

疏勒河与黑河流域气候变化特征及其差异

王铃清¹, 张文军², 于亚楠², 王丹³, 常佳⁴, 赵彦琴³, 谢小平³

¹金塔县鼎新气象站, 甘肃 酒泉

²酒泉市气象局, 甘肃 酒泉

³金塔县气象局, 甘肃 酒泉

⁴玉门市气象局, 甘肃 酒泉

收稿日期: 2022年12月26日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月30日

摘要

利用1970~2019年疏勒河与黑河流域共12个地面观测站的气温、降水等逐日观测资料, 采用一元线性回归、克里金插值、Mann-Kendall法等方法对疏勒河和黑河流域气候变化特征进行分析, 结果表明: 1) 两流域气温和降水的时间变化均呈上升趋势。2) 两流域气温和降水空间分布分别呈西高东低、东多西少的特征。3) 疏勒河流域气温和降水量均与海拔呈负相关、与经度和纬度呈正相关; 黑河流域气温与海拔呈负相关、与经度和纬度呈正相关, 降水量与海拔和经度呈正相关、与纬度呈负相关。4) 近50年来, 两流域气温发生突变的时间均为1994年; 疏勒河流域降水量突变开始时间为1970和2019年, 黑河流域为2012年。5) 两流域的极端高温指数呈上升趋势, 持续干燥指数呈显著下降趋势; 疏勒河流域容易发生极端高温事件、出现旱情, 黑河流域更容易发生极端低温和极端降水事件。

关键词

气候变化, 黑河, 疏勒河

Characteristics and Differences of Climate Change in Shule River Basin and Heihe River Basin

Lingqing Wang¹, Wenjun Zhang², Yanan Yu², Dan Wang³, Jia Chang⁴, Yanqin Zhao³, Xiaoping Xie³

¹Jinta Dingxin Meteorological Station, Jiuquan Gansu

²Jiuquan Meteorological Bureau, Jiuquan Gansu

³Jinta Meteorological Bureau, Jiuquan Gansu

⁴Yumen Meteorological Bureau, Jiuquan Gansu

Received: Dec. 26th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 30th, 2023

文章引用: 王铃清, 张文军, 于亚楠, 王丹, 常佳, 赵彦琴, 谢小平. 疏勒河与黑河流域气候变化特征及其差异[J]. 自然科学, 2023, 11(1): 125-138. DOI: 10.12677/ojns.2023.111015

Abstract

Based on the daily observation data of temperature and precipitation of 12 ground stations in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019, the characteristics of climate change in Shule River and Heihe River basins are analyzed by using linear regression, Kriging interpolation, Mann Kendall method, etc. The results show that: 1) The temporal changes of temperature and precipitation in the two basins show an increasing trend. 2) The spatial distribution of air temperature in the two basins is high in the west and low in the east, and the precipitation is more in the east and less in the west. 3) The temperature and precipitation in Shule River basin are negatively correlated with altitude, positively correlated with longitude and latitude; the temperature in the Heihe River basin is negatively correlated with altitude, positively correlated with longitude and latitude, and the precipitation is positively correlated with altitude and longitude, negatively correlated with latitude. 4) In the past 50 years, the abrupt change in temperature in both basins occurred in 1994; the abrupt change in precipitation in the Shule River basin started in 1970 and 2019, and in the Heihe River basin in 2012. 5) The extreme high-temperature index of the two basins shows an upward trend, and the continuous drying index shows a significant downward trend; the Shule River basin is prone to extreme high-temperature events and drought, and the Heihe River basin is more prone to extreme low-temperature and extreme precipitation events.

Keywords

Climate Change, Heihe River, Shule River

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变化是指长时期内气候状态的变化。通常用不同时期的温度和降水等气候要素的统计量的差异来反映。20 世纪以来, 随着工业和经济的迅速发展, 全球气候发生了显著的变化, 全球变暖的趋势已经得到国内外许多科学家研究证实[1]。在全球变暖大背景下, 我国温度总体呈现显著上升趋势, 平均增温速率为 $0.278^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 北方地区升温幅度大于南方地区, 降水量则在西北和东南地区呈现增多趋势, 在东北—西南向的生态过渡带附近区域有减小趋势, 总体上, 近年来中国经历了一个以暖湿化为主要特征的气候变化过程, 特别是在西北干旱区[2]。为了探究极端事件的气候特征及变化规律, 国内外许多学者利用不同方法、指标对气温、降水等要素做了大量研究, 不同程度上得出其研究区域内极端事件的变化规律及其对社会经济的影响[3]-[8]。疏勒河与黑河流域分别位于河西走廊西部和中部, 对河西地区工农业发展有着非常重要的作用, 其地域跨度广、气候差异大, 诸多学者对两流域的气候变化进行了分析。贾玲等[9]探讨了 1951~2018 年疏勒河流域最高、最低气温的变化规律; 陈娜娜等[10]对疏勒河流域气温、降水、径流演变特征及径流影响因素进行了研究; 郭昆明等[11]分析了黑河流域 1960~2015 年气温时空变化特征。虽然学者们已经分别对疏勒河与黑河流域的气候变化特征进行了一定的研究, 但都没有具体针对疏勒河和黑河流域气候变化特征进行深入探讨, 研究的时间序列较短, 站点代表性不足, 种种因素导致研究中对疏勒河和黑河流域气候变化特征认识尚不透彻。本文选取了疏勒河和黑河流域具有代表性的、典型的多个站点资料, 针对性地研究其区域内的气候变化特征, 并将两个流域的特征进行对比, 探讨两

地气候变化差异,对疏勒河和黑河流域气候变化进行较为全面、准确的研究,并使用极端气候指数评估其极端气候的变化特征,以此希望为疏勒河和黑河流域及周边地区应对未来气候变化、防灾减灾、合理利用水资源发展经济农业提供可靠的参考资料。

2. 研究区概况

黑河流域是我国西北地区第二大内陆流域,位于河西走廊中部,为甘蒙西部最大的内陆河流域。黑河流域位于欧亚大陆中部,远离海洋,周围高山环绕,流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中,多大风,日照充足,太阳辐射强烈,昼夜温差大。黑河流域的战略地位十分重要,是张掖市、临泽县、高台县及下游金塔东部和额济纳旗绿洲等地城市工业、生活用水的主要水源,也是河西地区农业引水灌溉的主要灌溉区之一。黑河两岸山崖陡峻,岩石裸露,地形狭窄,水流湍急,峡谷长约 95 公里,河道平均比降 9.1‰,干流年径流总量为 15.96 亿立方米,因此,也是调蓄工程、水电工程的集中建设区域[12]。

