

新疆东部地区气候变化及对生态环境的影响

王文涛¹, 田 斌², 李 静³

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020; 2. 甘肃省水利水电工程局第三工程处,
兰州 730020; 3. 宿州学院地球科学与工程学院, 江苏 宿州 234000)

摘 要:采用线性回归分析以及 Mann-Kendall 和累积距平等突变检验方法对新疆东部地区 1961—2011 年的气温和降水两个指标进行研究,从而揭示该地区气候变化的事实及趋势,探讨了其对区域生态环境的影响。研究显示新疆东部地区及各站点年平均和四季平均气温在过去 50 多年内均呈上升趋势,达 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,增温率是 IPCC 第四次报告中全球近 50 a 增温率的三倍多,高于中国和西北干旱区的增温率,并且在 1993 年发生增温速度的突变。四季气温中,冬季气温升高对年气温上升贡献最大。新疆东部地区各站点年降水量在研究时段内有增有减,巴里坤站呈较为明显增加趋势,增幅为 $9.77\text{ mm}/10\text{ a}$,而十三间房站年降水量呈微弱的下降趋势,下降了 $1.97\text{ mm}/10\text{ a}$,其余各站均有增加趋势,但趋势不显著,并且在 1976 年发生了增温突变。新疆东部地区温度升高,降水量增加,总体向暖湿化发展,这种变化对该地区水资源和沙尘暴天气事件等生态环境有重要的影响,具体的影响评估需要进一步研究。

关键词:气候变化; 趋势; 突变; 新疆东部; 水资源; 沙尘暴

中图分类号:X16

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0249-06

Climate Change in Eastern Region of Xinjiang in the Past 50 Years and Its Effects on the Local Ecological Environment

WANG Wen-tao¹, TIAN Bin², LI Jing³

(1. Gansu Institute of Soil and Water Conservation, Lanzhou 730020, China;

2. Third Engineering Department, Gansu Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau, Lanzhou 730020, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 234000, China)

Abstract: The method of linear regression trend analysis and Mann Kendall and cumulative distance equal mutation testing method were adopted to study the temperature and precipitation in 1961—2011 in the eastern region of Xinjiang, revealing the fact of climate change in the region and trend, and to discuss its impact on regional ecological environment. The study results show that the eastern region in Xinjiang and each site the annual average temperature of the four seasons was rising over the past 50 years, the rate of warming nearly 50 years was more than three times of the global warming rate reported by the IPCC the fourth time, the rate of warming was up to $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, warming rate is higher than that of China and the northwest arid areas, and the abrupt change of increasing temperature occurred in 1993. The winter temperatures among the four seasons had the largest contribution to the temperature rise. Annual rainfall in eastern region of Xinjiang workstations was increasing with decreasing during the study period and it presented more significantly increased trend at Balikun station, increase rate was $9.77\text{ mm}/10\text{ a}$, the annual precipitation presented a weak downward trend at Shisanjianfang station, and the decline rate was $1.97\text{ mm}/10\text{ a}$, the annual precipitation at the rest of the stations had increased, but the trend was not significant, and humidifying mutation happened in 1976. Temperature of the eastern region in Xinjiang rose, precipitation increased. The overall development was towards to warming and humidity, which had the significant impact on the change of water resources in the region and ecological environment such as wind and dust storm weather events. The further research for evaluation on the exact is necessary in this region.

Key words: climate change; trend; abrupt change; eastern Region of Xinjiang; water resources; sand-dust storm

全球气候系统的变暖是毋庸置疑的。IPCC 第五次评估报告表明,最近 130 年(1880—2012 年)全球地表气温呈线性上升趋势,其上升幅度为 0.84°C ,而最近 60 多年来(1950—2012 年)许多已经观测到的气候变化在年代际到千年尺度上都是前所未有的^[1]。到 21 世纪末全球气温预计升高 $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ ^[2]。伴随着气候变暖,全球大部分地区降水量和降水模式也发生了明显变化,其陆域强降水事件发生频率有所上升^[3]。但气候变化存在着明显的区域差异^[4-5]。近 100 年来北半球中纬度干旱区增温是全球陆地年平均增温的 2~3 倍,是对气候变化最敏感最显著的地区^[6]。而中国西北干旱区是北半球中纬度干旱区的主要组成部分,变暖的强度高于全国平均值,以 $0.35^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的趋势升温,尤其是 20 世纪 80 年代中后期升温迅速^[7]。相对于温度的普遍升高,降水量的区域差异更加明显。西北干旱区近 50 年降水量是 400 年来最丰沛的时期,多雨主要发生在气候剧烈变暖的 20 世纪最后 30 年,气候由暖干向暖湿转型的特征明显^[8]。

