221751, DD20230082)

- 1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
- 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China
- 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China
- 4. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China
- 5. Beijing Tiandi Huatai Mining Management Co., Ltd., Beijing 100020, China

Abstract: Changes in meteorological elements have a highly important impact to the ecological environment of the mining area, especially in the cold and arid region of the Qinghai-Tibet Plateau, China. A comprehensive and systematic understanding of characteristics of historical meteorological changes plays a guiding role in the ecological environment protection for alpine mining areas. In this study, trends of precipitation, air temperature, and evaporation were comprehensively analyzed by linear tendency estimation, the ensemble empirical mode decomposition (EEMD), and Morlet wavelet analysis using monthly data from 1956 to 2022 in the Da Qaidam mining area of the Qinghai-Tibet Plateau. The normalized difference vegetation index (I_{NDV}) was extracted from three phases of Landsat satellite images with a spatial resolution of 30 m. Results showed that the climate in the study area developed towards warming and humidification with a slightly increasing trend of precipitation, a significantly trend of temperature, and a markedly decreasing trend of evaporation. No abrupt changes points were detected for precipitation and temperature, but a sudden change in evaporation existed in 1979. Evaporation increased slowly from 1956 to 1979, and decreased slowly from 1979 to 2022. Precipitation had a significant 12 – month oscillation period from 2000 to 2016, while temperature and evaporation had a 12 – month oscillation period throughout the entire study period. I_{NDV} data indicated that vegetation was mostly concentrated near the water bodies, and the coverage expanded and the growth activity enhanced over time in the entire study area. It is predicted that precipitation and temperature would continuously increase and annual evaporation would be in a relatively small period. The vegetation growth activity would be strengthened for next few years in the Da Qaidam mining area.

Key words: high-cold mining area; meteorological elements; EEMD; Morlet wavelet function; precipitation; air temperature; evaporation

0 引言

目前,在经济快速发展、人口迅速增长以及资源不合理开发利用等影响下,青藏高原的生态环境产生了局部地区环境污染破坏^[1-2]、土地退化^[3]、湖泊湿地萎缩^[4]以及生物多样性减少^[5]等多种危机。同时,随着国家生态文明建设的不断深入,青藏高原高寒地区生态环境受到社会各界的关注,其中生态环境保护和修复成为高寒矿区绿色持续发展的重要环节^[6-7],其涉及矿产开发利用、水资源保护、土壤植被修复、生物多样性保护等多方面生态环境科学难题。

2021 年,国家提出要统筹指导构建新发展格局,推动青藏高原生态环境保护和可持续发展^[8]。之后,众多学者^[9-11]对青藏高原生态环境影响要素开展了大量研究,认为气象要素与矿区生态环境的演化关系极为密切,其中,降水量、气温以及蒸发量

等气象要素直接影响着矿区地貌景观、植被生态、水环境资源、生命活动等多个方面。

柴达木盆地地处青藏高原北部干旱区,是受气候变化影响最为敏感的区域之一^[12],且生态环境较为脆弱,研究其气候变化趋势对于了解青藏高原气象要素和生态环境对全球气候变化的响应特征具有重要意义。已有学者开展了不同时期盆地尺度和流域局部尺度研究。例如:Wang 等^[13]研究指出,1961 — 2010 年间柴达木盆地变暖趋势强烈,年均气温增速为 0.053 °C/a,年均降水量增速为 0.738 mm/a,高于青藏高原其他区域。相守贵等^[14]分析了柴达木盆地 1966 — 2015 年间气候变化和降水特征,指出气温在 2001 年发生突变,1996 年以前呈下降趋势,不存在 10 a 以上周期,其后呈上升趋势,具有 4 a 准周期;降水量在 1985 — 2000 年存在 10~11 a 周期,在 2001 年发生突变,进入湿润期,

2004—2015年存在6 a 准周期。许婉彤等^[15]分析了1982—2013年柴达木盆地气候变化特征,认为除相对湿度变化不明显外,降水量和气温显著上升,日照时数和平均风速显著减小;且降水量在1980年代至21世纪初存在5~6 a 的周期变化,但2003年后消失,气温变化存在10~12 a、30~32 a 周期。杜玉娥^[16]研究认为1961—2016年间柴达木盆地气温和降水量总体上均呈显著增加,2002—2015年,植被覆盖度增大。马日新等^[17]通过对格尔木河流域近60 a 气象要素变化特征进行分析,指出该流域气候向暖湿化转变,为流域水资源利用配置提供了良好的条件。文广超等^[18]分析了近60 a 来巴音河流域气象要素变化特征,认为巴音河流域降水量有进一步增多趋势,需对流域下游因地下水位上涨引起的生态环境危害进一步防治。靳铮等^[19]对三江源近60 a 气象要素的空间格局和气候指标进行了对比,指出温湿气候态沿西北—东南方向正温湿梯度的空间变化特征和格局,为从区域山水林田湖草协同治理提供了气候依据。次央等^[20]分析了近50 a 藏北高原地区气象要素的变化趋势和周期时长,指出气温和降水量在发生时域上的互补性。

目前这些研究主要针对气候变化进行分析,但在生态环境脆弱的高寒矿区,对气象要素变化的研究存在时间序列相对较短、对未来短期内的气候变化预测不足等问题。大柴旦矿区位于我国的聚宝盆——柴达木盆地内,区内矿产丰富,富含大量的硼锂等矿产资源,是我国内陆重要的能源基地。但是该矿区生态环境脆弱,区域内生态植被和牧场逐步退化^[21-22];因此,为了预防和杜绝青海木里矿区式的生态环境破坏问题再次发生,亟需实现大柴旦矿区生态环境保护和修复治理。文章选取柴达木盆地内大柴旦气象站1956—2022年降水量、气温、蒸发量资料,首先在分析其趋势变化的基础上,进行突变分析及其周期性分析,然后利用遥感影像提取分析植被覆盖状况,进一步预测未来变化趋势,以期为生态环境保护和修复以及矿产开发活动提供相应的决策依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况和数据来源

