

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.07.013

# 近 60 年间巴丹吉林沙漠气温和降水变化及其对湖泊的影响

王丽娟, 王哲\*, 刘敏, 申建梅, 聂振龙

WANG Lijuan, WANG Zhe\*, LIU Min, SHEN Jianmei, NIE Zhenlong

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061

*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*

**摘要:**以巴丹吉林沙漠周围的 4 个国家气象站 1960—2017 年的长序列和腹地自建的 10 个气象站 2016—2018 年的短序列气象数据为支撑,运用一元线性回归模型、Mann-Kendall 检验等方法,系统分析沙漠周边及腹地气温和降水量的时空变化特征;结合项目组及前人对湖泊动态的研究成果,分析其变化特征,初步探讨了巴丹吉林沙漠湖泊变化与气候要素的响应关系。研究表明:巴丹吉林沙漠周边年均气温均呈上升趋势,且由南向北升温速率增大,其中阿拉善右旗以 0.74℃/10a 的速率显著上升;降水量变化趋势不显著;总体而言,近 50a 来沙漠东南缘气候呈暖湿化、西北缘气候呈暖干化趋势。巴丹吉林沙漠周边年降水量、气温均在 20 世纪 70—80 年代出现突变,降水量突变不明显,气温突变显著,气候自此向暖干化趋势发展;沙漠周边与沙漠区月际气候特征基本一致,均具有水热同期,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥的特点,但沙漠区雨季较沙漠边缘区短,雨期较边缘区提前。沙漠区湖泊多年来呈不同程度萎缩趋势,湖泊群加速萎缩受当地气候暖干化突变控制;湖泊年度水位、水量峰值与降水量峰值不一致,表明降水量变化不是湖泊变化的主控因素。

**关键词:**巴丹吉林沙漠;气温变化;降水变化;湖泊变化

**中图分类号:**P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)07-1218-10

**Wang L J, Wang Z, Liu M, Shen J M, Nie Z L. The temperature and precipitation change and its impact on lakes in Badain Jaran Desert over the last 60 years. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(7): 1218-1227**

**Abstract:** Based on the long series data of four national meteorological stations during 1960-2017 in the periphery Badain Jaran desert and the short series data of 10 meteorological stations during 2016-2018 in the hinterland of Badain Jaran desert, the unitary linear regression model and Mann-Kendall test were used to systematically analyze the spatio-temporal variation characteristics of temperature and precipitation in the periphery and hinterland of Badain Jaran Desert. Combined with the research results of the project team and predecessors on lake dynamics, the change characteristics are analyzed, and the response relationship between lake changes and climate factors is preliminarily discussed in Badain Jaran Desert. The results showed that the average annual temperature shows a rising trend, and the heating rate increased from south to north, among which the Alxa Right Banner increased significantly at a rate of 0.74℃/10a. The variation trend of precipitation is not significant in the periphery of Badain Jaran Desert; in general, the climate in the southeast edge of the desert has been warm and humid, while that in the northwest edge has been warm and dry in the past 50 years. The annual precipitation and temperature showed sudden changes in the 1970s and 1980s. The sudden changes in precipitation were not obvious, but the sudden changes in air temperature were significant, since then, the climate has become warmer and drier in the periphery Badain Jaran Desert; the characteristics of the monthly climate are basically the same, both of which have the characteristics of simultaneous

收稿日期:2022-04-18;修订日期:2022-12-07

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目《民勤绿洲地下水位异常变化对极端干旱气候和灌溉活动的响应机制》(批准号:41902262)和中国地质调查局项目《巴丹吉林沙漠及周边地区 1:25 万水文地质调查》(编号:121201106000150093)

作者简介:王丽娟(1981-),女,硕士,高级工程师,从事水文地球化学研究。E-mail:972636980@qq.com

\*通信作者:王哲(1982-),男,硕士,高级工程师,从事地下水资源与环境研究。E-mail:32737195@qq.com

water and heat, high temperature and rainy in summer, and cold and dry in winter in the periphery and hinterland of Badain Jaran Desert. However, the rainy season is shorter and earlier in the hinterland of Badain Jaran Desert than that in the periphery of Badain Jaran Desert. The lakes have been shrinking in different degrees for many years in the desert area, and the accelerated shrinking of lakes is controlled by the sudden change of local climate warming and drying; the annual water level, water volume peak value of the lake and precipitation peak value are inconsistent, indicating that the precipitation change is not the main control factor of the lake change.

**Key words:** Badain Jaran Desert; temperature change; precipitation change; climate; lake change

巴丹吉林沙漠地处阿拉善高原荒漠中心,位于东亚夏季风的西北缘,有“中国最美的沙漠”的美誉。区域内分布有世界最高大的沙山,沙山间镶嵌着 100 多个形态、矿化度各异的湖泊(曹乐等,2020;牛震敏等,2022),素以“奇峰、鸣沙、美湖、神泉”著称。湖泊是自然界水分循环的一部分,能够切实反映区域气候和生态环境变化的状况,可作为气候变化的指示剂(张振瑜等,2012;Yi et al.,2015;闫立娟等,2016;姜宝福等,2020)。同时,湖泊作为沙漠区地表水的重要载体,对改善当地居民生活和维持自然生态平衡发挥了不可替代的作用。在全球变暖背景下,探讨巴丹吉林沙漠气候多年演变特征及湖泊变化对其的响应,对认识西北地区乃至东亚气候变化、维持区域生物多样性及生态环境安全具有重要意义(张毅等,2010;除多等,2012;Mutowo et al.,2020),也可为研究极端干旱区水循环特征及机制提供理论背景。

受观测站点位置限制,前人对巴丹吉林沙漠气候变化研究多集中在沙漠周边,主要从气候变化特征(马宁等,2011a,b;李燕等,2019;宁文晓等,2021)、古气候变迁(杨小平,2000;高全洲等,2001;马金珠等,2004;张永香等,2015)、气象因素的变化规律(张克存等,2012;李万元等,2015)等方面进行分析。普遍认为,1960—2018 年 60a 间沙漠边缘年均气温显著上升,整体呈暖化趋势(马宁等,2011a,b;李燕等,2019;宁文晓等,2021)。但是降水量变化趋势仍存在很大的争议,主要存在以下观点:年降水量呈增大趋势(苏俊礼,2016);近 50a 来,北缘年降水量略有减少,南缘略有增加(马宁等,2011a,b);降水量变化不明显(马宁等,2011a,b;李燕等,2019;宁文晓等,2021)。古气候研究认为,巴丹吉林沙漠一带的气候波动在晚更新世期间主要取决于东南亚夏季风的摆动(杨艺等,2007)。1500—1530 年是干旱区气候突变的时期,18 世纪末至 19 世纪初是气候环境演化的重要时段,自此以后干旱化进程进一步加剧(马金珠等,2004),截止到 20 世