疏勒河是甘肃省河西走廊内流水系的第二大河,流域面积 20197 平方公里,位于甘肃省西北部,河西走廊西段。发源于祁连山脉西段托来南山与疏勒南山之间的疏勒脑,西北流经肃北县的高山草地,贯穿大雪山到托来南山间峡谷,过昌马盆地。上游祁连山区降水较丰,冰川面积达 850 平方千米,多高山草地,为良好牧场。中、下游地势低平,玉门镇、瓜州、敦煌和赤金—花海诸绿洲的灌溉农业发展迅速。疏勒河流域主要位于区疏勒河中下游冲积平原和祁连山北麓洪积倾斜平原上,是河西走廊内海拔最低、气温最高、太阳辐射最强、日照时数最长、年降水量最少、年平均风速最大和 ≥ 8 级大风日数最多的地区。疏勒河在史前曾注入新疆罗布泊,由于气候变化和人类活动的影响,今尾间已退缩到瓜州西湖一带。是瓜州农业生产、城镇工业和人民生活用水的水源。也是肃北和敦煌二县市工农业生产及人畜用水的可靠水源[13]。

3. 数据与方法

3.1. 数据来源

本文所用数据由气象大数据云平台天擎系统提供。此次研究中选取数据为 1970~2019 年疏勒河和黑河流域共 12 个国家地面观测站的逐年、逐月平均气温、降水量等地面观测数据。在使用前对各站点数据进行检验处理、过滤筛选,对个别缺漏数据进行插补,提高数据质量,减小因数据质量对结果产生的误差。各站地理位置及信息见图 1 和表 1。

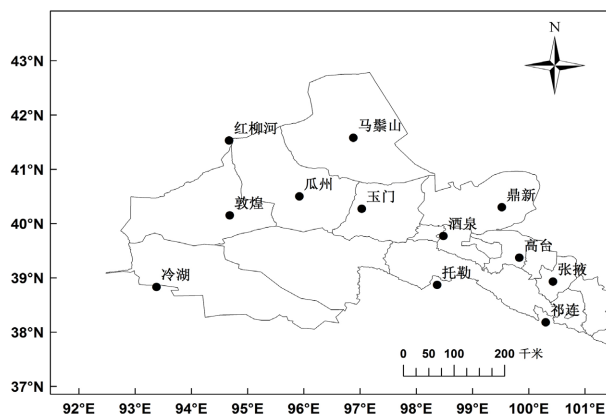


Figure 1. Schematic diagram for selection and distribution of meteorological stations in Shule River and Heihe River basins
图 1. 疏勒河与黑河流域气象站点选取分布示意

Table 1. Relevant data of meteorological stations selected for Shule River and Heihe River basins**表 1.** 疏勒河与黑河流域选取气象站点相关数据

台站	黑河流域							疏勒河流域				
	鼎新	高台	张掖	酒泉	托勒	祁连	瓜州	玉门	敦煌	马鬃山	红柳河	冷湖
经度/(°)E	99.52	99.83	100.43	98.48	98.37	100.3	95.92	97.03	94.68	96.88	94.67	93.38
纬度/(°)N	40.3	39.37	38.93	39.77	38.87	38.31	40.5	40.27	40.15	41.58	41.53	38.83
海拔/m	1177.4	1332.2	1482.7	1477.2	3360.3	2787.4	1170.8	1526	1138.7	1962.7	1700.0	2733.0

3.2. 研究方法

3.2.1. 回归分析

本文通过一元线性回归法对疏勒河和黑河流域的气温和降水量的时间变化特征进行研究。公式为：

$$y = a + bx_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 y_i 为某一地区的气温或降水量； x_i 为 y_i 所对应的时间； a 为截距； b 是回归系数，即气温或降水量的线性变化趋势，当 $b > 0$ 时，气温或降水量随时间的变化有上升的趋势，当 $b < 0$ 时，气温或降水量随时间的变化有下降的趋势。

3.2.2. 空间插值

反距离加权插值法和克里金插值法是用来研究气候要素空间变化特征常用的空间插值法。本文使用反距离加权插值法对两个流域的气温进行空间对比分析，使用普通克里金插值法对两个流域的降水量进行对比分析。

反距离加权插值法是以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均，较近的数据点被给定一个较高的权重份额，较远的数据点权重比较均匀地分配。公式为：

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i \cdot w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

式中 z 是站点估计值； n 是站点数量； z_i 是第 i 个站点实测值； w_i 为第 i 个站点权重系数。

克里金插值法又称空间局部插值法，是在有限区内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。公式为：

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

式中 z 是估算点的气象值， n 是插值点的数目， λ_i 是参与插值的站点对估算点气象要素的权重系数，其和等于 1，使估计量的数学期望等于被估计参数，并且使方差小于任意观测值线性组合的方差， x_i 为站点位置[14]。

3.2.3. 突变检验

Mann-Kendall (M-K) 突变检验优点在于不仅计算简便，而且可以明确突变开始的时间，因此十分适合用来判断气候序列中是否存在气候突变。设 t_1, t_2, \dots, t_n 为原始时间序列； r_i 为第 i 个样本 t_i 大于 t_j ($1 \leq j < i$) 的总数，公式则为：

$$d_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (4)$$

d_k 是累计样本总和, k 为样本数量, 均值 $E(d_k)$ 和方差 $Var(d_k)$ 计算公式为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (5)$$

$$Var(d_k) = k(k-1)(2k+5)/12 (2 \leq k \leq n) \quad (6)$$

标准化后:

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{Var(d_k)} (k=1, \dots, n) \quad (7)$$

按照上式计算得到 UF 正序列曲线, 将时间序列按逆序排列, 同样的方法应用到反序列中, 得到 UB 反序列曲线, 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 临界值 $U = \pm 1.96$, 将 UF 与 UB 统计量序列曲线与 $U = \pm 1.96$ 两条直线绘制在一个平面直角坐标系上, 若 UF 或 UB 大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 若小于 0, 则呈下降趋势, 当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著, 超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域, 若两条曲线出现交点, 且交叉点在临界线之间, 它们交叉点对应的的时间便是突变开始的时间[15]。

3.2.4. 极端气候指数

核心极端气候指数共有 27 个, 由日气温和日降水数据计算得出, 具有弱极端性、噪声低、显著性强等特点。综合极端气候指数特征和本文研究区的地理环境特征, 本文选取了较为典型的 4 个极端气温指数和 4 个极端降水指数对疏勒河和黑河流域的极端气候时空变化特征进行了分析(表 2)。