研究区位于平均海拔3 500 m的大柴旦盆地内(图1),冬寒夏凉,昼夜温差大,多年平均降水量、气温和蒸发量分别为89.43 mm、2.10 ℃和1 371.00 mm,植被覆盖度低,属高寒气候区。文章所引用的气象

数据为大柴旦气象站月平均观测资料,时间为1956年1月至2022年12月。植被数据选用生长期Landsat 遥感影像来提取分析植被指数变化。

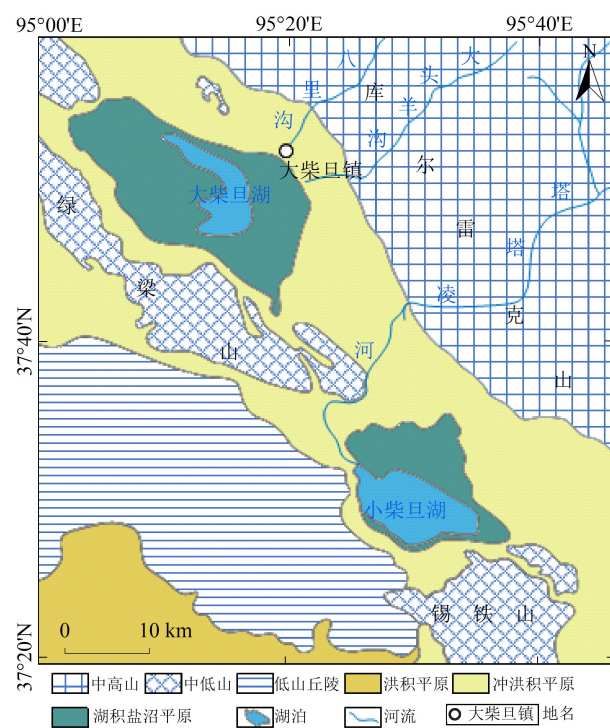


图1 研究区域位置图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 线性倾向估计

一般来说,气象要素随时间变化有一定的倾向性,因此利用线性方程来拟合其变化趋势^[23]:

$$y = at + b. \quad (1)$$

式中: y 为某类气象要素; a 为斜率,代表气象要素时间序列的变化率; t 为时间; b 为截距。

1.2.2 集合经验模态分解

集合经验模态分解(EEMD)是由Wu等^[24]提出的一种分离非线性和非平稳数据的时间序列分解方法。EEMD是经验模态分解(EMD)^[13]的改进版,其能够识别共存的各种振荡模态,并将原始时间序列分解成一系列模态,即有限的固有模态函数(IMF)以及趋势项。EEMD方法在原始时间序列中加入白噪声以克服EMD方法中的模式混合^[19]。基于EEMD分解,添加的白噪声可以在多次平均后被去除,原始数据序列可以被分解为IMF和残差趋势。

1.2.3 小波分析

小波分析法作为一种时间-频率信号分析方法,

可将时间序列分解为时间域和频率域,准确揭示非平稳时间序列序列细微的变化特征^[25-27]。

连续小波变换定义为

$$W(m,n)=\frac{1}{\sqrt{m}}\int f(t)\bar{\varphi}\left(\frac{t-n}{m}\right)dt。(2)$$

式中: $W(m,n)$ 为变换系数; m 为周期伸缩因子; n 为时间平移因子; $f(t)$ 为原时域信号; $\bar{\varphi}(t)$ 为复共轭函数。

对时域上所有小波系数的平方进行积分,得到小波方差 $V_{ar}(m)$:

$$V_{ar}(m)=\int_{-\infty}^{\infty}|Wf(m,n)|^2dn。(3)$$

根据小波方差分析时间序列变化的主要时间尺度,进一步确定序列变化的主要周期。

1.2.4 归一化植被指数提取

由于植物叶片组织对蓝光(470 nm)和红光(650 nm)有强烈吸收,而对绿光和红外光强烈反射;故植被覆盖越高,红光反射越小,近红外光反射越大。归一化植被指数(I_{NDV})可通过测量近红外(植被强烈反射)和红光(植被吸收)之间的差异来量化植被覆盖度。

$$I_{NDV}=\frac{\lambda_N-\lambda_R}{\lambda_N+\lambda_R}。(4)$$

式中: λ_N 为近红外波段的反射率; λ_R 为红光波段的反射率。

本研究选用 Landsat 5 和 Landsat 8 的遥感数据为数据源,Landsat 遥感影像是提取植被信息的有效数据^[28],Landsat 5 和 Landsat 8 分别为美国陆地卫星系列 Landsat 的第 5 颗卫星和第 8 颗卫星。分别选取植被生长期 1987 年 7 月 3 日、2000 年 8 月 7 日、2019 年 8 月 28 日三期卫星图像来计算 I_{NDV} ,以对比研究时段内的植被变化。

2 结果与分析

2.1 降水、气温、蒸发年际变化特征

2.1.1 降水

大柴旦矿区多年平均降水量为 89.43 mm,降水量年际变化较大(图 2a),年最大、最小降水量分别为 168.2 mm(2017 年)、33.7 mm(1976 年),降水量变化倾向率为 0.47 mm/a,表明 60 多 a 以来大柴旦矿区降水呈增加趋势。