纪 20 年代以前,巴丹吉林沙漠南缘以干旱气候为主,干湿转变较少(张永香等,2015)。

针对巴丹吉林沙漠区湖泊的系统研究始于 20 世纪 90 年代,前人关注的热点主要是湖泊的形成演化、水化学特征等,并取得了一系列卓有成效的研究成果(Wen et al.,2014;Ma et al.,2014;Jiao et al.,2015;Dong et al.,2016;王乃昂等,2016;Sun et al.,2018;Zhang et al.,2018;Wang et al.,2018)。有学者研究认为,巴丹吉林沙漠湖泊受气候环境的影响,正在发生不同程度的萎缩、分裂、干涸等现象,且萎缩呈加剧趋势(杨小平,2000;熊波等,2009;张振瑜等,2012);湖泊面积具有“北大南小”的空间分布特点,湖泊盐度具有“北高南低”的分带性规律,湖泊 TDS 值与湖泊面积呈正相关,南北水化学类型迥异,近 10 年来,腹地湖泊水化学特性较边缘湖泊的变化大(邵天杰等,2011)。但关于湖水补给来源问题仍然没有达成共识。前人的观点大致可分为 4 类:降水补给(张虎才等,2006;赵景波等,2017)、近源补给(即东南部雅布赖山区的降雨入渗经地下水侧向补给)(陈建生等,2003;金可等,2022)、远源补给(Dong et al.,2013)和“古水”补给(朱金峰等,2010)。

前人对巴丹吉林沙漠的研究主要侧重其气象要素变化、古气候变迁、湖泊演变等方面,从时间(过去、现在与未来)尺度分析气候变化对区域内湖泊演变的影响较缺乏。

鉴于此,本文以巴丹吉林沙漠周围的 4 个国家气象站 1960—2017 年的长序列数据和腹地自建气象站 2016—2018 年的短序列气象数据为支撑,系统分析沙漠周边及腹地气温和降水量的时空变化特征。同时,结合项目组基于国产卫星影像资料对湖泊动态遥感解译结果及前人研究成果,分析、总结多年来巴丹吉林沙漠湖泊在水位、面积、数量、水量等方面的变化特征,初步探讨巴丹吉林沙漠湖泊变化与气候要素的响应关系,为巴丹吉林沙漠地区气候、湖泊及生态环境时空演变特征提供新的参考。

## 1 区域自然环境概况

巴丹吉林沙漠位于内蒙古自治区阿拉善盟,总面积近 50000 km<sup>2</sup>,是中国第三大沙漠。该地区属于温带大陆性沙漠气候,气候极为干旱,降雨稀少,多年平均降水量为 30~120 mm,由东南向西北逐渐减少,东南部为 100 mm 左右,西北部不足 40 mm,蒸发强烈,是降水量的 40~80 倍,年均温度 8℃,1 月平均温度为 -12℃,7 月平均温度约为 26℃。冬、春季大风强劲,终年盛行西北风和西风,平均风速大于 3.5 m/s。区内植被稀少,仅稀疏灌木和半灌木在沙丘底部和丘间分布。沙漠区总体地势由南向北缓倾,地势起伏不大,大部分海拔在 1300 m 左右,地貌类型以流动沙丘为主。山丘间低地区分布很多 TDS 很高的盐水湖,也有少量淡水湖可供人畜饮用。高大沙山与内陆小湖交互相映,形成了极具特色的沙漠景观。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料来源

湖泊演化分析借助中国地质调查项目“巴丹吉林沙漠及周边地区 1:25 万水文地质调查”中(GF-1、GF-2)的湖泊动态遥感解译结果及前人的研究成果(贺鹏等,2017);沙漠腹地小气候环境研究借助“巴丹吉林沙漠及周边地区 1:25 万水文地质调查”项目在沙漠腹地安装的 10 个小型气象观测站(巴丹湖、希诺日图、古日乃等)数据;气温和降水长序列变化分析和多年月均分析主要借助 4 个国家

气象站(额济纳旗、拐子湖、鼎新、阿拉善右旗)1960—2017 年间的气象数据。具体情况见表 1、图 1。

表 1 巴丹吉林沙漠周边国家气象站基本情况

Table 1 The basic situation of the national weather stations around Badain Jaran Desert

站名	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	年均温度/℃	年降水量/mm
额济纳旗	41°57'	101°04'	941.3	9.1	35.3
拐子湖	41°22'	102°22'	960.0	9.2	45.2
鼎新	40°18'	99°31'	1178.6	8.6	57.3
阿拉善右旗	39°13'	101°40'	1511.5	8.9	120

