

曾方明,董博,张西营. 青藏高原东北部 60 多年来的气候暖湿化:来自德令哈水文气候的记录[J]. 盐湖研究,2024,32(4):32-39.

Zeng F M, Dong B, Zhang X Y. Warming and humidification of climate on the northeastern Qinghai-Xizang plateau over the past 60 years: evidence from hydroclimatic records of Delingha[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(4): 32-39.

DOI:10.3724/j.whyj.2024019

青藏高原东北部 60 多年来的气候暖湿化:来自 德令哈水文气候的记录

曾方明^{1,2*}, 董 博^{1,2,3}, 张西营^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:柴达木盆地水文气候的变化影响该区生态文明建设及经济社会发展。研究采用线性回归和 Mann-Kendall 突变检验分析方法对德令哈 60 多年来的气象和水文数据进行分析。结果显示,德令哈的气温和降水均呈显著的上升趋势,1956—2022 年升温速率为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,1956—2018 年降水增加速率为 $26.6\text{ mm}/10\text{ a}$ 。冬季气温升高最快,可达 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;夏季降水增加最多,为 $17.1\text{ mm}/10\text{ a}$ 。德令哈水文站的平均流量也呈显著增加趋势,1960—2020 年增加速率为 $1.03\text{ m}^3/\text{s}/10\text{ a}$;夏季增加速率最快,为 $2.89\text{ m}^3/\text{s}/10\text{ a}$ 。平均流量主要受控于降水量,气温对其影响次之。Mann-Kendall 检验显示平均流量在 2009 年发生突变。尽管 1973—1980 年的蒸发量处于高值,但 1956—2003 年的蒸发量变化总体呈下降趋势,平均风速很可能是影响蒸发量的主要因素。湿润指数(降水量/蒸发量)呈升高趋势,表明德令哈气候近 60 年来朝湿润化方向发展。托素湖、尕斯库勒湖、青海湖湖面上涨及柴达木盆地植被覆盖度增加进一步印证了青藏高原东北部气候的暖湿化特征。

关键词:柴达木盆地;青藏高原东北部;气温;降水;气候变化

中图分类号:P467;P468

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2024)04-0032-08

当前全球变暖仍在继续^[1,2],全球气温上升促使冰川消融、冻土融化、热带传染病北上、海平面上升、沿海城市面临被淹没的风险。温度上升引起的海平面上升可能成为影响未来气候变化的一个关键因素^[3]。青藏高原号称地球第三极,平均海拔约为 $4\,465\text{ m}$ ^[4]。1960—2010 年青藏高原的气温增加速率为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[5],而 1960—2015 年青藏高原高寒区的气温升高幅度为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[6]。这意味着,在全球变暖的背景下,青藏高原地区快速响应全球气温的变化。受高原变暖放大效应的影响,青藏高原增温速率显著高于全球平均速率^[7]。气温升高导致青藏高原冻土融化、冰川退缩、极端气候等事件增加^[8-10],对当地的生态环境造成了一定的影响。

依据 20 世纪 80 年代以来新疆和祁连山地区的气候和水文记录显示的降水和径流量增加的情况,施雅风先生^[11]提出了中国西北地区气候暖湿化的假

说。然而,1961—2014 年黄土高原气温和降水变化趋势表明黄土高原气候总体呈现暖干化趋势^[12]。因此,对于中国西北地区是否整体气候呈暖湿化还存在不一致的认识。中国西北地区的柴达木盆地位于青藏高原东北部,属于典型的干旱-半干旱区,生态环境脆弱。气候变化对柴达木盆地的生态环境演变具有显著影响。前人基于现代气象和水文观测资料,对柴达木盆地的气候水文变化进行了研究^[13-15],然而这些研究的时间范围较短。随着观测数据的不断积累,为探讨青藏高原东北部的水文气候是否向暖湿化方向发展提供了有利条件。因此,本次研究通过分析德令哈气象站和水文站的过去 60 多年的观测记录,并结合青藏高原东北部托素湖、尕斯库勒湖和青海湖的湖面变化以及柴达木盆地的植被变化,旨在探讨青藏高原东北部的气候是否存在暖湿化的特征。

收稿日期:2023-04-15;修回日期:2023-11-02

基金项目:青海省科技厅创新平台建设专项(2021-ZJ-T07);国家自然科学基金项目(U20A2078)

(通信)作者简介:曾方明(1982-),男,副研究员,主要从事高原气候和环境变化研究工作。Email:fmzeng@163.com;fmzeng@isl.ac.cn。

1 材料与方法

德令哈位于柴达木盆地北缘,气象站位于德令哈市区,水文站位于气象站以东约 5.3 km 处的巴音河岸边(图 1)。巴音河发源于祁连山,长 320 km,流域总面积为 $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ [15]。本次研究的德令哈站的气象数据来自中国气象局气象数据中心(1955 年 8 月至 2015 年 2 月)和天气网站 <https://rp5.ru/> (2015 年 3 月至 2023 年 3 月)的逐日资料。德令哈水文站的逐日流量数据来自青海省水文水资源测报中心。数据为国家基本气象站和水文站多年观测的结果,可信度高。