Table 2. Definition of extreme climate index
表 2. 极端气候指数定义

名称/单位	缩写	指数定义
霜日日数/d	FD0	一年中日最低气温 $< 0^\circ\text{C}$ 的日数
夏日日数/d	SU25	一年中日最高气温 $> 25^\circ\text{C}$ 的日数
冷持续指数/d	CSDI	连续 6 日最低气温在 10% 分位值日数
热持续指数/d	WSDI	连续 6 日最高气温在 90% 分位值日数
持续干燥指数/d	CDD	日降水量 $< 1 \text{ mm}$ 的最长连续日数
持续湿润指数/d	CWD	日降水量 $\geq 1 \text{ mm}$ 的最大持续日数
强降水日数/d	R10	每年日降水量 $\geq 10 \text{ mm}$ 的总日数
强降水量/mm	R95p	95% 分位值强降水之和

4. 结果与分析

4.1. 气候时间变化特征分析

从图 2(上)年平均气温线性趋势中可以看出: 1970~2019 年, 疏勒河流域年平均气温线性倾向率呈上升趋势, 变化倾向率为 $0.37^\circ\text{C}/10\text{a}$, 黑河流域年平均气温线性倾向率呈上升趋势, 变化倾向率为 $0.40^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。由表 3 对比分析发现, 虽然两个流域年平均气温变化均呈上升趋势, 但疏勒河流域整体气温比黑河流域高, 平均气温为 6.8°C , 而黑河流域气温上升趋势则更加显著, 这与郭昆明等[12]研究结论一致。

对比年平均气温多项式曲线发现, 疏勒河和黑河流域年平均气温变化有较为一致的变化趋势, 均为波动上升趋势。1970~1978 年和 1995~2010 年多项式曲线在线性趋势线之上, 有较为明显的高值区, 1978~1995 年和 2010~2019 年则有较为明显的低值区。

分析图 2(下)中年总降水量线性趋势可知, 1970~2019 年, 疏勒河流域年总降水量线性倾向率呈上升

趋势,但上升趋势不是很明显,变化倾向率为 0.72 mm/10a,黑河流域年总降水量线性倾向率呈上升趋势,变化倾向率为 8.31 mm/10a,这也与此前的研究结论较为一致[16] [17] [18]。黑河流域年总降水量及其上升趋势均远远大于疏勒河流域,而降水量的增多对河流流量也起到了正反馈的作用[19] [20]。

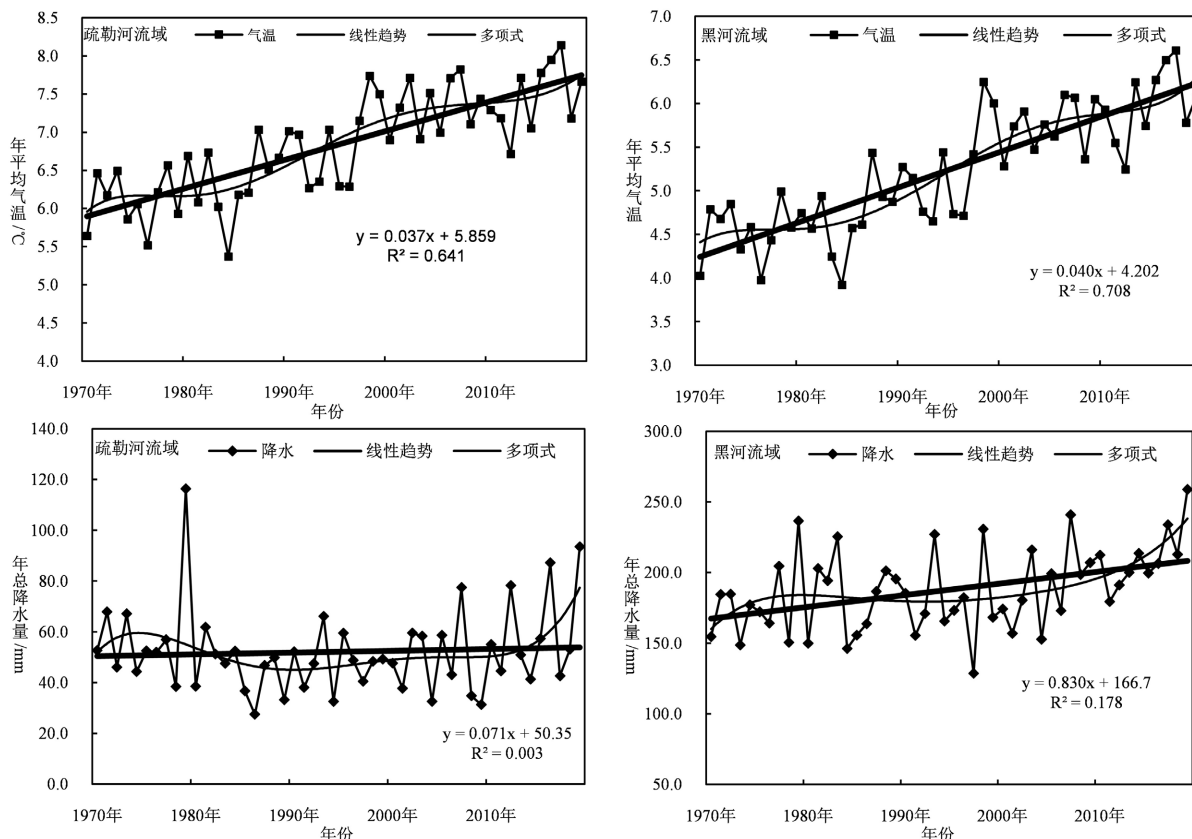


Figure 2. Change trend of climate values in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图2. 1970~2019年疏勒河与黑河流域气候值变化趋势

Table 3. Comparison of change characteristics of annual average temperature and annual total precipitation in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

表 3. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域年平均气温和年总降水量变化特征对比

流域	疏勒河流域	黑河流域
年平均气温/°C	6.8	5.2
年总降水量/mm	52.2	187.9
气温倾向率/(°C/10a)	0.377	0.406
降水倾向率/(mm/10a)	0.717	8.305

结合年总降水量多项式曲线,疏勒河与黑河流域年总降水量有较为一致的变化趋势。1970~1983 年和 2013 年之后,多项式曲线在线性趋势线之上,是两个高值区,1983~2013 年则是一个低值区。