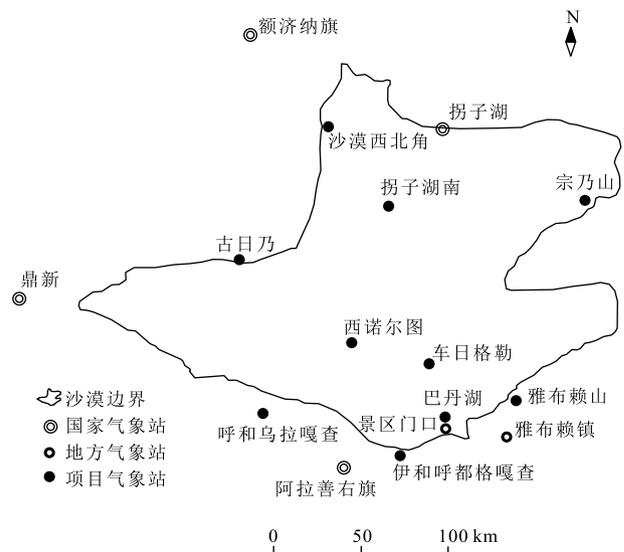


图 1 巴丹吉林沙漠气象站点分布图

Fig. 1 The map of Badain Jaran Desert weather stations

表 2 自建气象观测站

Table 2 The list of self-built weather stations

序号	地点	经度(E)	纬度(N)	高程/m	周围地形	资料系列长度(年、月、日)	观测内容
1	雅布赖山	102°50'	39°39'	1676	山区迎风坡	2015.11.26—2016.12.30	光合有效辐射、风速、风向、湿度、降水、气温、气压、太阳辐射
2	巴丹湖	102°22'	39°33'	1212	沙山间洼地	2018.04.12—2018.11.16	
3	车日格勒	102°15'	39°53'	1160	沙山间洼地	2018.03.27—2018.11.01	
4	西诺尔图	101°44'	40°01'	1152	沙山间洼地	2015.11.28—2018.04.17	
5	古日乃	100°59'	40°32'	1034	平坦干湖区	2015.11.22—2018.04.11	
6	宗乃山	103°18'	40°54'	1496	基岩山边缘	2016.08.16—2019.01.19	
7	拐子湖南	101°59'	40°53'	1211	低矮沙山间洼地	2016.08.15—2019.01.08	
8	沙漠西北角	101°35'	40°23'	900	沙漠西北平缓荒漠	2016.08.17—2018.12.31	
9	伊和呼都格	102°04'	39°18'	1683	山间洪积河道	2018.03.28—2018.11.16	
10	呼和乌拉	101°09'	39°33'	1476	山间洪积河道	2018.04.12—2018.12.30	

注:沙漠西北角 2017 年 6 月起数据出现问题(大风刮倒雨量器),可参考阶段为 2016.8—2017.5,不足一年;巴丹湖、车日格勒、伊和呼都格和呼和乌拉不足一年,缺资料月份恰好是降水量稀少阶段,暂假定为 0,再结合其他资料推测全年降水量

## 2.2 方法

对巴丹吉林沙漠区近 60a 的气温、降水变化特征分析主要采用以下方法:一元线性回归模型的斜率估计法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)趋势检验法(陈泽榕,2019)。利用本次遥感影像解译结果,并结合前人关于湖泊面积、水量、水位等研究成果资料,探究湖泊演化趋势。分析气候因子对湖泊演化的影响,总结该区气候发展趋势。

## 3 分析结果与讨论

### 3.1 气温和降水量的年际变化趋势

#### 3.1.1 基于线性回归模型分析

根据巴丹吉林沙漠周边 4 个国家气象站点 1960—2017 年近 60a 间的观测数据,编制了气温和降水量的年际变化趋势曲线(图 2、图 3),并依据一元线性回归模型拟合结果可知,巴丹吉林沙漠周边地区年均气温在 6.4~11.2℃间波动,斜率均为正值,表明气温呈升高趋势,且由南向北升温速率增大,北侧额济纳旗 60a 间升温最明显;年降水量在 7.00~171.7 mm 间波动,各站点间的年降水量差别较大,北缘额济纳旗和东缘拐子湖多年平均降水量分别为 35.3 mm 和 45.2 mm,西缘鼎新和南缘阿拉善右旗多年平均降水量分别为 57.3 mm 和 120.0 mm,沙漠北缘和东缘较干旱,而西缘和南缘较湿润。年际间变化差别也较大,北缘额济纳旗和东缘拐子湖南降水量呈减少趋势,南缘阿拉善右旗和西缘鼎新呈增加趋势。

#### 3.1.2 基于 Mann-Kendall 趋势检验分析

从表 3、表 4 可知,1960—2017 年近 60a 间,额

济纳旗气温一直呈显著性增加趋势,平均变化速率为 0.74℃/10a;鼎新和阿拉善右旗气温 20 世纪 60 年代均呈下降趋势,且阿拉善右旗下降趋势显著,自 20 世纪 70 年代以来呈持续上升趋势,且在 21 世纪初升温显著,分别达到 99% 和 95% 置信度,平均变化速率分别为 0.43℃/10a 和 0.23℃/10a;拐子湖气温在 20 世纪 60 年代也呈下降趋势,20 世纪 70 年代至 21 世纪初期呈持续上升趋势,其间 70 年代和 90 年代升温显著,21 世纪初出现显著下降趋势,达到 99% 置信度,平均变化速率为 0.01℃/10a。但 4 站点的气温总体均呈上升趋势。

4 站点降水量变化趋势波动较大。阿拉善右旗降雨 20 世纪—21 世纪初期一直呈不显著上升趋势,21 世纪初呈平稳状态,平均变化速率为 27.74 mm/10a,总体呈上升趋势;鼎新降水量 20 世纪 70、90 年代和 21 世纪初期均呈不显著下降趋势,其余时段呈上升趋势,且 20 世纪 60 年代呈显著上升趋势,达到 95% 置信度,平均变化速率为 2.26 mm/10a,总体呈上升趋势;拐子湖降水量 20 世纪 80 年代和 21 世纪初呈显著下降趋势,其余时段均呈不显著上升趋势,平均变化速率为 -0.21 mm/10a,总体呈下降趋势;额济纳旗降水量在 20 世纪 80 年代呈显著下降外,其余时段均呈上升趋势,其中 20 世纪 70 年代呈显著上升趋势,达到 95% 置信度,平均变化速率为 -0.13 mm/10a,总体略呈下降趋势。

基于一元线性回归和 Mann-Kendall 检验趋势法(陈泽榕,2019)分析,沙漠周边地区的气温和降水量年际变化趋势基本一致,多年平均气温均呈波动上升趋势,且由南向北升温速率增大,最大升温

表 3 10 年为周期的气温和降水量 Mann-Kendall 趋势检验 Z 值(显著水平  $\alpha=0.05$ )

Table 3 The Z values of mann-Kendall trend test for temperature and rainfall follow a 10-year cycle (significant level  $\alpha=0.05$ )