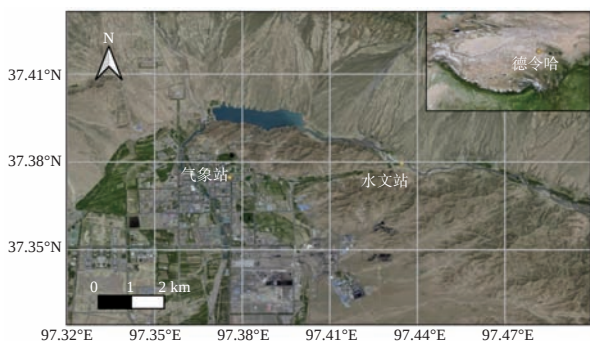


图1 德令哈气象站和水文站的位置(底图来自天地图;右上角小图指示德令哈所在位置)

Fig. 1 Map showing the locations of the meteorological station and hydrological station in Delingha, Qaidam Basin

依据日值数据,计算得到月值和年值数据。本次研究采用线性回归分析方法 [16,17] 和 Mann-Kendall (简称为 M-K) [18-20] 突变检验分析方法对德令哈的气象和水文数据进行了分析。线性回归分析采用软件 Past4.12b 计算获得 Pearson 相关系数 r 和显著性水平 p 值。M-K 突变检验分析采用 R 软件(版本 4.1.0)和代码(包含 trend、tidyverse、ggplot2、readxl 等包)。为进一步查明青藏高原东北部的气候变化特征,本次研究还搜集了一些青藏高原东北部托素湖、尕斯库勒湖和青海湖的湖面变化资料以及柴达木盆地的植被变化资料。

2 结果与讨论

2.1 德令哈站的气候变化

德令哈气象站记录的气温变化结果显示,1956—2022 年的平均气温为 4.1°C ,且气温呈明显的上升趋势,速率为 $0.45^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (图 2a);7 月气温最高,为 16.88°C ,1 月气温最低,为 -11°C (图 2b)。

为了获得温度的季节变化情况,我们计算出了各个季节的温度变化。季节划分如下:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。降水量和水文站平均流量的季节变化也按这种季节划分方法。各个季节的增温幅度表现出明显的差异,冬季升温最快,速率为 $0.75^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (图 2f),其次为秋季,速率为 $0.46^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ (图 2e),与全年的升温速率最接近。夏季和春季的增温速率相对较慢(图 2c 和 2d)。李永顺和余倩 [21] 利用德令哈国家基本气象站 1981—2016 年的气温数据进行统计分析,结果显示平均气温升高速率为 $0.48^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,各季节平均气温上升幅度最快的是春季和冬季,与本次统计得到的 1956—2022 年四季平均气温上升幅度最快的是冬季和秋季存在差别。图 2c 和 2d 显示,大约在 1995 年以后德令哈平均气温显著变高,特别是春季和夏季。理论上来说,统计时段更长,得到的结果更接近气候变化的基本态 [22,23],从而更利于探究气候变化的规律。由于本次研究的统计时段长达 67 年,所以得到的规律较可靠。

降水记录显示德令哈站自 1956—2018 年的年均降水量为 183.4 mm,呈增多趋势,倾向率为 $26.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图 3a);6—8 月降水最多,占全年降水的 62%,11—12 月降水最少,仅占全年降水的 2%(图 3b)。降水的季节变化结果显示,四个季节的降水均呈增加趋势,夏季降水增加最多,为 $17.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图 3d);春季和秋季次之,约为 $4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图 3c 和 3e);冬季降水增加最少,为 $1.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图 3f)。前人研究表明,1956—2013 年全年及各个季节的降水量呈显著上升趋势,年降水量增加速率为 $21.16 \text{ mm}/10 \text{ a}$,夏季降水量增加趋势明显,速率为 $12.35 \text{ mm}/10 \text{ a}$ [24]。本次研究计算的 1956—2018 年全年和夏季降水的增加速率均高于 1956—2013 年的增加速率。

2.2 德令哈站的水文变化

水文站的流量监测直接反映河流所在流域的水文状况。德令哈水文站的平均流量记录表明,1960—2020 年的平均流量的均值为 $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$,呈增加趋势,增速为 $1.03 \text{ m}^3/\text{s}/10 \text{ a}$ (图 4a)。6—9 月的平均流量最高,占全年的 55%(图 4b)。夏季的平均流量呈增加趋势,速率为 $2.89 \text{ m}^3/\text{s}/10 \text{ a}$ (图 4d);秋季的平均流量也呈增加趋势,速率为 $1.34 \text{ m}^3/\text{s}/10 \text{ a}$ (图 4e)。然而,春季和冬季的平均流量呈减小趋势,速率分别为 $-0.08 \text{ m}^3/\text{s}/10 \text{ a}$ (图 4c)和 $-0.04 \text{ m}^3/\text{s}/10 \text{ a}$ (图 4f)。