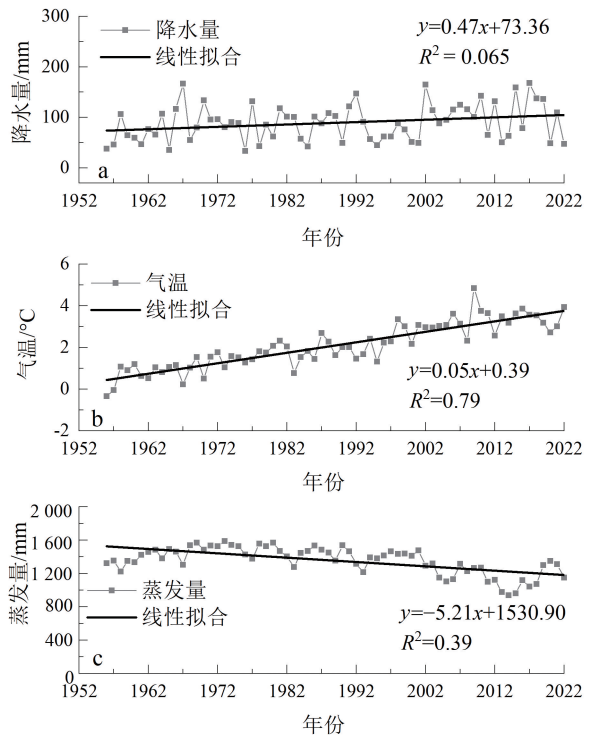
2.1.2 气温

矿区多年平均气温为 2.10 ℃,最大、最小年平

均气温分别为 3.90 ℃(2022 年)、-0.05 ℃(1957 年)。矿区多年平均气温呈上升趋势(图 2b),年气温变化倾向率为 0.05 ℃/a。

2.1.3 蒸发

大柴旦矿区多年平均蒸发量为 1 371.46 mm,最大、最小年蒸发量分别为 1 587.3 mm(1973 年)、1 032.96 mm(2012 年)。近 67 a 大柴旦矿区的年蒸发量呈下降趋势(图 2c),其变化倾向率为 -5.21 mm/a。这可能与日照时间变短、风速减小等因素有关^[15]。



R 为相关系数。

图 2 研究区 1956—2022 年降水量(a)、气温(b)和蒸发量变化(c)

Fig.2 Annual variations of precipitation (a), air temperature (b), and evaporation (c) during 1956 to 2022 in the study area

2.2 降水、气温、蒸发年内变化特征

研究区降水量、气温、蒸发量年内变化如图 3 所示。降水量年内分配不均匀,降水主要集中在 6 月和 7 月,分别占多年平均降水量的 24.42%、25.19%;其次为 5、8、9 月,分别占全年降水量的 12.94%、15.50%、7.98%;其余各月总和仅占全年总降水量的 13.98%。与中国大多数地区气温变化相似,7、8 月气温最高,12、1 月气温最低,年内气温变

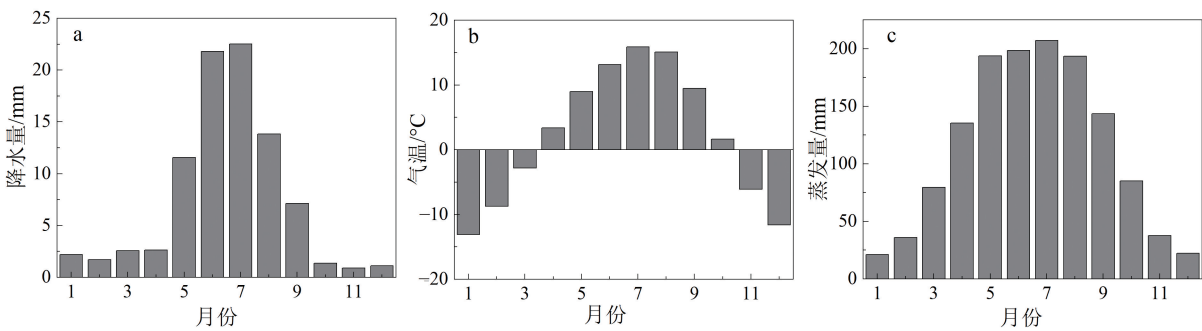


图 3 研究区 1956—2022 年多年平均降水量(a)、气温(b)和蒸发量(c)年内变化

Fig.3 Intra-annual variations of precipitation (a), air temperature (b), and evaporation (c) during 1956 to 2022 in the study area

化幅度大,变化幅度可达 24 ℃。由月平均蒸发量可以看出,受气温影响,月平均蒸发量变化与气温变化规律相似,5—8 月较强烈,12、1 月较弱。5—8 月蒸发量均在 150 mm 以上,占全年蒸发量的 58.57%,3—4 月和 9—10 月蒸发量次之,占全年蒸发量的 32.77%,1—2 月和 11—12 月蒸发量较小,仅占全年蒸发量的 8.66%。

2.3 植被变化特征

研究区内三个时段植被覆盖情况如图 4 所示,植被多集中分布在水源附近。随着时间推移,该研究区内植被覆盖扩张、植被生长强度增加,在水体周边表现尤为明显。1987 年 7 月 3 日、2000 年 8 月 7 日和 2019 年 8 月 28 日三个时段内, $I_{NDV} > 0.1$ 的植被覆盖网格分别约占到总植被分布网格的 13.9%、17.8% 和 30.0%; $I_{NDV} > 0.4$ 植被覆盖的网格分别约占到