新疆东部气候干旱,降水稀少,蒸发强烈,属于典型的极端干旱地区,是气候变化极度敏感区。该区域地形地貌为“4 山夹 3 盆”的山盆结构,是新疆的“缩影”,在新疆具有代表性。气温和降水是气候变化的两个基本要素,其变化对该地区生态环境的变迁起着重要的影响。深入认识新疆东部地区气候变化事实及趋势,探讨其对区域生态环境的影响,对研究区气候变化对社会经济、生态环境,尤其是水资源脆弱性的影响具有重要意义,同时对该地区的生态建设和水资源保护及配置具有重要的现实意义和应用价值。

1 研究区概况

新疆东部地区,地处 $40^{\circ}09' - 45^{\circ}43' \text{N}$, $91^{\circ}06' - 96^{\circ}23' \text{E}$,主要包括哈密地区,总面积约 $140\,749\text{ km}^2$ 。地势为山盆结构,为“4 山夹 3 盆”,中部天山山脉自东向西 400 km 横亘其中,分隔成山南山北 2 个主要的封闭盆地,形成迥然不同的两大自然环境区:山北为巴里坤盆地,居于巴尔库山与莫钦乌拉山之间,在莫钦乌拉山与东准葛尔山地余脉之间为淖毛湖—三塘湖盆地,山南是吐鲁番—哈密盆地。哈密地区地形复杂且多荒漠戈壁,植被稀少,干旱区占 90% 以上,其中极端干旱区就占到总面积的 70% 以上;干燥少雨,昼夜温差大,日照时间长,表现出典型的大陆性气候特征。

2 数据资料与方法

本文选取新疆东部地区 6 个站点 1961—2011 年

共 51 a 逐月平均气温、降水量和风速等数据。挑选在区域内分布均匀、缺测较少和起始年统一的 6 个站点,站点包括哈密、十三间房、巴里坤、伊吾、红柳河和淖毛湖 6 个气象站点,数据来自新疆维吾尔自治区气象信息中心,数据经过严格的质量检查,剔除错误信息,保证数据质量。区域气象要素均值采取面积加权平均计算得出。

使用的方法主要有相关分析、回归分析和非线性参数检验等;突变分析采用 Mann-Kendall 方法。Mann-Kendall 方法(简称 M-K 方法)方法概述如下^[9]:

对于具有 n 个样本量的时间序列,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (1)$$

$$\text{其中}, r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1,2,\dots,i)$$

可见,秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

其中 $UF_1=0$, $E(S_k)$, $\text{var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (3)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,同时使

$$UB_k = -UF_k \quad (k=n, n-1, \dots, 1), UB_1 = 0$$

分析绘出的 UF_k 或 UB_k 曲线图,若 UF_k 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

3 结果与分析

3.1 新疆东部地区气温变化特征

新疆东部地区年平均气温存在明显的差异,“山盆”空间相差悬殊,由盆地 toward 周边山区呈明显递减趋势。该区域年均气温为 7.2°C ,其中淖毛湖盆地和哈

密盆地的年均气温分别为 10.6℃和 10.0℃,而山区的巴里坤和伊吾分别为 2.1℃和 3.9℃。可以看出,气温受海拔影响极为显著,这说明研究区内“山区—盆地结构”的巨大海拔差异是该区气温要素地域分异明显的主控因素。

新疆东部地区及各站点年平均和四季平均气温均呈上升趋势(表 1、图 1 和图 2)。该区域年平均气温在 1960—1965 年偏高,1966—1985 年偏低,80 年代中期气温最低,之后开始缓慢上升。20 世纪 80 年代末期气温开始波动升高,90 年代中期又出现一次大幅度升温过程,2008 年之后气温有微弱的下降趋势。四季气温与年平均气温变化大体一致。各站点的年际变化趋势与整个区域的变化趋势基本一致,均在 80 年代末期和 90 年代中期出现了升温过程,而在 21 世纪初十年中期有下降的趋势。