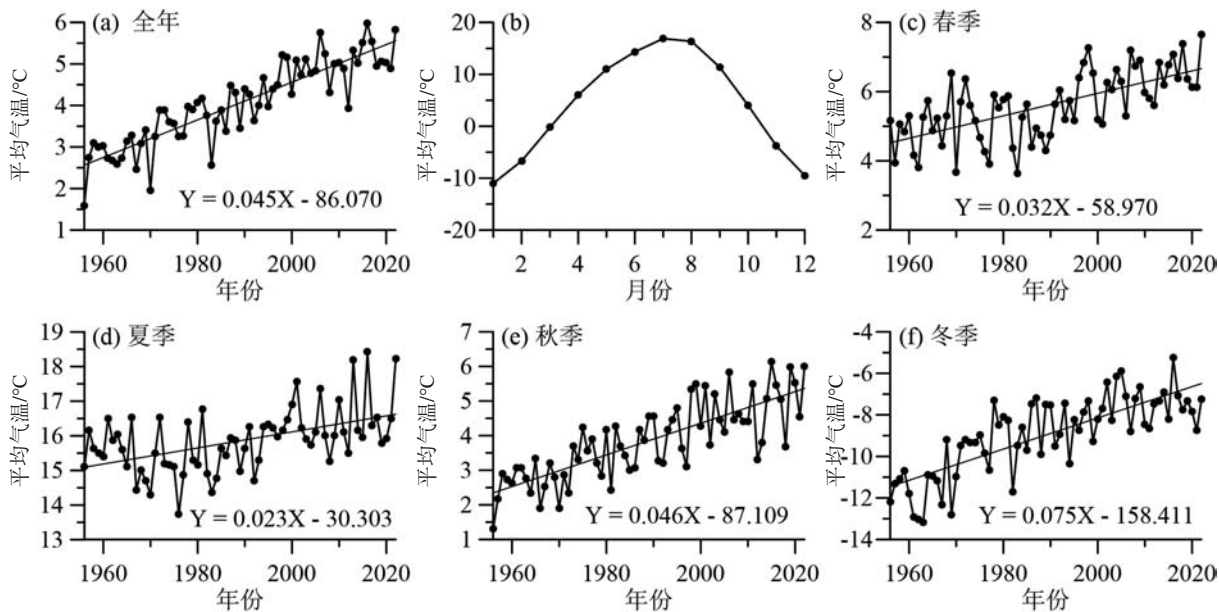


图2 1956—2022年德令哈气温的年际变化、月平均气温和气温的季节变化特征

Fig. 2 The annual variations, mean monthly temperature and seasonal variations of air temperature in Delingha during 1956—2022

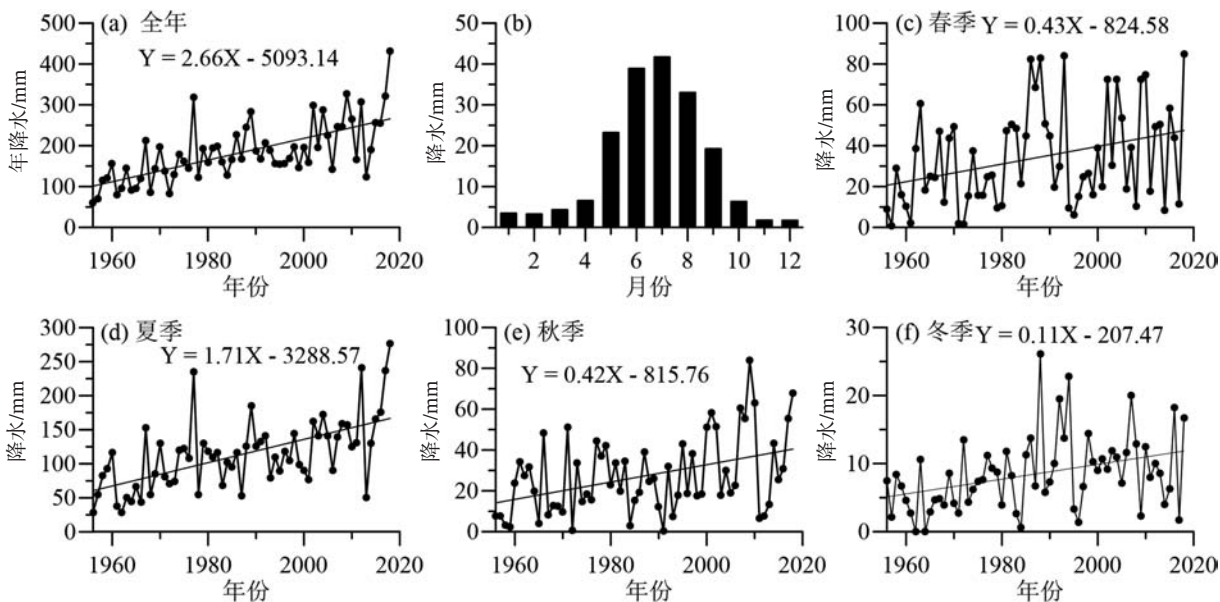


图3 1956—2018年德令哈降水的年际变化、月平均降水和降水的季节变化特征

Fig. 3 The annual variations, mean monthly precipitation and seasonal variations of precipitation in Delingha during 1956—2018