时段/年	气温/℃				降水量/mm			
	额济纳旗	拐子湖	鼎新	阿拉善右旗	额济纳旗	拐子湖	鼎新	阿拉善右旗
1960—1969	6.08 * * *	-1.52	-1.43	-1.70 * *	0.72	0.72	1.97 * *	0.89
1970—1979	1.52 *	1.70 * *	0.80	0.63	1.43 *	1.07	-0.72	0.89
1980—1989	1.34 *	0.63	1.07	1.34 *	-1.44 *	-1.25	0.72	0.63
1990—1999	1.43 *	1.43 *	1.07	1.16	0.18	0.89	-1.07	0.72
2000—2009	1.52 *	0.27	0.54	0.18	0.54	1.07	1.07	0.54
2010—2017	2.23 * *	-2.09 * *	2.35 * * *	1.86 * *	1.11	-1.04	-0.87	0.00

注: \* \* \* 表示通过置信度 99% 显著性检验; \* \* 表示通过置信度 95% 显著性检验; \* 表示通过置信度 90% 检验

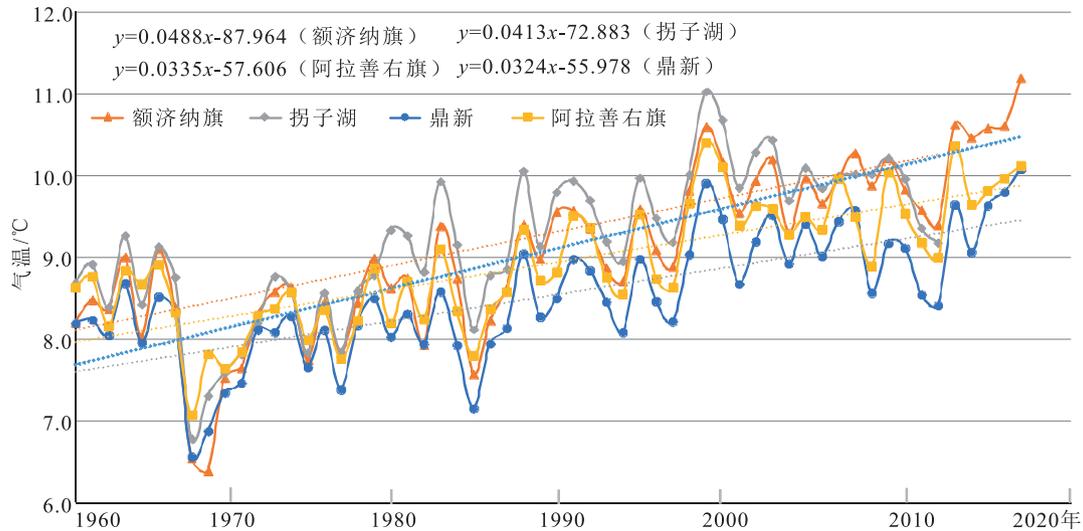


图2 气温年际变化趋势

Fig. 2 The annual variation trend of temperature

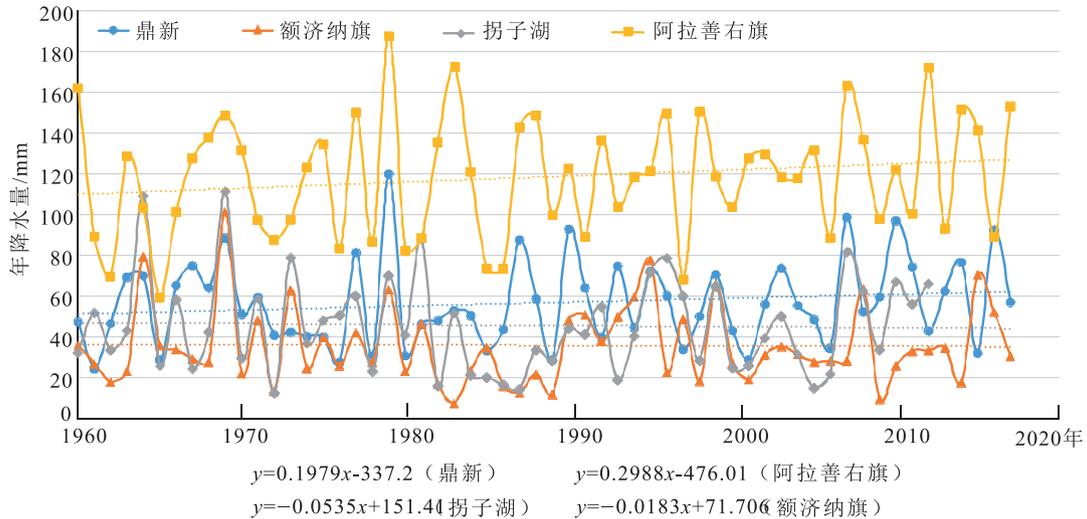


图3 降水量年际变化趋势

Fig. 3 The annual variation trend of precipitation

表4 巴丹吉林沙漠地区各站气温和降水量变化速率 (显著水平  $\alpha=0.05$ )

Table 4 The change rates of temperature and precipitation at different stations in the Badain Jaran Desert (significant level  $\alpha=0.05$ )

气象要素	趋势检验	额济纳旗	拐子湖	鼎新	阿拉善右旗
气温/ $^{\circ}\text{C}$	平均变化速率/ $10\text{ a}$	0.74	0.50	0.43	0.23
降水量/ $\text{mm}$	平均变化速率/ $10\text{ a}$	-0.13	-0.21	2.26	27.74

速率为  $0.74^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ; 降水量东北缘(额济纳旗和拐子湖)呈不显著减少趋势,西南缘(鼎新和阿拉善右旗)呈略有增加趋势。总体而言,工作区近50a东南缘气候呈暖湿化、西北缘气候呈暖干化趋势。

### 3.2 气温和降水量突变分析

由图4-a、c、e、g可知,拐子湖和额济纳旗降雨M-K曲线变化相似,1983—1990年降水量UF曲线呈现明显下降趋势,继而回升;阿拉善右旗降水量UF曲线持续呈波状上升状态,未见明显下降趋势;鼎新降水量UF曲线1973—1975年间呈现小幅下