4.2. 气候空间变化特征分析

分析气温空间分布特征发现(图 3(a)),两个流域内气温空间分布总体呈现西高东低的特征,疏勒河流

域年平均气温高于黑河流域。结合地形因素分析发现,随着海拔的降低,两流域内气温呈现上升趋势。疏勒河流域存在一个高温区和两个低温区,高温区位于敦煌、瓜州一带,两地均处于安敦盆地内,受地形影响,夏季炎热,成为高温中心;低温区位于马鬃山和冷湖一带,因地形海拔较高,造成整体气温偏低、冬季严寒、多极端大风等气候特征。

年总降水量空间分析结果表明(图 3(b)),两个流域内降水分布总体呈现东部多、西部少的特点,黑河流域年总降水量远远高于疏勒河流域,黑河流域年降水量为 187.9 mm,而疏勒河流域则只有 52.2 mm,两者相差两到三倍,而在黑河流域中,降水主要集中在中上游地区。

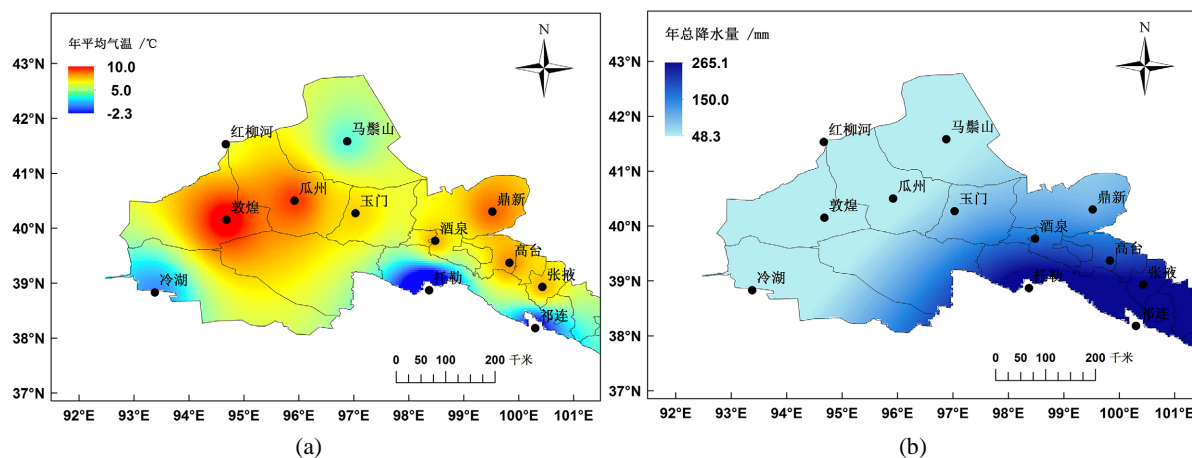


Figure 3. Spatial distribution of climate values in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图 3. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域气候值空间分布

4.3. 气候要素与地理因子的相关性分析

为了探讨疏勒河和黑河流域海拔、经度、纬度对于气候要素的影响,对其之间的相关性进行了分析。结果显示(图 4):疏勒河流域,气温与海拔、经度、纬度之间的相关系数 R 分别为 -0.97 、 0.23 、 0.18 ,降水量与海拔、经度、纬度之间的相关系数 R 分别为 -0.49 、 0.96 、 0.72 ,经 0.05 显著性检验,只有海拔与气温的相关系数较高,经度和纬度与降水量的相关系数较高,海拔与降水量也有一定相关性;黑河流域,气温与海拔、经度、纬度之间的相关系数 R 分别为 -0.99 、 0.31 、 0.67 ,降水量与海拔、经度、纬度之间的相关系数 R 分别为 0.90 、 0.10 、 -0.88 ,经 0.05 显著性检验,海拔和纬度与气温和降水量的相关系数都很高,线性关系十分明显。

疏勒河流域气温与海拔呈负相关,表明随海拔的升高,流域气温呈下降趋势,降水量与海拔呈负相关、与经度和纬度均呈正相关,说明随着海拔的升高,降水量呈下降趋势,且有东高西低、北高南低的特征;黑河流域气温与海拔呈负相关、与纬度呈正相关,可见,气温随海拔的升高而降低、随纬度的升高而升高,降水量与海拔呈正相关、与纬度呈负相关,表示降水量随着海拔的升高而升高、随纬度的升高而降低。

4.4. 气候突变特征

气候突变广义上来讲是气候从某一平均值急剧变化至另一平均值,即气候变化的不连续性,本文将利用 Mann-Kendall (M-K)方法对 1970~2019 年疏勒河和黑河流域年平均气温和年总降水量进行突变检验,将 UF 和 UB 曲线的交点定义为突变点来体现气候突变。