从变化趋势来看,新疆东部地区及 6 个气象站点的年平均气温呈增加趋势(表 1、图 2),线性回归分析和 Mann-Kendall 检验结果均通过了 95%(±1.96)显著性检验,说明在统计意义上其增加趋势显著。整个新疆东部地区的增温率为 0.42℃/10 a,是 IPCC 第四次报告^[3]中全球近 50 年增温率的三倍多,也高于中国(0.25℃/10 a)和西北干旱区(0.34℃/10 a)的增温率^[10-11]。从表 1 看出,十三间房年均气温增温率最高,为 0.79℃/10 a,其次是巴里坤,达到 0.67℃/10 a,而哈密地区气温年均值和四季值的增温率都是最小的,淖毛湖和红柳河的增温率较为一致。从四季

来看,冬季是四季中增温最高的,达到 0.46℃/10 a,对年值增温贡献最大,其次为秋季、夏季和春季。

用累积距平分析法和 Mann-Kendall 检验法两种方法对气温突变进行检验,发现两种方法得到的突变年份较为一致,Mann-Kendall 检验法有较大的优势。结合 Mann-Kendall 方法的特点以及年、四季气温的年际变化规律,最终确定突变年份。Mann-Kendall 检验结果表明,新疆东部地区年平均气温与 1993 年后气温显著升高,通过了 99%(±2.56)的显著性检验,说明在统计意义上其突变特征很显著。四季气温突变时间不尽相同:春季气温集中在 1996 年发生突变;秋季气温突变时间在 1993 年,与年平均气温突变时间一致;夏季气温突变介于夏季和冬季之间,集中在 90 年代中期;冬季气温突变时间较早,在 1984 年,与西北干旱区气温突变时间接近;年平均气温和四季气温突变与整个西北地区气温突变情况一致^[11]。

表 1 新疆东部地区气温年值、四季线性变化增温率 ℃/10 a

地区	年值	春季	夏季	秋季	冬季
新疆东部	0.42	0.38	0.42	0.43	0.46
淖毛湖	0.38	0.33	0.49	0.48	0.21
巴里坤	0.67	0.54	0.72	0.70	0.70
伊吾	0.27	0.21	0.20	0.33	0.33
哈密	0.20	0.25	0.19	0.06	0.31
红柳河	0.33	0.22	0.34	0.34	0.35
十三间房	0.79	0.70	0.69	0.91	0.87

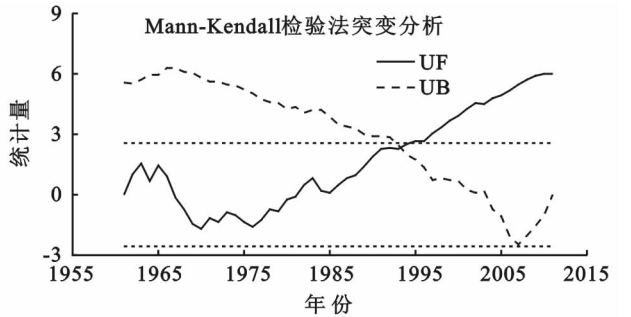
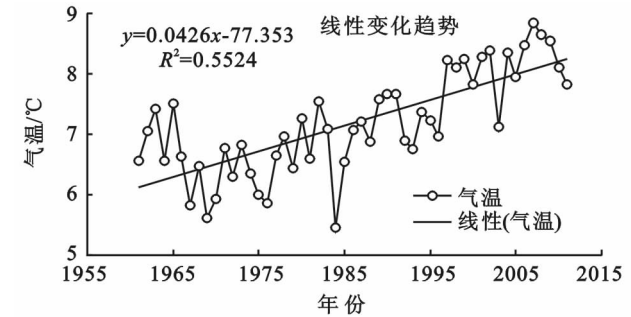