降趋势,继而呈波状持续回升状态。沙漠周边地区年降水量的 UF 曲线自 1965 年以后均大于 0,部分年份呈下降趋势,但整体呈波状上升趋势,且均在 20 世纪 70 年代出现突变,但均介于信度线以内,突变趋势不明显。究其原因可能是 20 世纪 60—70 年代,该区冷空气活动逐年加强,零度层高度逐年下降,大气热容量逐年减小,空气中水汽含量逐年减少,对应大气层结趋于不稳定,导致降水量的变化趋势逐年增加(刘世祥等,2007)。

由图 4-b、d、f、h 可知,巴丹吉林沙漠周边地区 4 站点气温在 1965—2017 年间,UF>0,且呈波状上升趋势,1976 年以后均超过了置信线,上升趋势显著。拐子湖、阿拉善右旗、额济纳旗和鼎新的 UF 和 UB 曲线分别在 1977 年、1981—1985 年、1980—1984 年和 1980—1986 年出现交点,且阿拉善右旗、额济纳旗和鼎新交点不唯一,交点均位于置信线上,表明巴丹吉林沙漠周边气温在 20 世纪 70 年代末 80 年代初出现显著突变,且阿拉善右旗、额济纳旗和鼎新站出现多次显著突变,可见巴丹吉林沙漠周边气候自 20 世纪 70—80 年代开始向增暖趋势发展。

### 3.3 气温和降水量月际变化趋势

#### 3.3.1 沙漠周边气温和降水量月际变化趋势

依据巴丹吉林沙漠周边 4 个国家站点近 60a 的观测数据,编制的气温和降水量多年月际变化趋势如图 5、表 5 所示,巴丹吉林沙漠周边年度高温期集中于 6—8 月,气温最高值一般出现在 7 月,以东侧拐子湖气温最高,其次为北侧额济纳旗,最低值在 12 月;降水量多集中于 6—9 月,尤以 7—8 两月最多,降水量占全年的 50% 左右,其中位于沙漠东缘的拐子湖降水量占全年降水量最大,为 52.0%,极端年份(1962 年、1974 年)可达全年降水量 86%,其次为额济纳旗。总体而言,沙漠边缘气候具有水热同

表 5 1960—2017 年巴丹吉林沙漠周边降水量和气温月均值  
Table 5 The monthly averaged values of precipitation and temperature in the Badain Jaran Desert during 1960—2017

地点	7—8 月降水量/mm	7—8 月降水量占年度比	月最高气温/℃	月最低气温/℃
额济纳旗	17.3	49.0%	30.8(7 月)	-25.5(12 月)
拐子湖	23.5	52.0%	31.5(7 月)	-22.3(12 月)
鼎新	28.0	48.8%	26.7(7 月)	-18.8(12 月)
阿拉善右旗	55.5	46.2%	27.1(7 月)	-14.4(12 月)

期性,且具有高度集中性,夏季高温多雨,冬季寒冷干旱,位于沙漠东缘的拐子湖站气温最高、降水量年内变异性最高、降水量略高于降水量最小的额济纳旗。

#### 3.3.2 沙漠区气温和降水量月际变化趋势

根据沙漠区 3 个自建气象站点 2016—2018 年观测数据,编制了沙漠区的降水量和气温月均变化趋势图(图 6)。可见沙漠区与边缘气候月际变化趋势基本相同,也具有水热同期性、夏季高温多雨、冬季寒冷干燥的特点,但降雨主要集中于 6—8 月,雨期较沙漠边缘短。沙漠中部的西诺日图和东部的古日乃降水量 6—7 月最多,分别占全年降水量的 57% 和 71%;拐子湖南降水量 8—9 月最多,占全年降水量的 68.0%。

总体而言,巴丹吉林沙漠周边和沙漠区气候月际变化趋势基本相同,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,沙漠区降水主要集中在 6—8 月,而沙漠周边降水集中在 6—9 月,可以推测沙漠区雨季较沙漠边缘区短,且雨期较边缘区提前,该结论有待进一步研究。

### 3.4 湖泊变化

#### 3.4.1 湖泊面积变化

巴丹吉林沙漠湖泊是气候与环境长期演化的结果,其面积时空变化特征是湖泊演变的一项重要表征。前人研究发现,在年际尺度上巴丹吉林沙漠湖泊面积整体呈减小趋势,熊波等(2009)、张振瑜等(2012)研究认为,1973—2013 年(近 40 a)巴丹吉林湖泊数量和面积整体表现为减小趋势,虽也存在个别湖泊面积增大或湖泊新增,但湖泊在各个时期表现为不同程度的萎缩,其中,20 世纪 70—90 年代湖泊萎缩最快。金晓媚等(2014)利用 MDLWI 水体指数法,分析了巴丹吉林沙漠 1990—2010 年湖泊面积的年际变化趋势,得出结论 20 年间湖泊面积减少了 0.59 km<sup>2</sup>,呈缓慢减少趋势,与张振瑜等(2012)和熊波等(2009)结论一致。曹乐等(2020)分析国产卫星影像资料(2013 年 1 月至 2015 年 8 月 GF-1、GF-2)结合 Google Earth 影像基础上,认为近几十年沙漠中湖泊萎缩程度高,沙漠干旱化趋势明显,且基底凹陷区湖泊萎缩程度较低,基底隆起区湖泊萎缩程度较高,萎缩程度的差异性受区域构造基底的控制与影响。