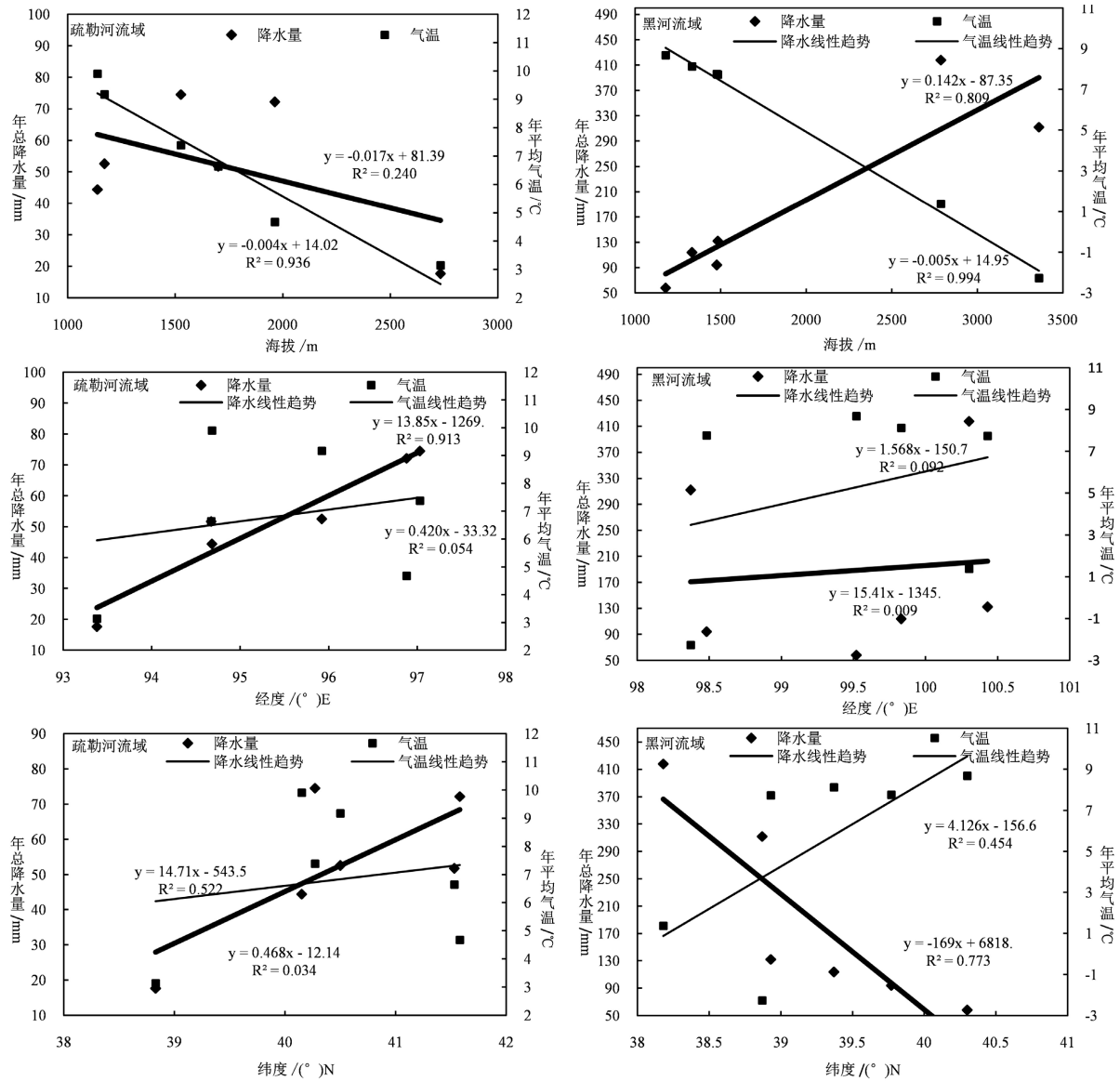


Figure 4. Correlation between climatic factors and geographical factors in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图 4. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域气候因素与地理因子的相关性

图 5 给出了 1970~2019 年疏勒河和黑河流域气候值的突变曲线, 分析年平均气温统计量曲线发现(图 5(上))。

疏勒河流域的 UF 曲线总体呈上升趋势。1970~1985 年波动较为明显, 经历了上升 - 下降 - 上升 - 下降的过程。在 1990 年左右, UF 统计量曲线超过了 0.05 显著水平线, 说明气温上升趋势较为显著。在 1994 年, UF 与 UB 统计量曲线出现了交点, 说明 1994 年为疏勒河流域近 50 年来的气温突变点, 即认为 1994 年为疏勒河流域气温突变开始的时间。

黑河流域总体趋势与疏勒河流域较为相似, 总体呈上升趋势, 在 1970~1985 年呈现上升 - 下降 - 上升 - 下降的波动过程。在 1994 年左右, UF 统计量曲线超过了 0.05 显著水平线, 说明 1994 年以后黑河流域气温上升趋势十分显著。在 1994 年和 1998 年, UF 与 UB 统计量曲线出现了交点, 分析认为 1994

年和 1998 年为黑河流域近 50 年来的气温突变点,即在 1994 年和 1998 年黑河流域气温发生了较为显著的突变,1994 年为黑河流域气温突变开始的时间。

分析年总降水量统计量曲线可知(图 5(下)),疏勒河流域的 UF 曲线总体呈现先下降后上升的趋势,波动较大。1970~1990 年呈总体呈下降趋势,1990~2019 年间总体呈上升趋势。在 1989~1992 年和 1994 年,UF 统计量曲线超过了-1.96 水平线,说明降水量下降趋势较为显著。在 1970、1972 和 2019 年,UF 与 UB 统计量曲线均出现了交点,说明 1970、1972 和 2019 年为疏勒河流域近 50 年来的降水量突变点,分析认为 1970 和 2019 年分别为疏勒河流域降水量两次突变的开始时间。

黑河流域总体呈上升趋势,在 1970~2005 年虽然波动较大,但整体趋势平缓,没有明显上升或下降的趋势,在 2005 年以后有明显的上升趋势。在 2015 年以后,UF 统计量曲线超过了 0.05 显著水平线,说明 2015 年以后黑河流域降水量上升趋势十分显著。在 2012 年,UF 与 UB 统计量曲线出现了交点,表示 2012 年为黑河流域近 50 年来的降水量突变点,即认为从 2012 年黑河流域降水量开始突变。