图 1 新疆东部地区年平均气温变化趋势及突变分析

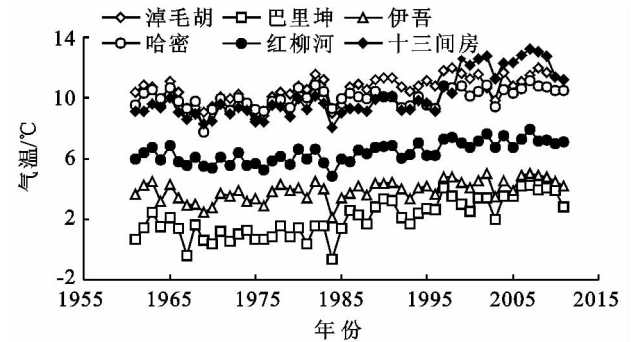


图 2 新疆东部各站点年平均气温变化趋势

3.2 新疆东部地区降水量变化特征

与全区域的普遍显著升温不同,新疆东部地区各站点降水量有增有减,且绝大多数站点变化趋势不显著(表 2)。年均降水量变化仅巴里坤站呈较为明显增加趋势,增幅为 9.77 mm/10 a,其余各站变化趋势均不显著。而十三间房站年降水量呈微弱的下降趋势,下降了 1.97 mm/10 a,但没有通过 95%的显著性水平检验。降水量存在明显的空间差异,“山盆”空间相差悬殊,由盆地向周边山区呈明显增加趋势。该区域年降水量为 76 mm,其中巴里坤和伊吾站的年降水量分别为 218.3 mm 和 98.7 mm,而淖毛湖和哈密等

盆地内站点分别为 19 mm 和 38.3 mm。可以看出,降水量受海拔影响较为显著,研究区内“山区—盆地结构”的海拔差异对该区降水量的地域分异有明显的影响。巴里坤的高海拔、东天山北侧的地理特征,加上区域“三山夹两盆”的地形地貌,是新疆的一个缩影,平均海拔达 2 000 m 以上,来自西方和西北方向的气流,遇高山阻挡抬升,水汽凝结,在 2 000 m 以上的中、高山区及森林带的中、高山区形成降水,高山区有常年积雪和大量的冰川,山区降水和部分的冰雪融水是该地区水资源的主要来源。

研究区降水量年际变化情况显示(图 3 和图 4a):新疆东部地区年降水量自 1961 年以来总体呈增加趋势。其中 20 世纪 60 年代末到 70 年代初、70 年代末到 80 年代初、80 年代末 90 年代中期以及 21 世纪 10 年中期降水量偏丰,其余年份降水量偏枯。新疆东部各地区的降水量年际变化较为一致,波动特征与整个区域几乎同步。四季降水量与年降水量变化大体一致。各站点的年际变化趋势与整个区域的变化趋势基本一致。