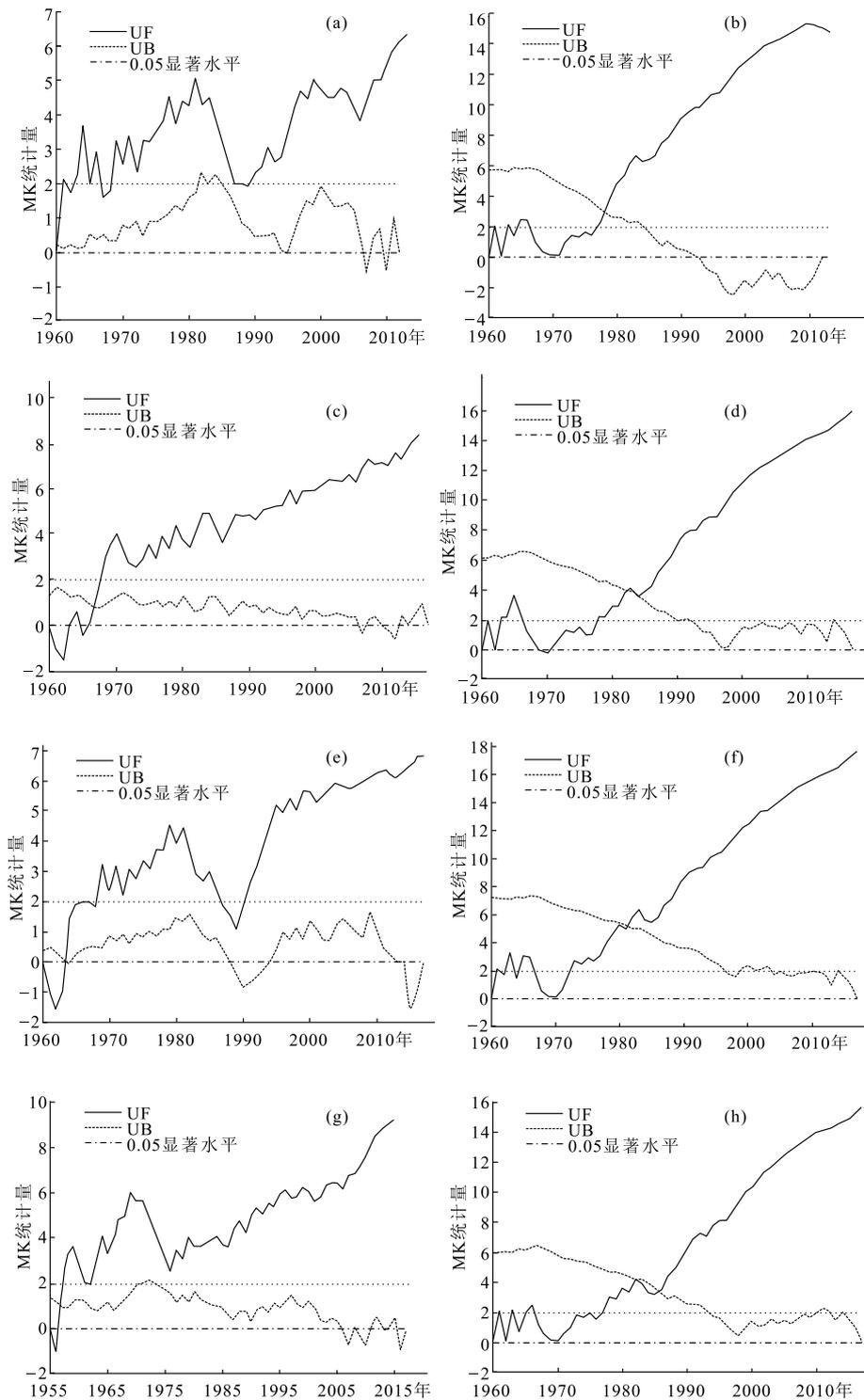


图4 1960—2017年4个站点巴丹吉林沙漠周边年降水量和年均气温 Mann-Kendall 突变检验 (UF是对具有 $n$ 个样本量的时间序列 $x$ 运用Mann-Kendall突变分析方程按 $x$ 顺序 $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ 计算出的统计结果序列; UB是对同样样本量运用同一方程按时间序列 $x$ 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 计算出的统计量序列)

Fig. 4 The Mann-Kendall mutation test of annual precipitation and annual average temperature at four weather stations in the Badain Jaran Desert during 1960–2017

a—拐子湖降水量;b—拐子湖气温;c—阿拉善右旗降水量;d—阿拉善右旗气温;e—额济纳旗降水量;f—额济纳旗气温;g—鼎新降水量;h—鼎新气温

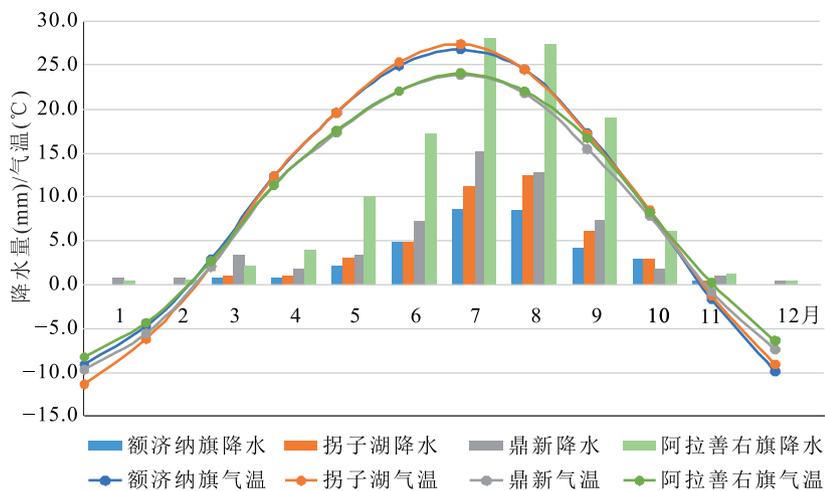


图 5 巴丹吉林沙漠周边多年月均降水量和气温月际变化趋势

Fig. 5 The monthly variation trend of precipitation and temperature in the Badain Jaran Desert

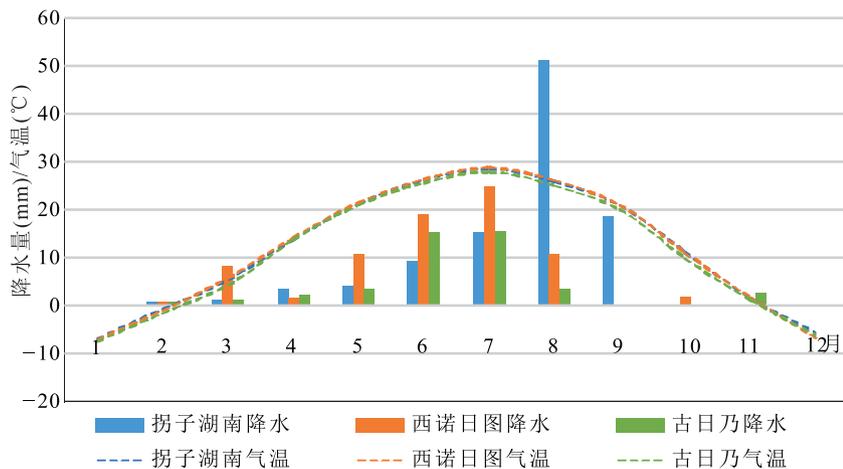


图 6 沙漠区降水量和气温月际变化趋势

Fig. 6 The monthly variation trend of precipitation and temperature in the desert region