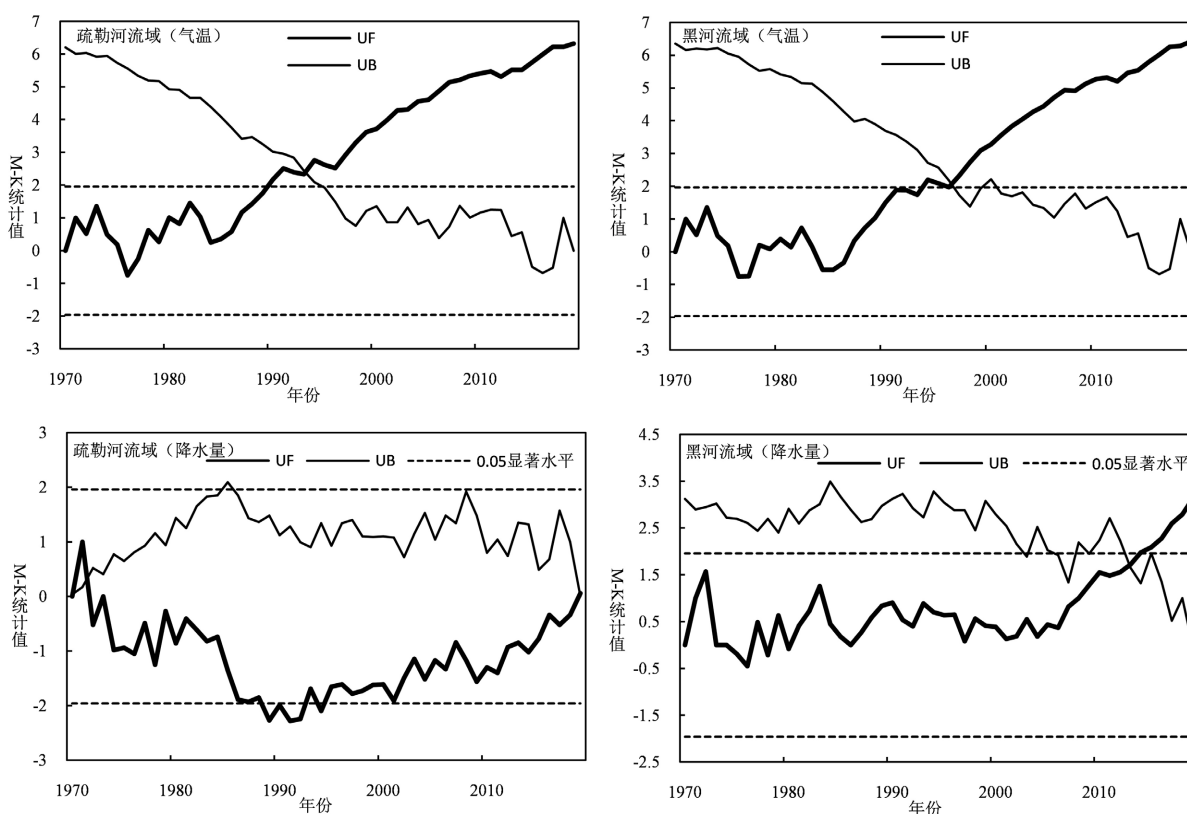


Figure 5. M-K abrupt change test of climatic values in Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图 5. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域气候值 M-K 突变检验

4.5. 极端气候指数特征

图 6 极端气温指数变化趋势可以看出疏勒河流域线性趋势:霜日日数呈下降趋势,变化倾向率为 $-4.10/10a$;冷持续指数呈下降趋势,变化倾向率为 $-1.50/10a$;夏日日数呈上升趋势,变化倾向率为 $5.58/10a$;热持续指数呈上升趋势,变化倾向率为 $2.23/10a$ 。4 个极端气温指数中,夏日日数变化趋势最为明显,呈显著上升趋势,霜日日数的下降趋势也十分显著,热持续指数的上升趋势和冷持续指数的上升趋势都较为平缓。

黑河流域线性趋势：霜日日数呈下降趋势，变化倾向率为 $-4.35/10a$ ；冷持续指数呈下降趋势，变化倾向率为 $-0.47/10a$ ；夏日日数呈上升趋势，变化倾向率为 $3.77/10a$ ；热持续指数呈上升趋势，变化倾向率为 $1.08/10a$ 。4个极端气温指数中，霜日日数变化趋势最为明显，呈明显下降趋势，冷持续指数的下降趋势不明显。

分析多项式曲线发现，疏勒河流域与黑河流域变化趋势十分相似。霜日日数，两流域均在1980~1995年有一个高值区；冷持续指数，1980年左右和2003~2016年为高值区，1985~2003年为低值区，2016年后下降趋势愈加明显；夏日日数，1975~1995年为高值区，1995~2010年为低值区，2010年后略有下降趋势；热持续指数，1980、2000年左右为高值区，1990、2015年左右为低值区，在2015年之后，上升趋势十分显著。

总体来看，疏勒河与黑河流域的极端低温指数总体呈下降趋势，极端高温指数则呈上升趋势，与全球变暖的大趋势相同。疏勒河流域的极端低温指数数值总体低于黑河流域，而极端高温指数数值总体高于黑河流域，说明疏勒河流域更容易发生极端高温事件，而黑河流域更容易发生极端低温事件。

图7极端降水指数变化趋势可以看出疏勒河流域1970~2019年线性趋势：持续干燥指数呈下降趋势，变化倾向率为 $-10.88/10a$ ；持续湿润指数呈下降趋势，变化倾向率为 $-0.05/10a$ ；强降水日数呈上升趋势，变化倾向率为 $0.02/10a$ ；强降水量呈下降趋势，变化倾向率为 $-0.25/10a$ 。4个极端降水指数中，只有持续干燥指数呈显著下降趋势，其他指数的变化趋势并不十分显著。

黑河流域1970~2019年线性趋势：持续干燥指数呈下降趋势，变化倾向率为 $-8.80/10a$ ；持续湿润指数呈下降趋势，变化倾向率为 $-0.02/10a$ ；强降水日数呈上升趋势，变化倾向率为 $0.28/10a$ ；强降水量呈上升趋势，变化倾向率为 $3.95/10a$ 。4个极端降水指数中，持续干燥指数变化倾向率最大，呈显著下降趋势，强降水量呈较为明显的上升趋势，持续湿润指数和强降水日数线性变化趋势不明显。

分析多项式曲线发现：疏勒河流域和黑河流域持续干燥指数变化趋势很相似，下降趋势很明显，1975、1995、2015年左右均有小的低值区，以20年为一个周期波动下降；两流域在强降水日数和强降水量变化趋势中有较为一致的低值区，而在2008年左右的低值区之后均呈显著上升趋势。

总体来看，疏勒河与黑河流域持续干燥指数呈显著下降趋势，持续湿润指数和两个强降水指数虽然总体没有较明显的上升趋势，但在2008年的低值区之后均突变为较为显著的上升趋势，说明2008年之后，疏勒河与黑河流域降水有明显增多，气候更加湿润。疏勒河流域的持续干燥指数数值总体高于黑河流域，而持续湿润指数和两个强降水指数数值总体低于黑河流域，说明黑河流域更容易发生极端降水事件，而疏勒河流域则更易出现旱情。

5. 结论

1) 时间变化特征分析表明：1970~2019年，疏勒河与黑河流域年平均气温线性倾向率均呈上升趋势，变化倾向率分别为 $0.37^{\circ}\text{C}/10a$ 、 $0.40^{\circ}\text{C}/10a$ ，疏勒河流域整体气温比黑河流域高，但黑河流域气温上升趋势则更加显著；1970~2019年，疏勒河与黑河流域年总降水量线性倾向率均呈上升趋势，变化倾向率分别为 $0.72^{\circ}\text{C}/10a$ 、 $8.31^{\circ}\text{C}/10a$ ，黑河流域年总降水量及其上升趋势均远远大于疏勒河流域。

2) 空间分析表明：两个流域内气温空间分布总体呈现西高东低的特征，降水分布总体呈现东部多、西部少的特点，黑河流域年总降水量较疏勒河流域更多，在黑河流域中，降水主要集中在中上游地区。

3) 地理因子相关性分析说明：疏勒河流域气温与海拔呈负相关，降水量与海拔呈负相关、与经度和纬度均呈正相关；黑河流域气温与海拔呈负相关、与纬度呈正相关，降水量与海拔呈正相关、与纬度呈负相关。