0.7%、1.6% 和 3.1%,植被覆盖增加显著。由图 5 可见:与 1987 年 7 月 3 日相比,2000 年 8 月 7 日水体周围的 I_{NDV} 增加较为明显,增加幅度最大约 0.4;相比于 2000 年 8 月 7 日,2019 年 8 月 28 日研究区内植被 I_{NDV} 整体上呈现增加状态。综上,研究区在植被生长季内整体上呈现出增强的趋势。

3 讨论

3.1 降水量、气温、蒸发量时间序列集合经验模式分解

通过 EEMD 对大柴旦地区 1956—2022 年月降水量从高频到低频分解后,共得到 7 个 IMF 分量 (IMF1—7) 和一个残余项(图 6)。由图 6 和表 1 可知,IMF1、IMF2 和 IMF3 对原始数据的方差贡献率较高,累计贡献率分别为 32.76%、16.59% 和 19.32%,

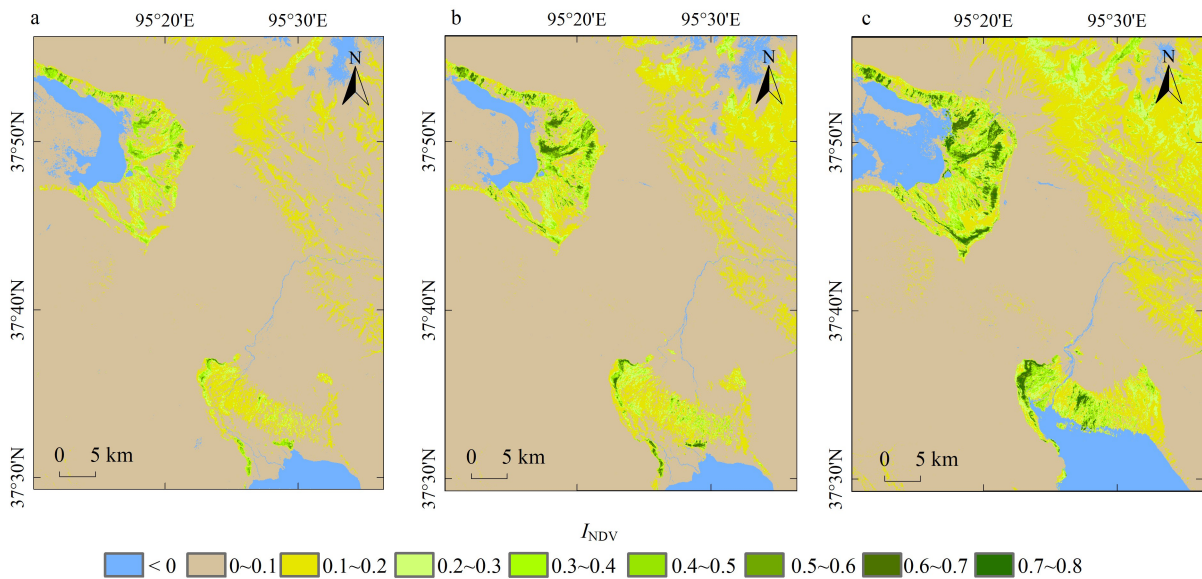
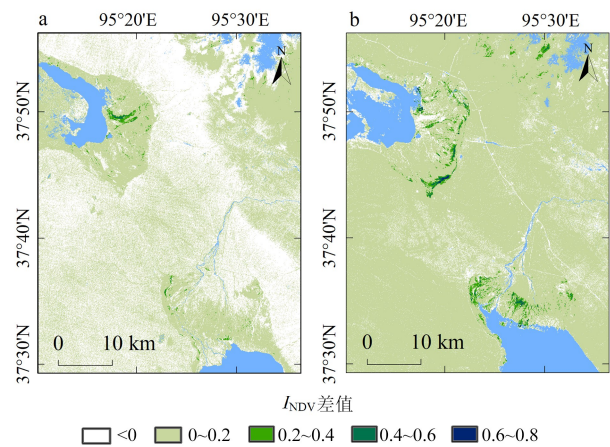


图 4 研究区 1987 年 7 月 3 日(a)、2000 年 8 月 7 日(b)和 2019 年 8 月 28 日(c) I_{NDV} 空间分布

Fig.4 Spatial distributions of I_{NDV} in July 3rd, 1987 (a), August 7th, 2000 (b), and August 28th, 2019 (c) in the study area



a. 2000 年 8 月 7 日与 1987 年 7 月 3 日 I_{NDV} 差值; b. 2019 年 8 月 28 日与 2000 年 8 月 7 日 I_{NDV} 差值。

图 5 研究区不同时间段 I_{NDV} 差值
Fig.5 Difference of I_{NDV} in different time intervals of the study area