德令哈水文站的平均流量分别与该区气象站观测到的降水量和平均气温进行了对比,结果表明平均流量和降水量关系密切($r=0.74$)(图5a),平均流量和平均气温也呈正相关关系($r=0.31$)(图5b)。值得注意的是,平均流量和平均气温虽然整体表现为增加的趋势,但是在1964—1983年间,温度升高,平均流量却是减小的。1990—2000年,气温保持上升阶

段,而平均流量是过去60多年中最低的(图5b)。因此,气温和平均流量的关系较为复杂。

M-K 突变检验是一种常用的检测气候和水文突变的方法,通过对交点进行判断,检测气候和水文是否存在突变。M-K 突变检验为非参数统计检验方法,不受个别异常值的干扰,能够客观地显示样本序列的整体变化趋势^[25]。本次研究采用该方法对

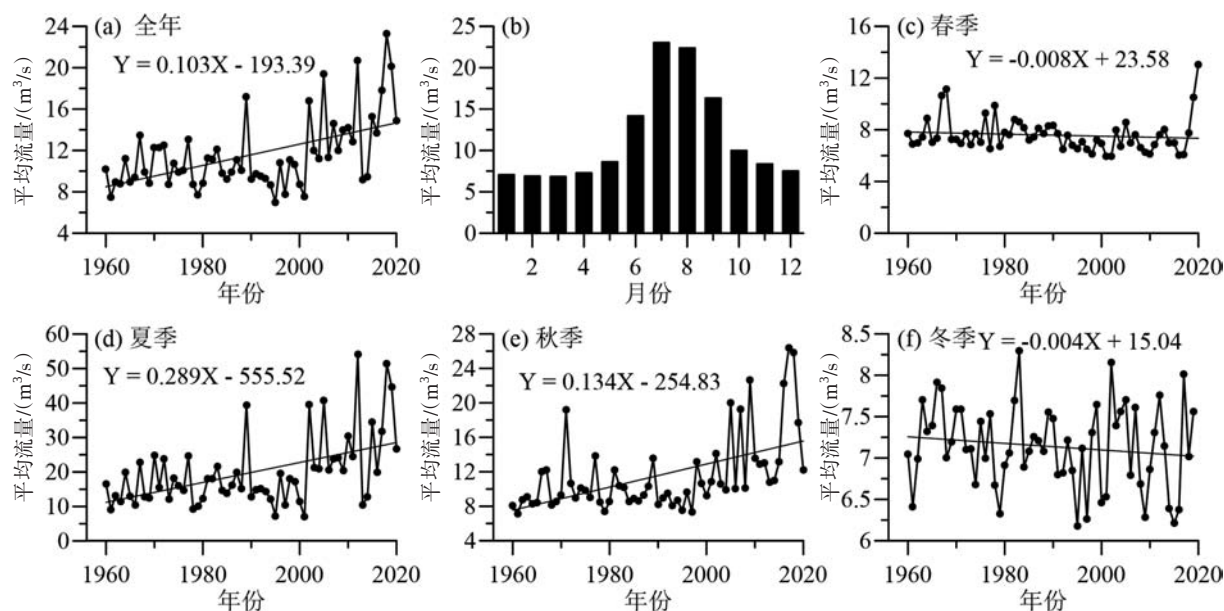


图4 1960—2020年德令哈水文站平均流量的年际变化、月平均流量和平均流量的季节变化特征

Fig. 4 The annual variations, mean monthly discharge and seasonal variations of discharge in Delingha during 1960—2020

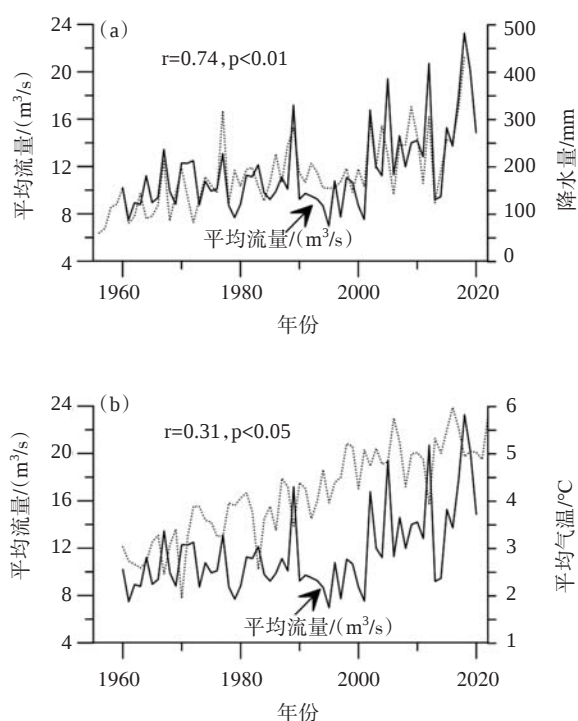


图5 德令哈60多年来的平均流量和气温及降水的变化

Fig. 5 Variations between the average discharge, temperature, and precipitation over the past 60 years in Delingha

