

# 呼伦湖流域近 55 年气候变化特征

吴丹瑞<sup>1,2</sup>, 耿欣欣<sup>3</sup>, 李明<sup>1,2</sup>

(1. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学), 南昌 330000;

2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 江苏南水科技有限公司, 南京 210012)

**摘 要:**收集了呼伦湖流域 1960—2014 年的逐日气温、降水、蒸发和相对湿度数据,提取了包括年平均、季节平均值及极端天气等 9 个指标,采用 Mann-Kendall 趋势检验、线性倾向估计法以及 5 a 滑动平均等方法在年和季节尺度上分析了该地区的气候变化趋势,并利用 Pearson 相关系数探究这四个气象要素之间的相关性。结果表明:(1) 年气温显著上升,降水变化不显著,蒸发显著减少,相对湿度显著降低,气候向暖干化方向发展。(2) 春夏秋冬温度、蒸发和相对湿度的变化趋势与年相同,最大升温速率发生在春季,每十年上升 0.43℃,冬季变化均不显著。(3) 平均降水和极端降水在冬春季节都显著增加,然而夏季降水以最大幅度减少,并且夏季持续时间较长的极端降水减少显著。(4) 夏季气温升高最显著,相对湿度显著降低,容易发生干旱。冬季极端降水增多则可能导致雪灾加剧。

**关键词:**气候变化; 气象要素; 呼伦湖流域; 气温; 干旱

**中图分类号:**P467

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2016)06-0174-05

## Characteristics of Climatic Changes in Hulun Lake Basin in Recent 55 Years

WU Danrui<sup>1,2</sup>, GENG Xinxin<sup>3</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330000, China; 2. College of Natural Resources and Environment,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Jiangsu Naiwch Co., Ltd, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** The changes of nine meteorological indicators on temperature, precipitation, evaporation and relative humidity from 1960 to 2014 in Hulun Lake basin were analyzed at the scales of year and season. The results show that: (1) annual temperature significantly increased but evaporation and relative humidity decreased significantly, the variation of annual precipitation was insignificant, these results indicated that the climate in this area became warmer and drier; (2) the variation of temperature, evaporation and relative humidity in spring, summer and autumn are similar to their interannual variations, the maximum rate of mean temperature rise occurred in spring with 0.43℃/decade, however, variations of the three meteorological elements were not significant in winter; (3) the mean precipitation and extreme precipitation increased significantly in both winter and spring, but in summer the precipitation decreased, especially the long-time extreme precipitation which decreased significantly; (4) summer climate in this area became much drier because of significant increase in temperature and decrease in relative humidity. The increasing extreme precipitation in winter would cause snow disaster in this area.

**Keywords:** climate change; meteorological element; Hulun Lake Basin; temperature; drought

全球气候变化带来一系列生态环境问题,如海平面上升、干旱、极端天气等等,近些年成为各国关注的热点问题。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出<sup>[1]</sup>,过去 130 年全球升温 0.85℃,最近 110 年全球平均海平面上升 0.19 m,过去 10 a 间冰川融化的速度比 20 世纪 90 年代加快了数倍,人类

活动极有可能是 20 世纪中期以来全球气候变暖的主要原因。在 RCP8.5 情形下,预计到 21 世纪末全球表面气温变化可能超过 2℃,平均降水在中纬度和副热带干旱区可能减少,在中纬度湿润地区可能增加<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来,极端天气事件如高温热浪、暴雨、干旱、冰雹等发生频率急剧上升,各种气象

收稿日期:2015-11-23

修回日期:2015-12-07

资助项目:鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金资助项目(PK2014003);国家自然科学基金(51409216)