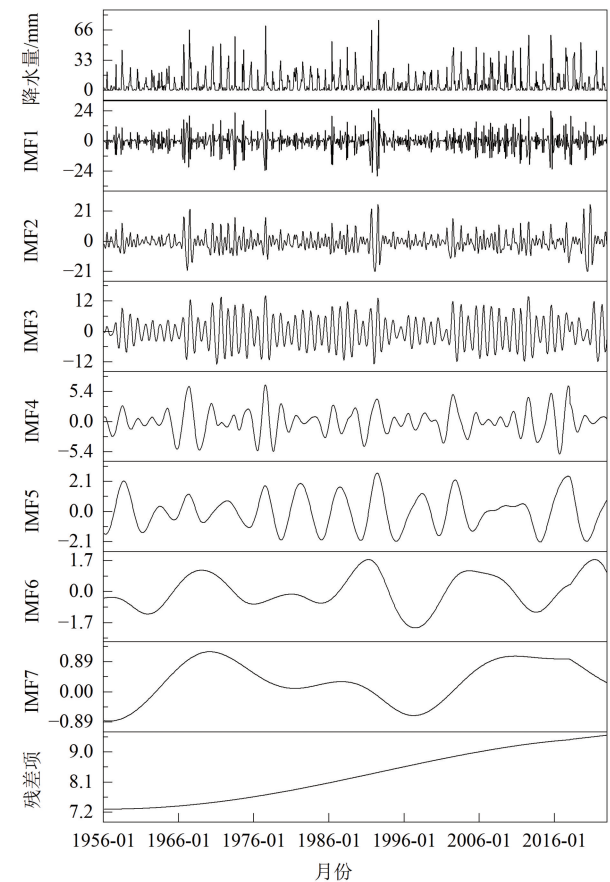


图 6 研究区 1956 — 2022 年降水序列 EEMD 分解
Fig.6 EEMD decomposition of precipitation during 1956 to 2022 in the study area

表 1 研究区各 IMF 分量对降水量、气温和蒸发量的方差贡献率

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	残差
降水量	32.76	16.59	19.32	4.24	0.79	0.25	0.00	0.00
气温	6.56	61.78	0.78	0.38	0.02	0.00		0.01
蒸发量	7.77	63.13	4.68	2.05	1.87	0.56		0.10

即表明大柴旦地区月降水量主要由 IMF1、IMF2 以及 IMF3 所决定。残差项表明时间序列的长期变化,残差项从 1956 年 1 月到 2022 年 12 月呈逐渐增加的趋势,表明降水量多年逐渐增多,这与一元线性回归得到的结果相同。

通过 EEMD 对大柴旦地区 1956 — 2022 年月平均气温从高频到低频分解,共得到 6 个 IMF 分量 (IMF1 — 6) 和一个残差项 (图 7)。由图 7 和表 1 可

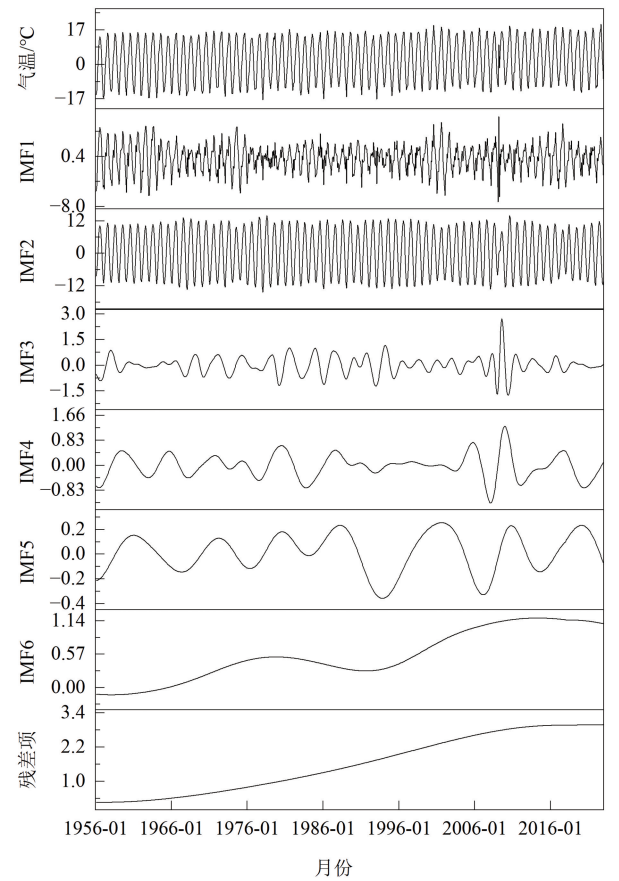


图 7 研究区 1956 — 2022 年气温序列 EEMD 分解
Fig.7 EEMD decomposition of air temperature during 1956 to 2022 in the study area

知,IMF2 对原始数据的方差贡献率较高,累计贡献率为61.78%,即表明大柴旦地区月平均温度主要由 IMF2 所决定。残差项表明研究区气温呈多年升高趋势,这与一元线性回归得到的结果相同。