在月际尺度上,湖泊数量与面积均在春季达到最大,夏、秋季依次减少,冬季和次年春季迅速回升,并在第二年 3 月重新达到最大,恢复到前一年水平;湖泊数量与面积的变化速率夏、春季快,秋、冬季较慢(熊波等,2009)。项目组 2014 年 8 月至 2015 年 8 月,开展了一个完整水文年湖泊动态监测工作,结果发现,湖泊丰水期处于 3、4 月之间,枯水期在 11 月附近出现。时间同比变化上,2015 年 8 月湖泊水体面积相比上年同期呈降低态势。

### 3.4.2 湖泊分裂趋势

在长时间序列下巴丹吉林沙漠湖泊水体整体

呈退缩分裂态势,分裂程度表现为东南高、西北低的特征,与地形特征不完全相同(朱金峰等,2010;贺鹏等,2017)。

### 3.4.3 湖泊水量变化研究

沙漠湖泊的水量变化研究是开展水资源调查、沙漠湖泊水循环及湖泊水量平衡研究的基础。结合前人研究成果分析,来婷婷等(2012)认为,巴丹吉林沙漠湖泊水量 2002 年内变化与降水量的变动趋势并不一致,3 月降水量极低,而湖泊水量为全年最大,从 5—12 月,降水量先逐渐增加后减少,变化幅度较大,而湖泊水量的变动却并不明显。朱金峰等(2010)利用 ETM+遥感影像,提取了湖泊年内季节变化信息,认为湖泊面积和数量在年内从春到冬随季节依次减少,到第二年春季又恢复到前一年春季状态。Jiao et al. (2015)利用卫星数据与重力恢复试验证明了沙漠湖泊水位与地下水水量在缓慢减少。曹乐等(2020)基于国产 GF-1、GF-2 卫星影像信息解译了巴丹吉林沙漠 110 个湖泊地质湖面高程和边界,认为这些湖泊萎缩程度较高,巴丹吉林沙漠现代湖泊湖面高程平均低于古湖面 9.76 m,湖泊总面积萎缩减小 61.052 km<sup>2</sup>,占古湖总面积的 75.49%,湖泊水量共减少 4.9×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

### 3.4.4 湖水位动态变化

月际尺度上,于欣冉(2020)认为,巴丹吉林沙漠湖泊水位与降水变化趋势不一致,其变化主要受季节性蒸发和地下水补给相对变化调控。其中在 4—10 月,蒸发大于地下水补给,湖泊水位下降;而 10 月至次年 4 月,蒸发小于地下水净补给,湖泊水位升高。

年际尺度上,曹乐等(2020)等认为,巴丹吉林沙漠现代湖泊湖面高程平均低于古湖面 9.76 m,整体呈萎缩趋势;于欣冉(2020)认为,2011 年 5 月—2016 年 2 月,车日格勒、璁滚诺尔、中诺尔图和巴润

伊克日的湖水位呈逐年下降的趋势,车日格勒下降幅度更大;呼和吉林、东诺尔图、苏木巴润吉林的湖水位呈先下降后上升的趋势。

综上所述,巴丹吉林沙漠区湖泊年际尺度上呈面积、水位和水量下降、数量分裂态势,整体呈现持续萎缩趋势;年度上湖泊面积、水量峰值处于3、4月之间,枯水期在11月,与降水量的变动趋势并不一致。

### 3.5 湖泊与气候要素的关系

综合分析,年际尺度上,沙漠周边年均气温呈波状上升(Song et al., 2023),年均降水量东北缘不显著减少,西南缘略有增加,整体区域气候呈东南缘暖湿化、西北缘暖干化趋势,且降水量、气温均在20世纪70—80年代发生突变;湖泊呈面积、水位和水量下降、数量分裂态势,整体呈现不同程度萎缩趋势,其中,在20世纪70—90年代湖泊萎缩最快(张振瑜等, 2012;熊波等, 2009)。月际尺度上,该区气候具有水热同期特点,沙漠区降水主要集中在6—7月,而湖泊面积、水量峰值出现在3—4月,两者变化趋势不一致。近60a来,该区气候发生突变与湖泊群萎缩最快时期一致,年度尺度上降水量与湖泊面积、水量的峰值不一致,据此可推断,当地气候暖干化突变是湖泊加速萎缩的一个重要因素,而年度尺度上降水量的变化不是湖泊面积、水量变化的主控因素,于欣冉(2020)推测湖泊年度的变化可能受季节性蒸发和地下水补给相对变化调控。

## 4 结论

(1)巴丹吉林沙漠周边地区温度均呈波状上升趋势,且由南向北升温速率增大,最大升温速率为 $0.74^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;东北缘(额济纳旗和拐子湖)年降水量呈不显著减少趋势,西南缘(鼎新和阿拉善右旗)呈略有增加趋势。总体而言,近50a工作区东南缘气候呈暖湿化,西北缘气候呈暖干化趋势。

(2)巴丹吉林沙漠周边年降水量、气温均在20世纪70—80年代出现突变,降水量突变不明显,气温突变显著,且阿拉善右旗、额济纳旗和鼎新站的气温出现多次显著突变,气候自此向暖干化趋势发展。

(3)巴丹吉林沙漠周边与沙漠区月际气候特征基本一致,具有水热同期,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥的特点。但沙漠区雨季较沙漠边缘区短,雨期

较边缘区提前。

(4)巴丹吉林沙漠区湖泊多年来呈不同程度萎缩趋势。年际尺度上,气候突变与湖泊群萎缩最快时期一致;年度尺度上,湖泊面积、水量峰值与降水量的变动趋势并不一致,据此可推断当地气候暖干化突变是湖泊加速萎缩的一个重要因素,年度尺度上降水量的变化并不是湖泊变化的主控因素。