第一作者:吴丹瑞(1992—),女,河南周口人,硕士研究生,研究方向是土壤侵蚀与水土保持。E-mail:wudanrui15@mails.ucas.ac.cn

通信作者:李明(1986—),男,甘肃庆阳人,副教授,博士,研究方向是水环境与生态水利。E-mail:lileaf@163.com

灾害也随之增加,给全球社会经济以及生态环境造成了严重的损失和破坏<sup>[2]</sup>。

呼伦湖是我国第五大淡水湖,也是北方第一大湖,与周围湿地被称为呼伦贝尔“草原之肾”,对呼伦贝尔草原的经济发展和生态保护起着重要作用<sup>[3]</sup>。呼伦湖流域位于中高纬度受东南季风影响的边缘区域,远离海洋,大陆性极强,同时又是南北冷暖气流交汇冲撞频繁的地区<sup>[4]</sup>,成为对全球气候变化的响应最积极,最敏感的地区之一。近年来,呼伦湖流域春夏连续干旱以及冬季特大雪灾发生频率加剧。研究表明,受气候趋向暖干化的影响,呼伦湖水源补给不足,导致水位下降,湖面萎缩,周围芦苇大面积减少,珍稀鸟类大量迁徙,生态环境严重恶化<sup>[5]</sup>。目前,针对呼伦湖流域对全球气候变化响应的研究成为热点,但是大多只是集中在气候变化对呼伦湖湿地生态环境的影响<sup>[3,5-7]</sup>,对呼伦湖流域的气候变化特征分析大多以年均气温和降水为主要气象要素,指标选取单一,缺乏对极端天气的研究,也没有分析相对湿度的变化。所以,利用连续多年观测到的气象要素资料提取多种指标以不同的时间尺度对呼伦湖流域的气候变化进行分析研究,以揭示多年来当地气候变化趋势,对呼伦湖流域生态环境的恢复、重建以及可持续发展提供科学的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 流域概况

呼伦湖也称达赉湖<sup>[8]</sup>,位于呼伦贝尔草原的中部,东经 117°00′10″—117°41′40″,北纬 48°30′40″—49°20′40″,呈不规则斜长方形。呼伦湖的水源补给除来源于大气降水和地下水外,主要依靠境外河流克鲁伦河,以及连接其“姐妹湖”贝尔湖的乌尔逊河。呼伦湖随着历史的构造运动和气候的变化,其面积也曾多次扩大或缩小。其历史记录最大水深 8 m,蓄水量达 138.5 亿立方米,由于气候变的干旱等原因,湖体水位不断下降。自 2000—2009 年,水位下降了约 4.6 m,湖面缩小了 477 km<sup>2</sup>,蓄水量比历史最大蓄水量减少了一半。从前呼伦湖最北部与海拉尔河相通,湖水可以外流进入黑龙江,现在已经断流成为内陆湖。

呼伦湖流域属于中温带半干旱草原气候,气候寒冷干燥,冬长夏短,春季干旱多风沙,秋季霜冻早,降温快。该地区年均气温 1.1℃,无霜期 110 d,年降雨量集中在 6—9 月,年均降雨量为 200~300 mm 左右<sup>[6]</sup>,湖水封冻时间长达 180 d,冰层厚可达 1 m 以上。

### 1.2 数据获得

本文根据位于呼伦湖流域中部的巴尔虎右旗

的气象观测站 1960—2014 年逐日平均气温、最高气温、降水、蒸发量以及相对湿度资料,分别计算了近 55 a 平均气温、最高气温和相对湿度的年、季节平均值以及降水和蒸发量的年、季节的总量,另外根据降水的日数据分别提取出年、季节的极端降水各指标所需数据。季节尺度的数据采用 1960 年 3 月至 2013 年 2 月,规定春季为 3—5 月,夏季 6—8 月,秋季 9—11 月,冬季 12 月至次年 2 月。

### 1.3 指标选取

本文分析气候变化趋势的气象要素有 4 种,其中气温有两个指标,分别为日平均最高气温和日平均气温,降水有五个指标,分为平均降水和极端降水,极端降水又有日最大降水量(AM1R)、连续 3 日最大降水量(AM3R)、连续 5 日最大降水量(AM5R)和连续 7 日最大降水量(AM7R),蒸发指标为总蒸发量,相对湿度为平均相对湿度。