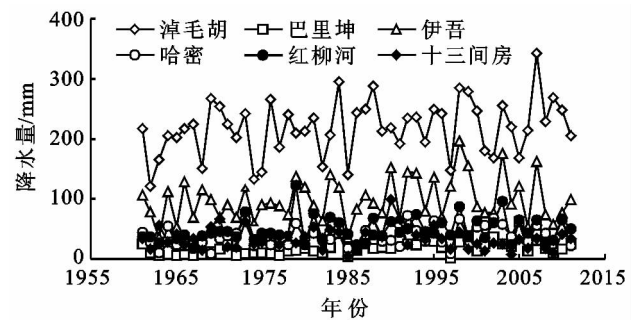


图 3 新疆东部各站点年降水量变化趋势

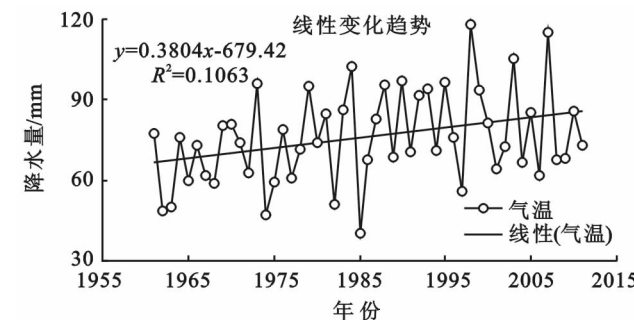


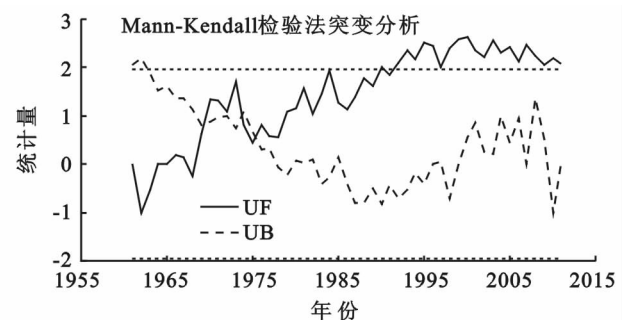
图 4 新疆东部地区年平均降水量变化趋势及突变分析

表 2 新疆东部地区降水量年值、
四季值线性变化增加率 mm/10 a

地区	年值	春季	夏季	秋季	冬季
新疆东部	3.80	1.47	0.63	1.61	0.50
淖毛湖	3.58	0.28	1.66	1.21	0.46
巴里坤	9.77	3.44	2.93	3.11	0.72
伊吾	4.98	2.23	-0.29	2.57	0.60
哈密	4.80	1.00	1.31	1.72	0.80
红柳河	3.50	1.75	0.12	1.09	0.51
十三间房	-1.97	0.10	-1.95	-0.06	-0.08

从变化趋势来看,除十三间房站外,新疆东部地区及其余 5 个气象站点的年降水量呈增加趋势(表 3、图 4),线性回归分析和 Mann-Kendall 检验结果发现,只有新疆东部全区的年降水量通过了 95% (± 1.96) 显著性检验,即整个新疆东部地区的年降水量在统计意义上呈显著增加趋势,而其余站点的年降水量增加或减少趋势并不显著。从表 2 看出,巴里坤站年均降水量增加率最高,其次是伊吾和哈密站,而十三间房站年和夏秋冬季的降水量均有减少趋势。从四季来看,春季和秋季降水量的增加较高,对年降水量增加贡献最大,其次为夏季和冬季。另外,伊吾站夏季降水量也有减少的趋势,这可能与夏季气温高,潜在蒸发量大,而向空中补充的当地蒸发水汽较少,导致空气中水汽含量不足,抑制山前降水的形成和发展有关。

Mann-Kendall 检验结果表明,新疆东部地区年降水量突变发生在 1976 年,通过了 95% (± 1.96) 的显著性检验,说明在统计意义上其突变特征很显著。四季降水量突变时间不尽相同:春季降水量集中在 20 世纪 80 年代中期发生突变;秋季降水量突变时间在 1976 年、1977 年,与年平均气温突变时间一致;夏季降水量突变集中在 80 年代末期;冬季气温突变时间较晚,在 1999 年。但在四季中,只有秋季降水量突变特征通过了 95% (± 1.96) 的显著性检验,说明在统计意义上其突变特征显著,其余季节的突变不显著。在秋季,突变后降水量增加了 46%,但实际增加降水量只有 4.92 mm。



3.3 新疆东部地区平均风速变化特征

新疆东部地区大风天气气候频繁,有哈密北部三塘湖—淖毛湖风区、七角井—百里风区和哈密南部风区的著名风区。大风天气不仅影响当地的生态环境,还对当地的交通、社会经济发展等造成重大的影响。近 50 a 来,新疆东部地区年平均风速经历了明显的减弱趋势,减弱速率大于 -0.2 m/s,平均风速下降了 0.94 m/s。从平均风速的年代际变化来看,20 世纪

60—70 年代初有明显的增强,但自 1972 年之后区域风速呈现十分明显的持续性下降趋势。这种变化主要与气候变暖有关,气候变暖引起高纬、冬季和夜间的显著增温,减小了高、低纬之间的温差,同样也减小了冬夏之间、白天和夜间之间的温差。从表 3 看出,年平均风速与年平均气温之间存在负相关关系,通过了 99%的

显著性检验,即整个新疆东部地区的年平均风速与年平均气温之间的关系在统计意义上显著。淖毛湖地区风速与年均气温的反相关也通过了,红柳河和伊吾站相关系数不显著。新疆东部风速变化主要和强冷空气、寒潮天气有关系,20 世纪 80 年代中期以后侵入新疆东部的强冷空气天气在次数和强度上明显减弱。