大柴旦地区 1956—2022 年月蒸发量从高频到低频分解后,共得到 6 个 IMF 分量(IMF1—6)和一个残差项(图8),由图8和表1可知,IMF2对原

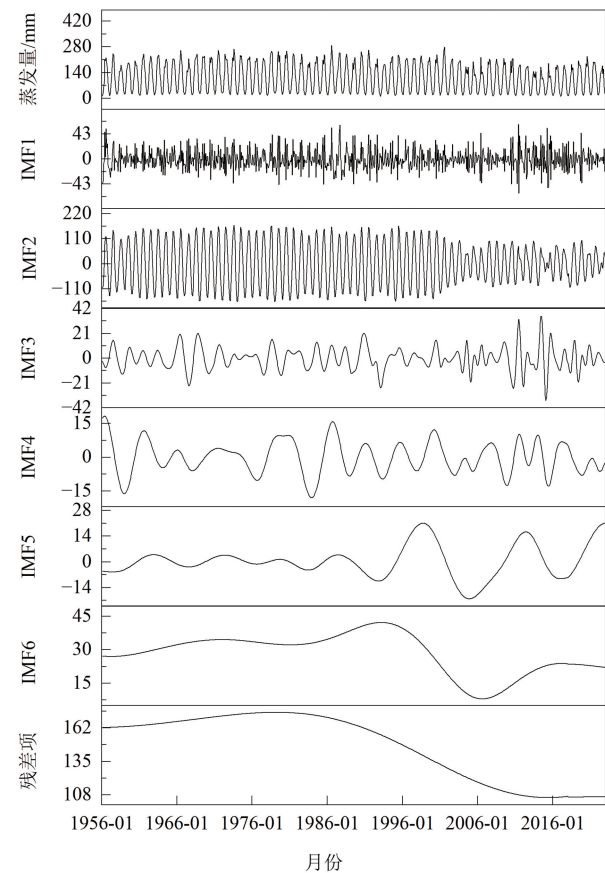


图 8 研究区 1956—2022 年蒸发序列 EEMD 分解

Fig.8 EEMD decomposition of evaporation during 1956 to 2022 in the study area

始数据的方差贡献率较高,累计贡献率为 63.13%,即表明大柴旦地区月平均蒸发量主要由 IMF2 所决定。残差项表明研究区蒸发量先缓慢增高,然后再快速降低,1979 年为蒸发量的一个突变点。

3.2 降水量、气温、蒸发量的周期性特征

在内因因素和外因因素的共同作用驱动下,降水的气象因子动态不仅具有年内、年际等变化规律,还具有极端复杂的随机性与周期性等非线性响应特征。本节利用连续小波变换分别对研究区 1956—2022 年月尺度和年际降水量、气温、蒸发量进行周期性演化特征分析,结果如图 9 和图 10 所示。影响锥内的区域为有效波谱值,表示震荡时间尺度通过了0.05显著性水平的红噪声标准谱检验,而影响锥外的区域表示无效波谱值。由图 9 可知,小波影响锥范围内降水量在 1986—1995 年、2000—2016 年具有 12 个月的震荡周期,而气温和蒸发量在整个时间尺度上都具有 12 个月的震荡周期,这与降水量、气温、蒸发量的年内变化特征相同。而对于年尺度的降水量、气温、蒸发量的周期性特征结果,仅在少数时间观察到 2 a 尺度的周期性,没有明显的周期性演化特征(图 10)。

可见,在未来一段时间内,大柴旦矿区的降水相对丰沛,且降水相对集中在 6、7 月,且气温不断回暖,蒸发量不断减少,因此,在 4、5 月份可以加强植被种植和保护,有利于该矿区复绿复牧。

综合以上分析,降水量的年际动态变化特征、突变特征及小波分析均表明,大柴旦矿区降水量呈增多趋势,目前降水量增加的趋势依然会持续,且处于震荡周期最强时期。显然,降水量的增加对于加强生态修复是极其有利的。

尽管气温的年际变化呈现增加的趋势,且未来会处于气温增高阶段,但气温的年际变化未出现上

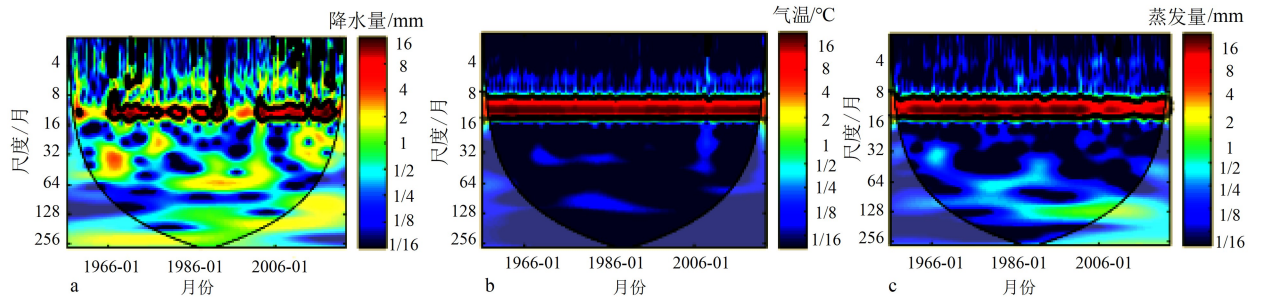
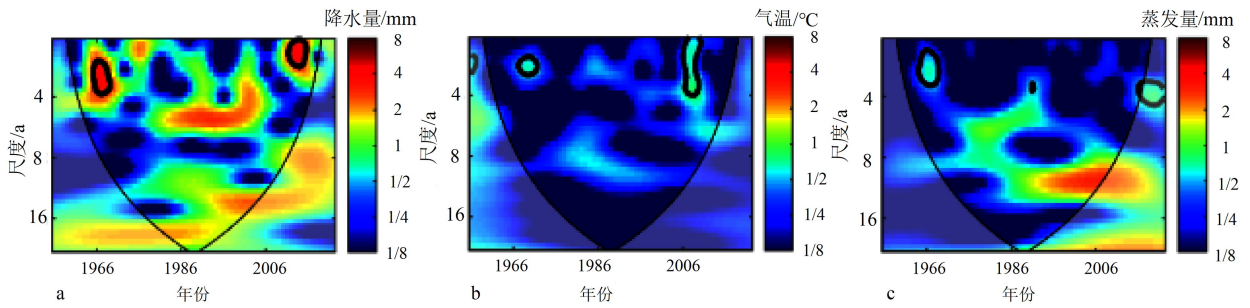


图 9 研究区降水量(a)、气温(b)和蒸发量(c)月尺度连续小波周期性

Fig.9 Monthly continuous wavelet periodicity of precipitation (a), air temperature (b), and evaporation (c) in the study area