1956—2018年的降水数据和1960—2020年水文站的平均流量数据进行突变检验分析。在M-K突变检验中,统计量 UF 表示第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数的标准化数值($1 \leq j \leq i$),而统计量 UB 表示反向统计量的标准化值^[26]。选取的置信区间为

$U \in [-1.96, 1.96]$,若统计量 $UF > 0$,表明序列为增大趋势, $UF < 0$ 则为减小趋势;若统计量 UF 的数值超过置信区间,则存在明显的变化趋势, $UF > 1.96$ 为明显增大趋势, $UF < -1.96$ 为明显减小趋势。此外,如果 UF 和 UB 交点位于置信区间,则表明存在突变点;若交点位于置信区间外,则表明不存在突变点。

结果表明,年降水量自1956年以后($UF > 0$)一直处于增加的趋势,在1975年($UF > 1.96$)呈明显上升趋势; UF 和 UB 虽然在1976—1979年存在3个交点,但均位于置信区间外,故不存在突变点(图6a)。年平均流量在1964—1993年和2005年之后($UF > 0$)呈上升趋势,2015年后($UF > 1.96$)呈明显的上升趋势; UF 和 UB 存在交点,对应年份为2009年,且位于置信区间内,故存在突变点(图6b)。2009年前后平均流量发生了很大的变化,1960—2008年平均流量为 $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$,低于2010—2020年的平均流量 $15.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1956—2003年蒸发量的年际变化波动剧烈,尽管在1973—1980年蒸发量较大(超过 2300 mm),但整体上呈现减小的趋势,速率为 $-107 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (图7a)。影响蒸发的主要因素有温度、日照时数和风速等^[27],此外,湿度、大气压力、水面或植被覆盖和降水量等也会对蒸发产生影响。这些因素相互作用,影响着蒸发的速率和强度。理论上,温度升高会导致蒸发量也升高。然而,在现实中伴随着气温上升蒸发量却减少,这种水文气候现象被称为“蒸发悖论”^[28],导致这种现象的出现可能是因为风速的降低和日照时

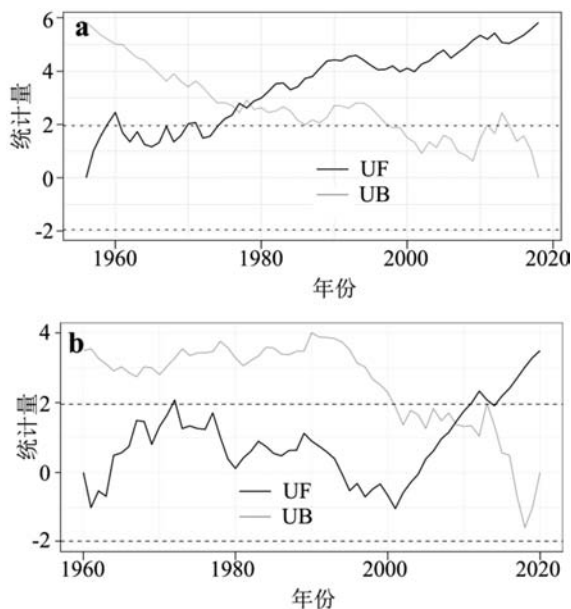


图6 Mann-Kendall突变检验分析,a—德令哈年降水量突变检验;b—德令哈平均流量突变检验

Fig. 6 Results of Mann-Kendall test. a—result of annual precipitation in Delingha; b—result of average discharge in Delingha

数的减少^[29]。

通过对比德令哈气象站的蒸发量、平均风速和日照时数,发现年蒸发量和平均风速(图7b)具有高度一致的变化趋势($r=0.74, p<0.01$)。此外,日照时数整体上也呈降低趋势(图7c)。日照时数的降低可能与能见度降低、云量增厚、气溶胶增加有关^[30,31],从而对蒸发量的降低也产生影响。因此,本次研究结果显示影响德令哈气象站的蒸发量的主要因素可能是平均风速,日照时数对其的影响次之。

2.3 德令哈及柴达木盆地湿润指数的变化

本次研究的蒸发量数据只统计到了2003年,这是因为采用小型蒸发器(E-601,直径为20 cm)进行

连续观测只能持续到2003年底,2004年之后大型蒸发器(E601-B,面积为3 000 cm²)也用于观测,且在一年内交替使用两种蒸发器。由于两种蒸发器测量的蒸发量存在显著差异,且柴达木盆地小型蒸发量(小型蒸发器观测的蒸发量)和大型蒸发量(大型蒸发器观测的蒸发量)的数学关系不明确,所以本次研究的蒸发量数据只统计到2003年。

湿润指数(K)为降水量(P)和蒸发量(EVP)的比值($K=P/EVP$),表征区域缺水的程度; $K<0.05$ 为极端干旱区, $0.05<K<0.2$ 为干旱区^[32,33]。德令哈气象站的 K 小于0.2,为典型的干旱区;1956—2003年 K 值呈升高趋势(图8a),反映出该时间内湿润程度有所增加。