### 1.4 分析方法

此研究采用 Mann-Kendall 非参数统计检验对呼伦湖流域近 55 a 的气候要素指标变化趋势进行检验,同时应用线性倾向估计、5 a 滑动平均分析气候要素的变化趋势,此外,还利用 SPSS 计算出 Pearson 相关系数来探究气象要素间的相关关系。

Mann-Kendall(简称 MK)是水文序列中最受欢迎的一种趋势检验方法<sup>[9-10]</sup>,被世界气象组织(WMO)广泛推荐应用于时间序列的趋势分析。许多研究人员利用 MK 趋势检验方法分析降水、气温、泥沙和径流等的时间序列的变化趋势。MK 检验中,原假设  $H_0$  为各指标时间序列数据  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  是独立同分布的;备择假设  $H_1$  是对于所有的  $k, j \leq n$ , 且  $k \neq j$ ,  $x_i$  与  $x_j$  具有不同的分布,检验统计量  $S$  被定义如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j > x_i \\ 0, & x_j = x_i \\ -1, & x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n$  是数据记录长度,即时间序列长度 55;  $x_i$  和  $x_j$  是连续数据值。当  $n \geq 10$  时,检验统计量  $S$  近似服从正态分布,均值和方差如下:

$$E[S] = 0 \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

式中: $m$  是固定组的数量; $t_i$  是第  $i$  个固定组的大小。我们通过以下计算将检验统计量  $S$  转化为标准检验统计量  $Z$ :

$$Z=\left\{\begin{array}{ll}\frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S<0\end{array}\right\} \quad (5)$$

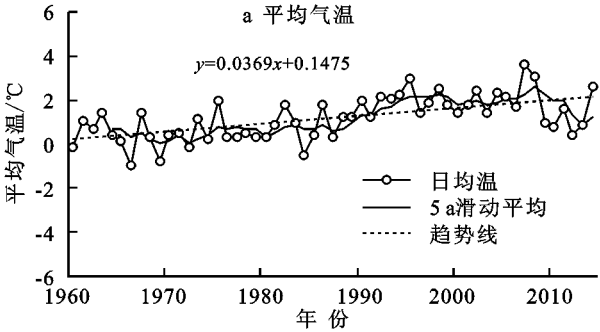
标准的 MK 检验统计量  $Z$  服从均值为零, 方差为 1 的标准正态分布, 属于没有趋势的零假设。如果  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 则原假设在置信水平为  $\alpha$  时不被接受,  $Z$  为正值代表上升趋势, 负值则代表下降趋势,  $Z$  的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时, 分别表示通过了置信度为 90%, 95%, 99% 的显著性检验, 本文以通过 95% 的置信度检验表示趋势显著。

MK 方法对数据有序列独立的要求。对时间序列进行分析时, 序列自相关性的出现会严重影响趋势检验的结果<sup>[11]</sup>。序列相关为正, 可能高估趋势的显著性; 相关为负, 可能导致低估。

$$y_t = x_t - \varphi x_{t-1} \quad (6)$$

式中:  $y_t$  是时间序列预白化的值;  $x_t$  是间隔时间为  $t$  的原始序列值;  $\varphi$  是滞后 1 个时间间隔的自相关系数。当序列相关在置信水平为 5% 显著时, 使用预白化处理。我们的指标变量中, 大部分没有显著的序列自相关性。在进行 MK 趋势检验之前, 首先利用预白化去除时间序列中的自相关。

利用已经提取出来的各项指标序列, 以时间  $t$  为



自变量(年或月), 各气象要素指标为因变量, 建立一元回归方程, 方程为下式, 即

$$y(t) = b_0 + b_1 t \quad (7)$$

$$d_y(t)/dt = b_1 \quad (8)$$

式中:  $b_0, b_1$  通过最小二乘法获得。将  $b_1 \times 10$  称为变化倾向率, 表示每十年的变化大小。  $b_1$  为正值, 表示在计算时段内有增加(上升)趋势,  $b_1$  为负值, 表示有减少(降低)趋势, 绝对值越大, 变化程度越大<sup>[12]</sup>。