图中黑色轮廓表示 95%显著性水平,黑色曲线为小波影响锥。

图 10 研究区降水量(a)、气温(b)和蒸发量(c)年尺度连续小波周期性

Fig.10 Annual continuous wavelet periodicity of precipitation (a), air temperature (b), and evaporation (c) in the study area

升突变点,表明气温这一因素的变化并未由量变达到质变,对生态环境影响较小。

采用年际动态变化特征、突变特征及小波分析三种方法对蒸发量年际变化进行分析可知,蒸发量在经过 1979 年蒸发序列下降突变点后,呈现减小的趋势;且未来一段时期内矿区年蒸发量将处于偏少期。显然,蒸发量的减小也会进一步促进大柴旦矿区的生态修复。

因此,受全球温室效应影响,在降水、气温和蒸发三个因素的协同作用下,大柴旦地区气候呈现暖湿变化态势,且未来一段时期内这种趋势依然会十分显著。这种变化的趋势有利于植被的快速恢复和生长,保证了矿区生态环境植被生长的稳定性和长效性,有利于矿区生态环境的修复。

4 结论

1)1956—2022 年研究区的降水量、气温总体呈增长趋势,增长速率分别为 0.47 mm/a、0.05 °C/a,降水量年内分配不均匀,主要集中在 6、7 月;年蒸发量呈显著降低趋势,降低速率为 5.21 mm/a。

2)研究区月降水量主要由 IMF1、IMF2 和 IMF3 所决定,气温和蒸发量主要由 IMF2 所决定, EEMD 趋势项表明多年降水量和平均气温呈逐渐增加的趋势,蒸发量先缓慢增高,然后再降低,1979 年为其突变点。

3)月尺度降水量在 1986—1995 年、2000—2016 年具有显著的 12 个月震荡周期,而气温和蒸发量在整个时间尺度上都具有 12 个月的震荡周期。年尺度没有明显的周期性演化特征。

4)研究区内植被覆盖多集中分布在水源附近,在 1987 年 7 月 3 日、2000 年 8 月 7 日和 2019 年 8

月 28 日三个时段内,植被覆盖扩张,植被生长强度增加,水体周边增加幅度尤为明显。

5)整体来看,在全球气候变化的大背景下,大柴旦矿区气候呈现暖湿化态势,在此因素驱动下,未来一段时间大柴旦矿区将处于年降水量偏多且蒸发量偏少期;在降水、气温和蒸发三个因素的协同作用下有效地保证了矿区生态环境植被生长的稳定性和长效性,有利于大柴旦矿区生态环境的修复。

参考文献(References):

- [1] 冯雨雪,李广东.青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析[J].地理学报,2020,75(7):1386-1405.
Feng Yuxue, Li Guangdong. Interaction Between Urbanization and Eco-Environment in Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (7): 1386 - 1405.
- [2] Shi W, Qiao F, Zhou L. Identification of Ecological Risk Zoning on Qinghai-Tibet Plateau from the Perspective of Ecosystem Service Supply and Demand [J]. Sustainability, 2021, 13(10):1-17.
- [3] 晏和飘,李文龙,梁天刚,等.青藏高原退化高寒草地恢复对不同措施响应的 Meta 分析[J].草地学报,2021, 29(增刊 1):190-198.
Yan Hepiao, Li Wenlong, Liang Tiangang, et al. Effects of Different Restoration Measures on Degraded Alpine Grasslands of the Tibetan Plateau: A Meta-Analysis [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(Sup.1):190-198.
- [4] Zhang Z X, Chang J, Xu C Y, et al. The Response of Lake Area and Vegetation Cover Variations to Climate Change over the Qinghai-Tibetan Plateau During the Past 30 Years[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635:443-451.
- [5] Wei X, Wu P. Responses of Soil Insect Communities to