此外,本次研究还统计了柴达木盆地1959—2003年6个气象站(茫崖、冷湖、大柴旦、德令哈、格尔木、都兰站) K 的平均值, $K<0.08$,也呈现上升的趋势(图8b)。德令哈站和柴达木盆地6个站点的 K 值均呈现上升的趋势,表明柴达木盆地往湿润化方向发展。

2.4 湖面扩张、植被变绿指示的青藏高原东北部气候暖湿化

本次研究的数据和之前的气象观测资料^[34,35]表明,过去60多年德令哈及其所在的柴达木盆地气温上升,变暖已毋庸置疑。

变湿的一个显而易见的结果就是湿润指数 K 值升高、湖水上涨及植被覆盖度增加。如上所述, K 值整体升高,表明气候往湿润方向发展。

气候变湿可导致封闭湖泊的水位上升。柴达木盆地托素湖的面积自2004年以后开始扩张(图8c),尕斯库勒湖(位于托素湖东边54 km处)的面积(图8d)自

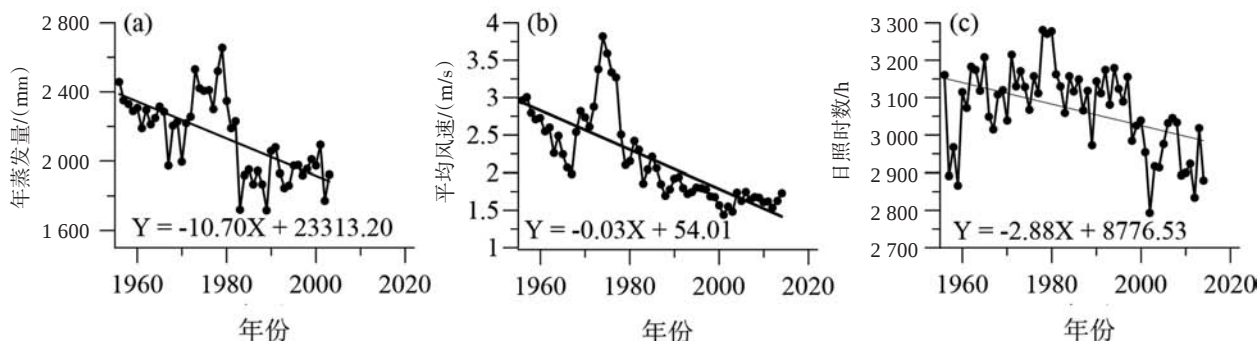


图7 德令哈气象站记录的历年的蒸发量、平均风速和日照时数

Fig. 7 Evaporation, mean wind speed and sunshine hours recorded by Delingha meteorological station over the past years