5 a 滑动平均我们采用前五年的平均值作为第五年的值, 依次后推。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度与蒸发的年际变化

近 55 a 呼伦湖流域的年平均气温存在年际间的微小波动, 但整体上升趋势明显(图 1a)。其变化倾向率为  $0.37^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 即 55 a 气温上升了  $2^\circ\text{C}$ 。MK 检验的标准检验统计量  $Z$  值为 4.54, 即年平均气温在 0.01 水平上显著上升, 与众多前人研究结果<sup>[3,6,13]</sup> 以及全球变暖的大趋势一致。从 5 a 滑动平均可以看出, 20 世纪 60 年代初至 80 年代后期该地区年平均气温呈现微小波动上升, 80 年代后期至今上升速率加大, 年际间波动也较之前大。年际间平均最高气温的变化趋势与平均气温相同(图 1b), 其变化倾向率为  $0.27^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $Z$  值为 3.17, 上升趋势显著。

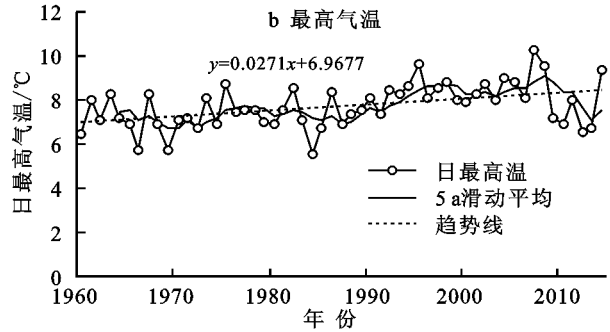


图 1 呼伦湖流域年际气温变化

近 55 a 研究区年蒸发量平均值为 2 113.9 mm。MK 检验的  $Z$  值为  $-2.58$ , 绝对值大于 2.32, 说明蒸发量在 0.01 水平显著减少, 与张娜等的研究结果相反<sup>[6]</sup>, 可能是我们的时间尺度更长的原因。该地区温度显著上升, 饱和蒸汽压增大, 理论上蒸发应该增加, 但是由图 2 中的 5 a 滑动平均可知, 年总蒸发量在波动中显著减少。可见, 该地区蒸发量的减少与气温变化关系不大, 影响蒸发量的因子除气温外还包括太阳辐射、风速、云量、水汽压等<sup>[14]</sup>, 如沙尘、雾霾以及其他气溶胶增加可能会对太阳短波辐射的散射增强, 这种衰减效应会导致蒸发量减少。

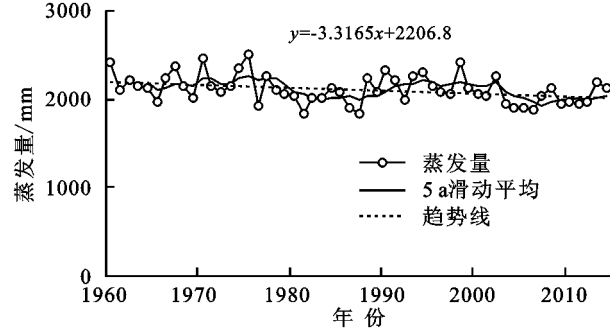


图 2 呼伦湖流域年际蒸发变化曲线

### 2.2 降水与湿度的年际变化

近 55 a 呼伦湖流域年际变化呈现微小减少趋势

(图 3), 年均降水量 243.3 mm。Z 值为-0.73, 没有达到 0.01 的显著性水平, 说明降水量减少不显著, 与赵慧颖等的研究结果一致<sup>[3]</sup>。由 5 a 滑动平均可以看出, 20 世纪 60 年代初至 70 年代初降水量明显减少, 70 年代初至 90 年代中期降水量缓慢波动增加, 90 年代中期至今降水量减少迅速。