- Alpine Wetland Degradation on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 103: 103276.
- [6] 钱大文, 颜长珍, 修丽娜. 青藏高原木里矿区及其周边土地覆被变化及景观格局脆弱性响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1334 - 1343.
- Qian Dawen, Yan Changzhen, Xiu Lina. Land Cover Change and Landscape Pattern Vulnerability Response in Muli Mining and Its Surrounding Areas in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1334 - 1343.
- [7] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 230 - 244.
- Wang Tong, Du Bin, Li Congcong, et al. Ecological Environment Rehabilitation Management Model and Key Technologies in Plateau Alpine Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 230 - 244.
- [8] 王培, 何盛浩, 张新贝, 等. 荆门市近 60 年风速风向特征分析[J]. *四川环境*, 2020, 39(4): 43 - 50.
- Wang Pei, He Shenghao, Zhang Xinbei, et al. Characteristics Analysis of Wind Speed and Direction in Jingmen in Recent Sixty Years [J]. *Sichuan Environment*, 2020, 39(4): 43 - 50.
- [9] 刘黎, 陈宁生, 田连权. 近 37 a 新疆天山天池气候变化及其对生态环境的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 87 - 91.
- Liu Li, Chen Ningsheng, Tian Lianquan. The Climate Change and Its Influences on Ecosystem Environment for the Last 37 Years in Heavenly Pond in Tianshan of Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 87 - 91.
- [10] 丁凌霄, 汪锋, 王兆刚, 等. 我国主要矿区气候对生态恢复影响的研究[J]. *现代矿业*, 2010, 26(2): 31 - 33.
- Ding Lingxiao, Wang Feng, Wang Zhaogang, et al. Research of Climates Influence on Ecological Restoration in China Main Mining Area[J]. *Morden Mining*, 2010, 26(2): 31 - 33.
- [11] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980 — 2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 967 - 979.
- Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate Change in the Upper Yellow River Basin and Its Impact on Ecological Vegetation and Runoff from 1980 to 2018 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 967 - 979.
- [12] Feng Y N, Du S H, Fraedrich K, et al. Fine-Grained Climate Classification for the Qaidam Basin [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(6): 913.
- [13] Wang X J, Yang M X, Liang X W, et al. The Dramatic Climate Warming in the Qaidam Basin, Northeastern Tibetan Plateau, During 1961 - 2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(5): 1524 - 1537.
- [14] 相守贵, 张成毅, 李生辰, 等. 柴达木盆地 1966 — 2015 年气候变化及降水特点分析[J]. *青海环境*, 2018, 28(2): 64 - 71.
- Xiang Shougui, Zhang Chengyi, Li Shengchen, et al. Climate Change and Characteristics of Precipitation of Qaidam Basin During 1966 - 2015 [J]. *Qinghai Environment*, 2018, 28(2): 64 - 71.
- [15] 许婉彤, 曾彪, 李博, 等. 柴达木盆地气候变化区域性特征及其影响因素[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 357 - 364, 372.
- Xu Wantong, Zeng Biao, Li Bo, et al. Regional Differentiation of Climate Changes in Qaidam Basin and Its Influencing Factors [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, 55(3): 357 - 364, 372.
- [16] 杜玉娥. 柴达木盆地植被与湖泊时空格局及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1 - 114.
- Du Yu'e. Spatial and Temporal Patterns of Vegetation and Lakes in the Qaidam Basin and Their Response to Climate Change[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1 - 114.
- [17] 马日新, 黄金廷, 田华, 等. 格尔木河流域近 60 a 降水、蒸发及温度变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 1005 - 1012.
- Ma Rixin, Huang Jinting, Tian Hua, et al. Characteristics of Precipitation, Evaporation and Temperature at the Golmud River Catchment in Recent 60 Years[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1005 - 1012.
- [18] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 巴音河流域德令哈市气象站近 60 年来降水变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 18 - 24.
- Wen Guangchao, Wang Wenke, Duan Lei, et al. Analysis on Variation Characteristics of Precipitation for Recent 60 Years in Delingha Weather Station of Bayin River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 18 - 24.
- [19] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1042 - 1055.
- Jin Zheng, You Qinglong, Wu Fangying, et al.

Changes of Climate and Climate Extremes in the Three-Rivers Headwaters Region over the Tibetan Plateau During the Past 60 Years[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020,43(6):1042 - 1055.

[20] 次央,洛桑平措,罗布. 1973 — 2017 年藏北高寒牧区主要气象要素变化特征分析[J].中国农学通报, 2020,36(7):99 - 104.

Ci Yang, Luo Sangpingcuo, Luo Bu. The Variation Characteristics of Main Meteorological Elements in the Northern Tibetan Plateau from 1973 to 2017[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36 (7): 99 - 104.

[21] 王战,李向全,王振兴,等.鱼卡—大柴旦盆地地下水生态环境效应与生态环境质量评价[J].水文地质工程地质,2015,42(4):121 - 126.

Wang Zhan, Li Xiangquan, Wang Zhenxing, et al. Eco-Environmental Effect Induced by Groundwater in the Yuka-Daqaidam Basin and Assessment of Eco-Environment Quality[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 121 - 126.

[22] 张娟,宋昌斌,屈小荣,等.察尔汗盐湖矿区气象因素变化规律分析[J].化工矿物与加工,2020,49(5):48 - 50.

Zhang Juan, Song Changbin, Qu Xiaorong, et al. Analysis on Change Rule of Meteorological Factors in Qarhan Salt Lake Area[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(5): 48 - 50.

[23] 马荣.延安市 45 年降水变化趋势及突变特征分析[J].延安大学学报(自然科学版),2016,35(3):95 - 99.

Ma Rong. Analysis of Trend and Mutation Characteristics of Precipitation in Yan'an City During Past 45 Years [J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2016, 35(3): 95 - 99.

[24] Wu Z H, Huang N E. A Study of the Characteristics of White Noise Using the Empirical Mode Decomposition Method[J]. Physical and Engineering Sciences, 2004, 460: 1597 - 1611.

[25] 张晓,李净,姚晓军,等.近 45 年青海省降水时空变化特征及突变分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):6 - 12.

Zhang Xiao, Li Jing, Yao Xiaojun, et al. Characteristics of Precipitation Variation and the Abrupt Change over Qinghai in Recent 45 Years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(5): 6 - 12.

[26] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

Wang Wensheng, Ding Jing, Li Yueqing. Hydrology Wavelet Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[27] 束龙仓,张彤豪,澈丽木格,等.降水和地下水开采对通辽市科尔沁区潜水位的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):954 - 966.

Shu Longcang, Zhang Tonghao, Che Limuge, et al. Effects of Precipitation and Groundwater Exploitation on the Phreatic Water Table in Khorqin District, Tongliao City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 954 - 966.

[28] 吴栋哲,姜琦刚,顾宗瑞,等.基于 AHP 的海峡沿岸地区生态地质环境质量评价:以马六甲海峡北岸马来西亚西南沿海地区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(2):619 - 632.

Wu Dongzhe, Jiang Qigang, Gu Zongrui, et al. Evaluation of Eco-Geological Environment Quality in Strait Coastal Areas Based on AHP: Taking Southwest Coastal Areas of Malaysia of North Coast of Malacca Strait as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (2): 619 - 632.