## 参考文献

- Dong C, Wang N, Chen J, et al. New observational and experimental evidence for the recharge mechanism of the lake group in the Alxa Desert, northcentral China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 124: 48–61.
- Dong Z B, Qian G Q, Lv P, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 120: 20–39.
- Ma N, Wang N, Zhao L, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran Desert, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(2): 162–170.
- Mutowo G. Remote sensing lake level fluctuations in response to a changing climate[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2020, 11(1): 30–38.
- Jiao J J, Zhang X T, Wang X S. Satellite-Based Estimates of Groundwater Depletion in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8960–8971.
- Song S H, Nie Z L, Geng X X, et al. Response of runoff to climate change in the area of runoff yield in upstream Shiyang River Basin, Northwest China: A case study of the Xiyang River[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2023, 11(1): 89–96.
- Sun J, Hu W, Wang N A, et al. Eddy covariance measurements of water vapor and energy flux over a lake in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(4): 517–533.
- Wang X, Zhou Y. Investigating the mysteries of groundwater in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26: 1–17.
- Wen J, Su Z, Zhang T, et al. New evidence for the links between the local water cycle and the underground wet sand layer of a mega-dune in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(4): 373–377.
- Yi G H, Deng W, Li A N, et al. Response of lakes to climate change in Xainza Basin Tibetan Plateau using multi-mission satellite data from 1976 to 2008[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(3): 604–613.
- Zhang X, Wang N A, Xie Z, et al. Water loss due to increasing planted vegetation over the Badain Jaran Desert, China[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 134.
- 曹乐, 聂振龙, 姜高磊, 等. 基于GF卫星解译巴丹吉林沙漠湖泊水量变化[J]. *人民黄河*, 2020, 42(7): 40–45.
- 陈建生, 凡哲超, 汪集琦, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析[J]. *地球学报*, 2003, 4(6): 497–504.

- 除多,普穷,拉巴卓玛,等.近 40 a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析[J].湖泊科学,2012,24(3): 494-502.
- 高全洲,陶贞,董光荣.微量元素记录的化学风化和气候变化——以巴丹吉林沙漠查个勒布鲁剖面为例[J].中国沙漠,2001,21(4): 374-379.
- 贺鹏,童立强,郭兆成,等.基于遥感长时间序列下巴丹吉林沙漠湖泊演化分裂特征分析[J].科学技术与工程,2017,17(27): 122-126
- 姜宝福,张仁勇,衣学军,等.胶东半岛湖泊面积对气候变化的响应[J].地球环境学报,2020,11(4): 401-411.
- 金可,张乾柱,卢阳,等.巴丹吉林沙漠湖泊群水体氢氧同位素和水化学特征[J].人民长江,2022,53(4): 65-72.
- 金晓娟,高萌萌.巴丹吉林沙漠湖泊遥感信息提取及动态变化趋势[J].科技导报,2014,32(8): 15-21.
- 来婷婷,王乃昂,黄银州,等.2002 年腾格里沙漠湖泊季节变化研究[J].湖泊科学,2012,24(6): 957-964.
- 刘世祥,张杰,赵建华.甘肃河西地区近五十年气候突变分析[C]//第二届干旱气候变化与可持续发展国际学术研讨会论文集,2007,22(11): 66-72.
- 李万元,吕世华,董治宝,等.巴丹吉林沙漠周边地区降水量的时空变化特征[J].中国沙漠,2015,35(1): 94-105.
- 李燕.巴丹吉林镇近 58 年温度变化特征分析[J].三农论坛,2019,12(3): 15.
- 马金珠,陈发虎,赵华.1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录[J].科学通报,2004,49(4): 22-26.
- 马宁,王乃昂,李卓仑,等.1960—2009 年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析[J].干旱区研究,2011a,28(2): 242-250.
- 马宁,王乃昂,朱金峰,等.巴丹吉林沙漠周边地区近 50 a 来气候变化特征[J].中国沙漠,2011b,31(6): 1541-1547.
- 宁文晓,刘旭阳,王振亭.巴丹吉林沙漠温度和降水特征及空间分层异质性[J].中国科学院大学学报,2021,38(1): 103-113.
- 牛震敏,王乃昂,温鹏辉,等.巴丹吉林沙漠湖泊对浅层沙含水量的影响[J].中国沙漠,2022,42(2): 142-152.
- 邵天杰,赵景波,董志宝.巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征[J].地理学报,2011,66(5): 662-673.
- 苏俊礼.巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠降水特征研究[D].兰州大学硕士学位论文,2016.
- 王乃昂,宁凯,李卓仑,等.巴丹吉林沙漠全新世的高湖面与泛湖期[J].中国科学:地球科学,2016,46(8): 1106-1115.
- 杨小平.近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化[J].科学通报,2000,45(4): 428-434.
- 杨艺,李保生,李云卓,等.巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的 150 ka BP 以来的气候变化[J].中国沙漠,2007,27(1): 1-8.
- 熊波,陈学华,宋孟强,等.基于 RS 和 GIS 的沙漠湖泊动态变化研究——以巴丹吉林为例[J].干旱区资源与环境,2009,23(8): 91-98.
- 于欣冉.巴丹吉林沙漠湖泊区水位动态特征及补给来源研究[D].兰州大学硕士学位论文,2020.
- 闫立娟,郑绵平,魏乐军.近 40 年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应[J].地学前缘,2016,23(4): 310-323.
- 张虎才,明庆忠.中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成[J].地球科学进展,2006,21(5): 532-538.
- 张克存,姚正毅,安志山,等.巴丹吉林沙漠及其毗邻地区降水特征及风沙环境分析[J].中国沙漠,2012,32(6): 1507-1511.
- 张毅,孔祥德,邓宏兵,等.近百年湖北省湖泊演变特征研究[J].湿地科学,2010,8(1): 15-20.
- 张永香,於琨,伊红.巴丹吉林沙漠南缘 191a 来年降水量重建及初步分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(1): 12-16.
- 张振瑜,王乃昂,马宁,等.近 40 年巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化及其影响因素[J].中国沙漠,2012,32(6): 1743-1750.
- 赵景波,马延东,罗小庆,等.巴丹吉林沙漠沙山表层径流的发现机器指示意义[J].地理学报,2017,47(4): 46-472.
- 朱金峰,王乃昂,陈红宝,等.基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J].地理科学进展,2010,29(9): 1087-1094.