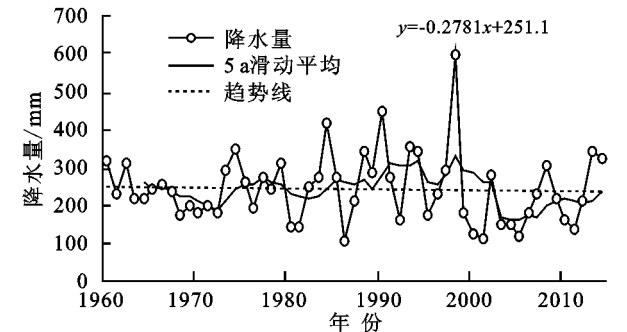


图 3 呼伦湖流域年际降水变化曲线

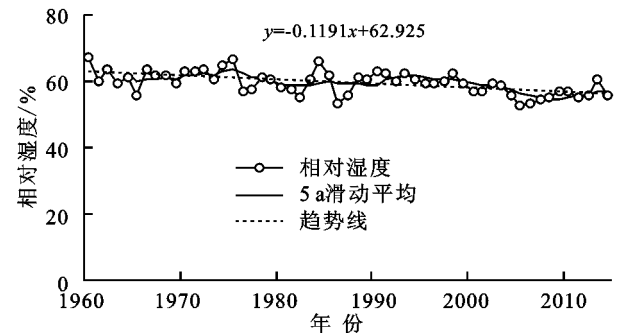


图 4 呼伦湖流域年际湿度变化曲线

表 1 不同季节温度、湿度及蒸发的线性倾向估计及 M-K 分析结果

参 数		春季	夏季	秋季	冬季
日平均气温	变化倾向率/(℃/10 a)	0.43	0.39	0.38	0.23
	Z 值	3.13**	3.74**	3.42**	1.41
日最高气温	变化倾向率/(℃/10 a)	0.28	0.37	0.29	0.06
	Z 值	1.99*	3.11**	1.96*	0.53
相对湿度	变化倾向率/(%/10 a)	-1.01	-2.29	-1.16	-0.31
	Z 值	-1.84*	-4.20**	-2.83**	-1.01
蒸发	变化倾向率/(mm/10 a)	-5.03	-26.52	-5.53	1.78
	Z 值	-0.47	-2.48**	-1.66*	1.48

注:“\*”,“\*\*”分别代表通过 0.05,0.01 水平显著性检验。

降水是呼伦湖流域的敏感气象要素,降水减少是导致干旱的最主要原因。在年降水量变化不显著的前提下,呼伦湖流域的冬春季降水显著增加(表 2),秋季稍微增加,夏季降水减少,虽然夏季减少趋势没有达到 0.05 的显著性水平,但是其变化倾向率的绝对值最大,是冬春秋季降水增加的二倍还要多。极端降水在冬春季同样显著增加,春季除 AM3R 外都达到 0.05 的显著性水平,冬季几乎所有指标都达到 0.01 的显著性水平,夏季持续时间较长的极端降水显著减少,秋季没有明显变化。

呼伦湖流域属于中纬度半干旱区,季节尺度对全

多年来呼伦湖流域平均相对湿度为 59.6%。MK 检验的 Z 值为-4.19, 绝对值大于 2.32, 所以相对湿度在 0.01 水平上显著降低。近 55 a 相对湿度的变化倾向率为-1.19%/10 a, 即 55 a 降低了 6.5%。相对湿度的稳定波动降低(图 4)反映了研究区近 55 a 来干旱正在逐渐加重, 是温度显著上升、降水减少的结果。