4) 突变分析表明：1994年为疏勒河和黑河流域气温突变开始的时间。1970和2019年分别为疏勒河流域降水量两次突变的开始时间，2012年为黑河流域近50年来的降水量突变点。

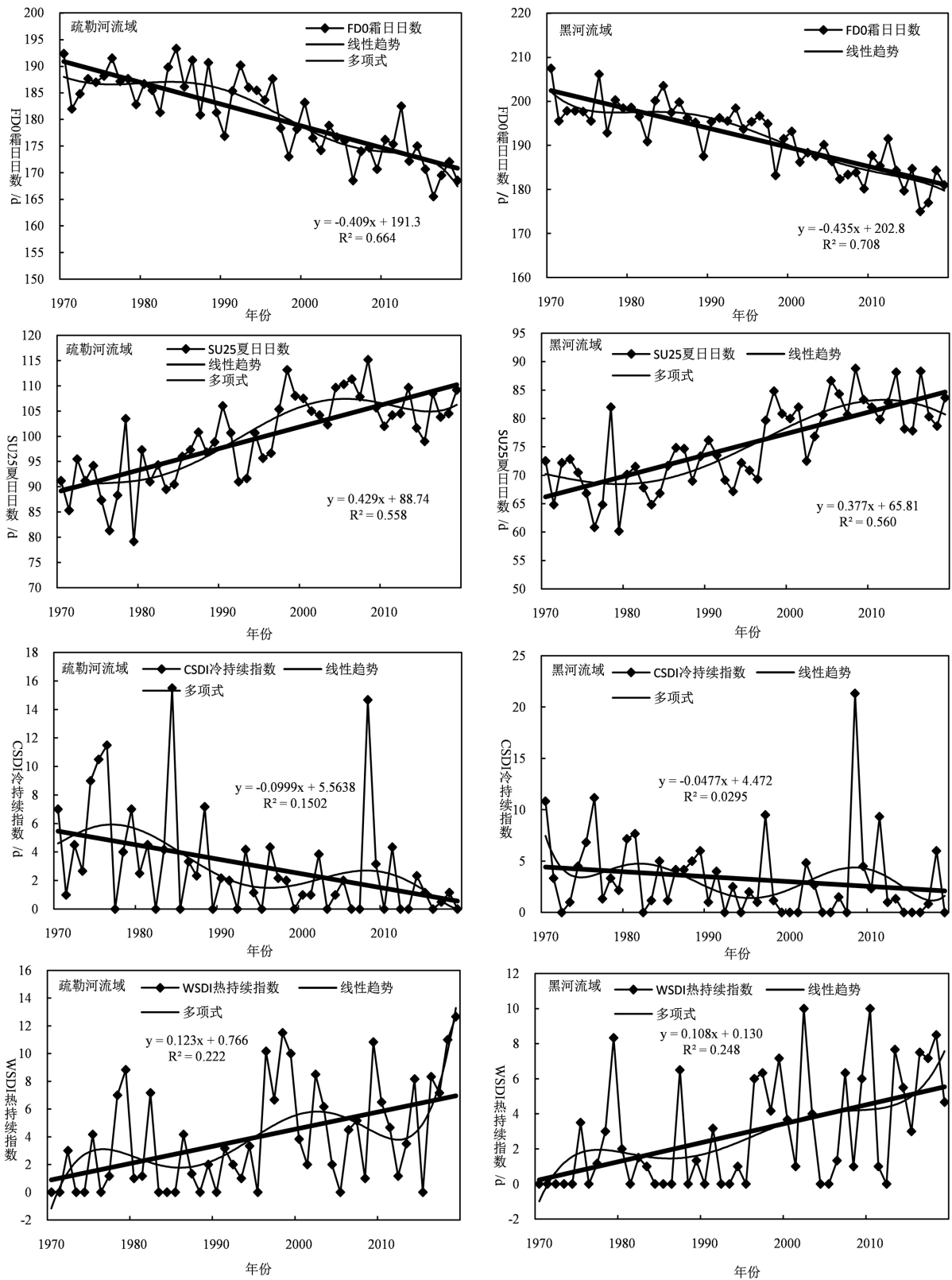


Figure 6. Extreme temperature index of Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图 6. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域极端气温指数