表 3 新疆东部地区平均风速与平均温度的相关系数

项目	新疆东部	哈密	巴里坤	伊吾	淖毛湖	红柳河	十三间房
平均气温	-0.48	-0.25	-0.29	-0.10	-0.61	-0.27	-0.36

3.4 气候变化对生态环境的可能影响

由于数据序列长度、精度和研究方法的限制,气候变化对中小尺度区域生态环境的影响研究仍面临许多困难。由于新疆东部地区为极端干旱区域,对全球气候变化的响应十分敏感。新疆东部地区绿洲生态环境的安全和维护全依赖于山区径流的供给,而绝大多数山区径流靠山区降水和季节性冰雪融水补给,还受到气温变化的制约。

3.4.1 对区域水资源的影响 新疆东部区域共有长流水河流 70 多条,年径流量大于 0.02 亿 m³ 的河流有 10 余条。其中约有 30 条河流受冰川消融水影响,而大部分河流基本没有冰川消融水补给。这些不受冰川消融水补给的河流分布在东天山南北两侧,水量来自山区直接降雨和裂隙水,河流的丰枯取决于集水区域内的气候要素的变化,主要包括温度和降水。由于山体低矮,中、高山区在冬春季节有一定积雪,但这些积雪也受前冬的降雪累积量和春季气温的影响,在每年的 4—5 月份全部消融^[12]。

新疆地区气候的变化对当地河流流量影响很大,气候要素的异常导致地表径流量的变化^[13]。冰川融水补给河流的径流量占全地区河流年径流量的 79.4%,这些河流流量与气温关系密切,巴里坤气象站的气温在 20 世纪 80 年代后持续升高,受山区气温升高影响,伊吾河年径流量随之升高;而降水增加对河流的水量影响不大,这些降水具有量小、强度低、历时短的特征,绝大部分降水量成了土壤水,由于地下水埋深大,降水没能转换成地下水,就以土壤蒸发的形式消失。而白吉站年均流量与同期降水量关系略好,说明在山区降水与径流关系相对较好^[14]。

根据汤奇成、胡汝骥等的相关研究^[15-16],在未来气候变化的趋势下,气温升高将可能引起冰川径流减少,而河川径流会随山区降水的增加而增加,如在气温升高 1℃,降水增加 20%时,河川径流将增加 10%~20%;但如果气温升高而降水减少,河川径流会有较大幅度的减少。这也就是说,在区域增温明显的大背景下,新疆东部山区的径流在更大程度上依赖于山

区降水量的变化,还受冰雪融水补给的影响,这样就使径流不稳定性增加,增加了水资源利用的难度。

3.4.2 对区域沙尘暴的影响 新疆东部地区大风天气气候频繁,是著名的风区之一。大风天气引起的沙尘暴,不仅影响当地的生态环境,还对当地的交通、社会经济发展等造成重大的影响。

近 50 a 来,新疆东部地区年平均风速经历了明显的减弱趋势,风速的减弱使沙尘暴天气事件发生频次减少,当地的生态环境有所好转。新疆东部地区 3—5 月发生的沙尘暴居多,沙尘暴峰值多在 4 月出现,十三间房沙尘暴日数 69%的沙尘暴发生在春季,哈密地区沙尘暴占全年的 48%,此分布与当地春季大风频繁有关^[17]。新疆东部各站沙尘暴日数随时间序列变化呈递减的趋势,20 世纪 50、60 年代均属于沙尘暴高发期,沙尘暴合计频次高于各站历史均值,80 年代以后沙尘暴呈减弱趋势,进入 21 世纪初沙尘暴爆发频次再次趋于递减,处于一个相对稳定且沙尘暴频次相对偏小时期。从图 5 可以看出哈密站沙尘暴日数在近 60 年来呈递减趋势,沙尘暴日数几乎为零。沙尘暴的变化趋势主要是随大风风速的变化而变化,风力条件的减弱是该地区沙尘暴频数下降的主要原因。而区域风力条件稳定,下垫面条件成为沙尘暴多寡决定性因素。姚俊强等研究表明西北地区沙尘暴频次迅速减少与沙源区向暖湿化趋势发展有关^[7]。新疆东部地区气候暖湿化转型也对沙尘暴的发生有一定的弱化作用,降水的增加可以引起土壤湿度及地表植被覆盖的正效应变化,进而抑制沙尘暴的发生。