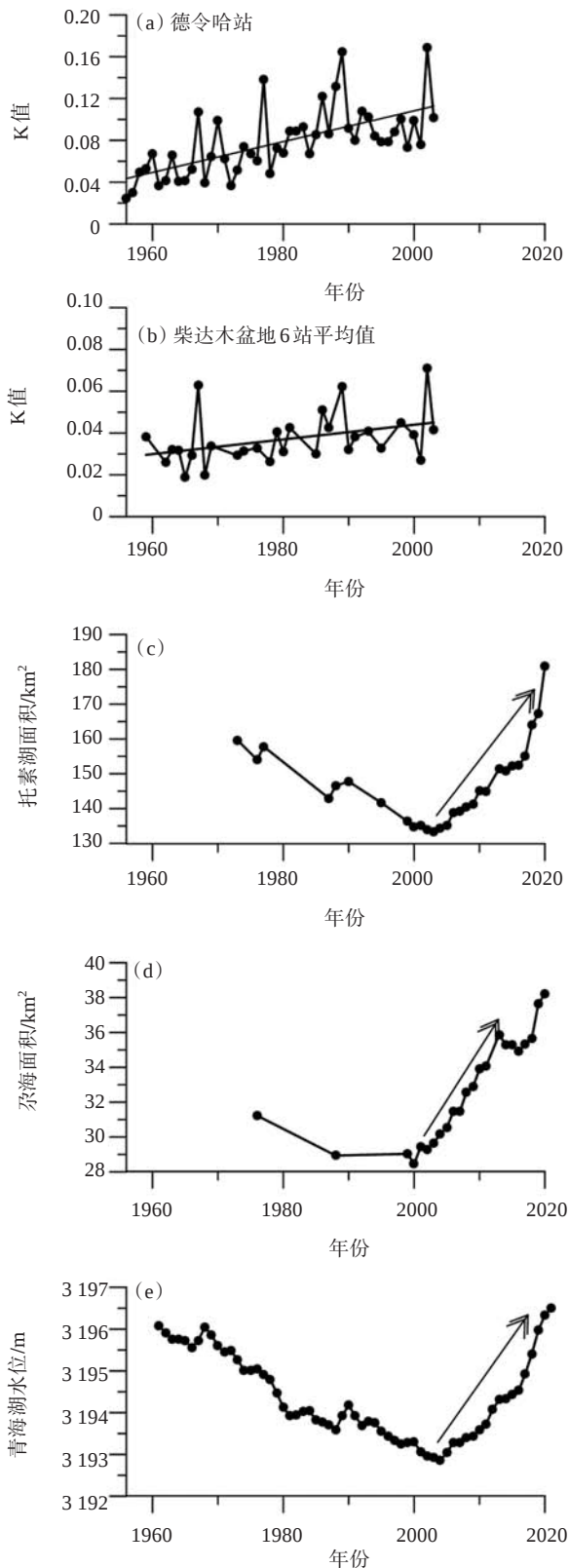


图8 K值(湿润指数)的变化以及托素湖、尕斯海和青海湖湖面变化

Fig. 8 Variations of K value (moist index) and lake level changes of Tuosu Lake, Gahai Lake and Qinghai Lake on the northeastern Qinghai-Xizang Plateau

2003年以后开始扩张^[36],青藏高原东北部青海湖的水位(图8e)自2005年以后开始上涨(青海湖的水位数据来自青海省水文水资源测报中心)。湖面扩张和水位上升表明进入湖泊的总水量处于增加状态,很可能指示了气候变湿。未来这些湖泊的水位是否还会进一步上升,需持续地观测。

植物对气候变化具有灵敏的响应^[37]。气候湿润可以造成植被往好的方向发展。尽管柴达木盆地植被覆盖程度总体较差,NDVI(归一化差异植被指数)数值仅为0.12~0.18。但2000年以来植被覆盖程度总体呈变好趋势,明显改善区主要集中在盆地周边的高山区^[38]。MODIS-NDVI数据显示柴达木盆地2000—2015年植被覆盖度明显改善^[39]。2001—2021年,柴达木盆地66%的区域NDVI呈波动增加趋势,显著增加区域占53%。柴达木盆地地表绿度改善的主要原因可能是降水量增多引起的气候“暖湿化”^[40]。综上,柴达木盆地植被覆盖度的增加是对区域气候“暖湿化”响应的结果。

柴达木盆地乃至青藏高原东北部气候暖湿化之后,短期内会使区域植被得到改善,在某种程度上也有利于生态环境的改善。然而,气候暖湿化也造成了湖面上涨,导致环湖公路被淹,旅游观光和交通运输受到影响。此外,青藏高原东北部冰川和冻土继续消融之后会给研究区的气候和生态环境造成的影响也是未知的。因此,青藏高原东北部气候暖湿化将如何进一步影响该区的生态环境演变和经济发展值得高度关注。

3 结 论

(1) 1956—2022年,德令哈的气温快速上升,倾向率为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;冬季升温最快,达 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其次为秋季,速率为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,与全年的升温速率最接近。1956—2018年,德令哈的降水也呈显著上升趋势,增速为 $26.6\text{ mm}/10\text{ a}$;夏季降水增加最多,为 $17.1\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

(2) 1960—2020年,德令哈水文站的平均流量呈显著增加趋势,增加速率为 $1.03\text{ m}^3/\text{s}/10\text{ a}$;夏季增加速率最快,为 $2.89\text{ m}^3/\text{s}/10\text{ a}$ 。平均流量主要受控于降水量、气温,在2009年发生突变。

(3) 1956—2003年德令哈的蒸发量变化总体呈下降趋势;平均风速的降低很可能是影响蒸发量下降的主要因素。

(4) 德令哈及其所在的柴达木盆地的湿润指数(K)呈升高趋势,托素湖、尕斯库勒湖和青海湖的湖面扩张以及柴达木盆地植被覆盖度的增加共同指示了青藏高原东北部60多年来气候的暖湿化特征。本次研究结果对揭示青藏高原东北部的气候和水文变化的特征具有指导意义。

参考文献:

- [1] Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, *et al.* Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1158-1162.
- [2] Li L H, Zhang Y, Zhou T J, *et al.* Mitigation of China's carbon neutrality to global warming [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5315.
- [3] Zhang Z S, Jansen E, Sobolowski S P, *et al.* Atmospheric and oceanic circulation altered by global mean sea-level rise[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16: 321-327.
- [4] Liu J, Milne R I, Zhu G-F, *et al.* Name and scale matter: Clarifying the geography of Tibetan Plateau and adjacent mountain regions[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 215: 103893.
- [5] Chen H, Zhu Q, Peng C H, *et al.* The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [6] 马转转, 张明军, 王圣杰, 等. 1960—2015年青藏高原高寒区与西北干旱区升温特征及差异[J]. *高原气象*, 2019, 38(1): 42-54.
- [7] You Q, Cai Z, Pepin N, *et al.* Warming amplification over the Arctic Pole and Third Pole: Trends, mechanisms and consequences[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103625.
- [8] 王绍令, 赵秀锋, 郭东信, 等. 青藏高原冻土对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊): 157-165.
- [9] 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J]. *自然杂志*, 2010, 32(1): 4-8.
- [10] 赵金鹏. 1961—2016年青藏高原极端气候事件变化特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [11] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.
- [12] 晏利斌. 1961—2014年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(5): 276-282.
- [13] 陈富洪, 易磊, 张荣, 等. 格尔木河地表径流的趋势和突变特征分析[J]. *盐湖研究*, 2021, 29(4): 30-42.
- [14] 时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地40多年来的气候变化研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 125-130.
- [15] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 136-144.
- [16] Diskin M H. Definition and Uses of the Linear Regression Model[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(6): 1668-1673.
- [17] Asuero A G, Sayago A, González A G. The correlation coefficient: An overview[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2006, 36(1): 41-59.
- [18] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [19] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. New York: Hafner, 1962.
- [20] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 172-182.
- [21] 李永顺, 余倩. 近36年德令哈地区气温变化特征及突变分析[J]. *青海气象*, 2018, (1): 24-29.
- [22] Wang X L, Ropelewski C F. An assessment of ENSO-scale secular variability[J]. *Climate*, 1995, 8(6): 1584-1599.
- [23] 王永波, 张治, 周秀杰. 哈尔滨气温的长期变化及基本态特征[J]. *高原气象*, 2012, 31(2): 492-497.
- [24] 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.
- [25] 李净, 刘红兵, 李彩云, 等. 基于GIMMS 3g NDVI的近30年中国北部植被生长季始期变化研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(4): 620-629.
- [26] 杨素英, 王谦谦, 孙风华. 中国东北南部冬季气温异常及其大气环流特征变化[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(3): 334-344.
- [27] 顾人颖, 周锁铨, 宋洁, 等. 江西省近46年蒸发皿蒸发量变化特征及其影响因素分析[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(3): 388-394.
- [28] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [29] 蒋冲, 王飞, 刘思洁, 等. "蒸发悖论"在秦岭南北地区的探讨[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 844-855.
- [30] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(7): 2425-2432.
- [31] 肖风劲, 张旭光, 廖要明, 等. 中国日照时数时空变化特征及其影响分析[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(20): 92-100.
- [32] Huang L X, Chen J, Yang K, *et al.* The northern boundary of the Asian summer monsoon and division of westerlies and monsoon regimes over the Tibetan Plateau in present-day [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66: 882-893.
- [33] Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(1): 61-64.
- [34] 吴双桂, 韩廷芳. 柴达木腹地气温与地表温度变化相关分析[J]. *青海农技推广*, 2019, (4): 43-47.
- [35] 李远平, 杨太保. 柴达木盆地近50年来年气温、降水的小波分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(5): 708-713.
- [36] Zhang X, Chen J, Chen J, *et al.* Lake expansion under the groundwater contribution in Qaidam Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1756.
- [37] 胡植, 王焕炯, 戴君虎, 等. 利用控制实验研究植物物候对气候变化的响应综述[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9119-9129.
- [38] 夏薇. 柴达木盆地植被覆盖的动态变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [39] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 等. 2000-2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J]. *干旱区地理*, 2019, 42

(5):1124-1132.

度变化及地形分异研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6):

[40] 曹晓云, 祝存兄, 陈国茜, 等. 2000-2021年柴达木盆地地表绿

1080-1090.

Warming and Humidification of Climate on the Northeastern Qinghai-Xizang Plateau Over the Past 60 Years: Evidence from Hydroclimatic Records of Delingha

ZENG Fangming^{1,2*}, DONG Bo^{1,2,3}, ZHANG Xiying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The variation of hydroclimate in the Qaidam Basin has a significant impact on the construction of ecological civilization and development of economic society in this region. In this study, meteorological and hydrological records in Delingha over the past 60 years were analyzed and the results showed that both temperature and precipitation presented a significant upward trend. The warming rate from 1956 to 2022 was 0.45 °C/10 a, and the increase rate of precipitation from 1956 to 2018 was 26.6 mm/10 a. Over the past 60 years, winter temperatures had risen the fastest, reaching 0.75 °C/10 a; summer precipitation increased the most, up to 17.1 mm/10 a. The average discharge of Delingha hydrological station also showed an obvious increasing trend, with an increase rate of 1.03 m³/s/10 a from 1960 to 2020; the fastest increase rate of 2.89 m³/s/10 a occurred in summer. The average discharge is mainly controlled by precipitation, followed by the impact of temperature. The Mann-Kendall test showed that the variation of average discharge had a mutation point in 2009. Although the evaporation from 1973 to 1980 was at a high value, the evaporation from 1956 to 2003 showed a downward trend in general. The average wind speed was probably the main factor affecting evaporation. The moist index (precipitation/evaporation) showed an upward trend, indicating that the climate in Delingha is getting humid over the past 60 years. The rising areas of Gahai Lake, Tuosu Lake, and Qinghai Lake, as well as the increase in vegetation coverage in the Qaidam Basin, further confirm the humidification and warming of the climate on the northeast Qinghai-Xizang Plateau.

Key words: Qaidam basin; Northeast Qinghai-Xizang plateau; Temperature; Precipitation; Climate change