2.3 气候要素的季节变化规律

由表 1 可以看出, 春夏秋季的温度、湿度和蒸发的变化趋势与冬季差异很大。根据 Z 值可知温度的两个指标日平均气温和日最高气温在春夏秋季都显著上升。日平均气温的变化倾向率在春季最大, 为 0.43℃/10 a, 55 a 来上升了 2.37℃, 比年平均气温上升快, 说明春季为温度上升做贡献最大。日最高气温的变化倾向率在夏季最大, 并且 Z 值超过 2.32, 说明夏季日最高气温在 0.01 水平显著上升, 极端高温天气在夏季发生的强度增大, 促进干旱的产生。冬季的温度变化不明显, 有微小的上升趋势, Z 值没有达到 0.05 的显著水平。蒸发在春夏秋都有减少趋势, 其中夏季和秋季均达到了显著水平, 夏季蒸发减少最迅猛, 变化倾向率几乎是春季或秋季的五倍, 与之相反, 冬季蒸发呈不显著的增加趋势。相对湿度在四季都下降, 除冬季外, 其他季节都显著下降, 其中夏季下降最迅速, 依次为秋季、春季。

表 1 不同季节温度、湿度及蒸发的线性倾向估计及 M-K 分析结果

参 数		春季	夏季	秋季	冬季
日平均气温	变化倾向率/(℃/10 a)	0.43	0.39	0.38	0.23
	Z 值	3.13**	3.74**	3.42**	1.41
日最高气温	变化倾向率/(℃/10 a)	0.28	0.37	0.29	0.06
	Z 值	1.99*	3.11**	1.96*	0.53
相对湿度	变化倾向率/(%/10 a)	-1.01	-2.29	-1.16	-0.31
	Z 值	-1.84*	-4.20**	-2.83**	-1.01
蒸发	变化倾向率/(mm/10 a)	-5.03	-26.52	-5.53	1.78
	Z 值	-0.47	-2.48**	-1.66*	1.48

球气候变化的响应是夏季温度大幅度上升同时伴随着降水减少, 冬季增温不明显同时平均降水和极端降水均显著增加。夏季越来越干旱, 冬季出现雪灾的频率可能加剧。春季温度升高的同时降水增多, 可能对作物生长有利。秋季温度升高、相对湿度降低的同时降水没有变化, 呈现出干燥的趋势。总的来说, 气候趋向暖干化。

2.4 各要素间的相关关系

本文利用呼伦湖流域降水、气温和相对湿度的年均值以及年总蒸发量四个气象要素的时间序列进行相关性分析。由表 3 可以看出, 相对湿度同降水和气温的相

关系数分别是 0.509 和 -0.391,根据  $t$  检验,相对湿度同降水和气温的相关系数都通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验,说明相对湿度同降水量之间呈正相关,同气温呈负相关,即降水量少的年份相对湿度低,气温越高相对湿度越低。蒸发同降水和相对湿度的相关性系数分别为

0.596,0.744,均在 0.01 水平显著相关,说明蒸发量大的年份相对湿度也高,由于此地区相对湿度整体较小,因此,相对湿度不是蒸发量的限制因子,反倒随着蒸发量的增加,相对湿度会略微增大。蒸发和气温的相关性系数是 0.015,没有达到显著相关。

表 2 不同季节平均降雨和极端降雨指标的线性倾向估计及 M-K 分析结果

参 数		春季	夏季	秋季	冬季
平均降水	变化倾向率/(mm/10 a)	2.72	−8.65	0.20	1.16
	Z 值	2.25*	−1.57	−0.52	2.96**
AM1R	变化倾向率/(mm/10 a)	1.06	−0.71	−0.03	0.27
	Z 值	1.85*	−0.66	0.07	2.52**
AM3R	变化倾向率/(mm/10 a)	1.02	−2.46	−0.43	0.38
	Z 值	1.25	−1.39	−0.07	2.52**
AM5R	变化倾向率/(mm/10 a)	0.98	−3.29	−0.30	0.39
	Z 值	1.75*	−1.82*	0.02	2.22*
AM7R	变化倾向率/(mm/10 a)	1.26	−4.28	−0.64	0.42
	Z 值	1.97*	−1.91*	0.01	2.36**