4 结论

(1) 新疆东部地区及各站点年平均和四季平均气温均呈上升趋势,增温率为 0.42℃/10 a,增温幅度在空间上受到山盆地形影响,高海拔增温幅度大。在 20 世纪 80 年代末期到 21 世纪前 5 年左右出现了升温过程,而在接下来的几年有下降的趋势。四季气温以冬季增温最高,达到 0.46℃/10 a。Mann-Kendall

检验结果表明该地区年平均气温突变发生在1993年,通过了99%(±2.56)的显著性检验,说明在统计意义上其突变特征很显著。四季气温突变时间不尽相同。

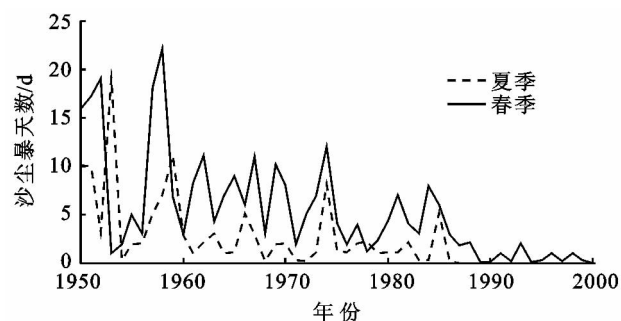


图5 哈密站沙尘暴日数年变化

(2) 新疆东部地区各站点降水量多数站点有所增加,巴里坤站呈较为明显的增加趋势,增幅为9.77 mm/10 a,其余4站变化不显著,而十三间房站年降水量呈微弱的下降趋势,下降了1.97 mm/10 a。降水量近51 a有所增加。春季和秋季降水量的增加较高,对年降水量增加贡献最大,其次为夏季和冬季。Mann-Kendall 检验结果表明,新疆东部地区年降水量突变发生在1976年,通过了95%(±1.96)的显著性检验,说明在统计意义上其突变特征很显著。四季降水量突变时间不尽相同,其中秋季降水量突变时间与年平均气温突变时间一致。

(3) 新疆东部地区为极端干旱区域,对全球气候变化的响应十分敏感。新疆东部地区绿洲生态环境的安全和维护全依赖于山区径流的供给,而绝大多数山区径流靠山区降水和季节性冰雪融水补给,主要受降水和气温变化的制约。此外,新疆东部地区年平均风速经历了明显的减弱趋势,与年平均气温之间存在反相关关系,风速的减弱使沙尘暴天气事件发生频次减少,当地的生态环境有所好转。

参考文献:

[1] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report, Climate change 2013: The physical-science basis: Summary for policymakers [R/OL]. [2013-10-28].

[2] 任贾文. 全球冰冻圈现状和未来变化的最新评估: IPCC-WGIAR5SPM 发布[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1065-1067.

[3] IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[R]. Cambridge University Press, 2007.

[4] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 等. 气候变化权威报告—IPCC 报告. 气候变化影响评估, 2008, 2: 38-40.

[5] 林祥, 钱维宏. 近40年中国暖季日气温及其异常强度变化趋势. 地理学报, 2003, 58(9): 21-30.

[6] Zuo Jinqing, Wang Jiemin, Huang Jianping, et al. Estimation of ground heat flux and its impact on the surface energy budget for a semi-arid grassland[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2011, 3(1): 41-50.

[7] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283-1291.

[8] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.

[9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

[10] Ren G Y, Xu M Z, Chu Z Y, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951—2004, Clim[J]. Environ. Res., 2005, 10(4): 717-727.

[11] Li B, Chen Y, Shi X. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China[J]. J. Geophys. Res., 2012, 117, D16115, doi: 10.1029/2012JD.017953.

[12] 骆光晓, 吴力平, 尹进莉, 等. 新疆哈密地区地表水资源量趋势分析[J]. 水文, 2007, 27(5): 92-95.

[13] 邓铭江, 王世江, 董新光, 等. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[14] 高建芳, 骆光晓, 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析[J]. 冰川冻土, 2008, 31(4): 748-758.

[15] 汤奇成, 曲耀光, 周聿超. 中国干旱区水文与水资源利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[16] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.

[17] 霍文. 新疆沙尘暴天气演变特征及成因分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011.