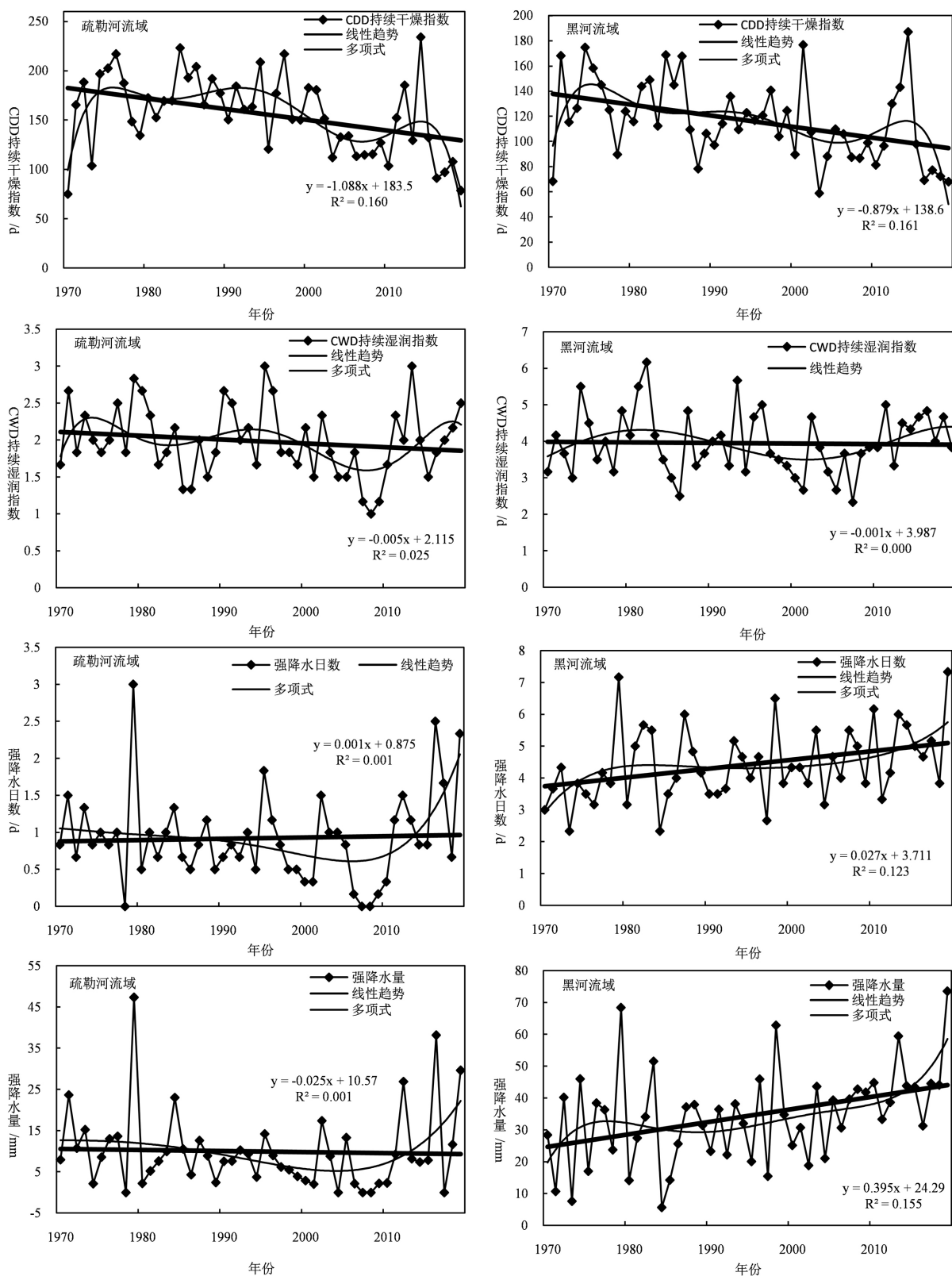


Figure 7. Extreme precipitation index of Shule River and Heihe River basins from 1970 to 2019

图 7. 1970~2019 年疏勒河与黑河流域极端降水指数

5) 分析极端气候指数特征表明: 疏勒河与黑河流域的极端低温指数均呈下降趋势, 极端高温指数则呈上升趋势, 与全球变暖的大趋势相同。疏勒河流域更容易发生极端高温事件, 而黑河流域更容易发生极端低温事件; 2008 年之后, 疏勒河与黑河流域降水有明显增多, 气候更加湿润, 根据极端降水指数分析, 黑河流域更容易发生极端降水事件, 而疏勒河流域则更易出现旱情。

6. 讨论

在全球变暖的气候背景下, 近 50 年来, 疏勒河与黑河流域气候的时空特征发生十分显著的变化, 气温呈显著的上升趋势, 降水也有一定上升趋势, 气候整体向暖湿变化, 与其他学者研究结果基本一致[2]。疏勒河流域整体气温比黑河流域高, 平均气温为 6.8℃, 而黑河流域年总降水量及其上升趋势均远远大于疏勒河流域。造成差异的主要原因是两流域生态环境的不同, 本文中选取的黑河流域站点多位于流域中上游, 黑河流域地势南高北低、地形复杂, 中上游降水较多, 又有冰川融水补给, 而疏勒河流域位于西北干旱半干旱区和青藏高寒区的交界地带, 降水量稀少, 蒸发量大, 植被稀疏, 生态环境极其脆弱, 是全球气候变化响应的敏感区[21]。疏勒河与黑河流域不仅是保障河西地区农业生产、城镇工业和人民生活用水的水源, 也是调蓄工程、水电工程的集中建设区域, 深入研究其气候变化趋势有利于充分利用有利天气和气候资源, 减轻天气气候灾害对当地农业及其他行业经济和社会的影响。本文选取的研究站点主要是一些对疏勒河和黑河流域气候变化比较有代表性的测站, 对两个流域气候变化特征进行了分析。但由于当地经济发展和地理位置等原因, 测站密度较小, 能够选取的站点有限, 对部分地区的气候特征无法进行更加具体的分析, 对气候的空间分布特征有一定影响。在之后的研究中应该增加站点密度, 结合流域地形地貌和地理位置, 对两流域气候变化特征和差异进行更加深入、详细、精准地探讨。

参考文献

- [1] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011 年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.
- [2] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 等. 基于自然分区的 1960-2018 年中国气候变化特征[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 750-760.
- [3] 杜海波, 吴正方, 张娜, 等. 近 60 a 丹东极端温度和降水事件变化特征[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 473-480.
- [4] 杨勇, 杜军, 罗骥翔, 等. 近 40 a 西藏怒江流域极端降水事件的时空变化[J]. 干旱区研究, 2013(2): 315-321.
- [5] 陆桂华, 陈金明, 吴志勇, 等. 近 50 年中国最大 1 d 降水量变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 6-10.
- [6] 李小亚, 张勃, 汪宝龙, 等. 河西地区 1960 年至 2011 年不同级别降水日数和极端降水事件的变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 182-190.
- [7] 贾文雄. 近 50 a 来祁连山及河西走廊极端气候的时空变化研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(4): 559-567.
- [8] 王苗, 郭品文, 邬昀, 等. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 79-86.
- [9] 贾玲, 孙栋元, 牛最荣, 等. 疏勒河流域最高、最低气温变化规律[J]. 水土保持研究, 2022(1): 81-287.
- [10] 陈娜娜, 任欣琪. 疏勒河流域气温、降水、径流演变特征及径流影响因素分析[C]//2020 (第八届)中国水生态大会——2020 (第八届)中国水生态大会论文集. 北京: 北京沃特咨询有限公司, 2020: 424-432.
- [11] 郭昆明, 颀耀文, 王晓云, 等. 黑河流域 1960-2015 年气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 253-260.
- [12] 黑河[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%BB%91%E6%B2%B3/12797121?fr=aladdin>
- [13] 疏勒河[EB/OL]. https://baike.baidu.com/item/%E7%96%8F%E5%8B%92%E6%B2%B3/226995?fr=kg_general
- [14] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 王铃清. 河南省极端气温时空变化特征分析[J]. 自然科学, 2019, 7(6): 549-560.
- [16] 邓振镛, 张强, 王润元, 等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1267-1275.
- [17] 冯建英, 陆登荣, 赵映东. 河西内陆河径流量变化及其与气候变化的关系[C]//中国气象学会 2008 年年会干旱与

减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集, 2008: 478-488.

- [18] 丁立善, 赵超君, 何生录, 等. 青海省黑河上游地区 1961-2019 年降水量时空变化特征研究[J]. 青海环境, 2021, 31(1): 32-35.
- [19] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰, 等. 河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014(4): 66-72.
- [20] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 近 50 年来河西走廊区域生态环境变化特征与综合防治对策[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 78-86.
- [21] 齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2018.