注:“\*”、“\*\*”分别代表通过 0.05,0.01 水平显著性检验。

表 3 各气象要素的 Pearson 相关性分析结果

	降水	气温	相对湿度	蒸发
降水	1			
气温	0.050	1		
相对湿度	0.509**	−0.391**	1	
蒸发	0.596**	0.015	0.744**	1

注:“\*\*”代表在 0.01 水平(双侧)显著性相关。

呼伦湖流域近 55 a 降水、气温、相对湿度和蒸发的相关性与其他地区有些不同,甚至完全相反<sup>[15]</sup>,特别是温度高的年份相对湿度低,蒸发和温度没有显著相关性。研究表明潜在蒸散量与平均风速、平均气温、日照时数呈正相关,与相对湿度呈负相关,风速的下降是蒸发量减少的主要原因<sup>[16]</sup>。而 Stahill 等<sup>[17]</sup>则认为大气中浮尘、霾等气溶胶的增加导致了有效辐射量的减少,蒸发量减少。由此可知,此研究区温度上升,气溶胶粒子上升,削弱太阳辐射,减少蒸发量。研究区属于半干旱地区,水是限制因子,蒸发量随着温度的升高而减小,但是温度升高使得饱和水汽压增大,造成相对湿度下降。

3 结 论

(1) 近 55 a(1960—2014 年)呼伦湖流域平均气温和最高温均在 0.01 水平上显著上升,降水量变化不显著,相对湿度显著降低,气候向暖干化发展。

(2) 气候变化在不同季节趋势有所不同。春、夏和秋季在日均温、日最高温以及相对湿度这三个指标的变化趋势相同,均表现为温度显著上升、相对湿度显著下降,最大升温速率发生在春季,日平均气温每十年上升 0.43℃,其他指标夏季变化倾向率最大,这

三个指标在冬季的变化趋势都不显著。蒸发在春夏秋季为减少趋势,并且夏秋季达到显著水平,冬季为不显著的增加趋势。无论平均降水还是极端降水冬春季节均表现为显著的增多趋势,相反,夏秋季节为不显著的减少趋势,其中夏季历时较长的极端降水(AM5R 和 AM7R)减少显著。

(3) 呼伦湖流域近 55 a 干旱加重主要是因为气温升高,饱和水汽压增大,然而全年降水却没有增加,蒸发不足,相对湿度显著降低,干旱持续加重。夏季气温升高显著,降水减少幅度最大,相对湿度显著降低,相比于其他季节,最易变干旱,而冬季虽然降水增多,极端降水也增多了,雪灾可能也随之增多。

参考文献:

[1] Intergovernmental panel on climate change. climate change 2013: The physical science basis; Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 万仕全. 中国降水与温度极值的时空分布规律模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.

[3] 赵慧颖, 李成才, 赵恒和, 等. 呼伦湖湿地气候变化及其对水环境的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 795-801.

[4] 兰玉坤. 内蒙古地区近 50 年气候变化特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.

[5] 赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1064-1071.

[6] 张娜, 乌力吉, 刘松涛, 等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 192-197.

性最高,而林地最小。各乡镇在开发过程中应尽量减少人类活动对生态系统的干扰,降低生态敏感性,增强其恢复力,从而降低其生态脆弱性。

#### 参考文献:

- [1] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报, 2007,27(4):1257-1264.
- [2] 刘晶,刘学录,侯莉敏. 祁连山东段山地景观格局变化及其生态脆弱性分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):795-805.
- [3] Tixier J, Dandrieux A, Dusserre G, et al. Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006,130(3):251-264.
- [4] 吴健生,宗敏丽,彭建. 基于景观格局的矿区生态脆弱性评价:以吉林省辽源市为例[J]. 生态学杂志,2012,31(12):3213-3220.
- [5] 张笑楠,王克林,张伟,等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J]. 生态学报,2009,29(2):749-757.
- [6] Birkmann J, Tetzlaff G, Zentel K O. Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies[M]. New York: United Nations University, 2006.
- [7] He L I, Pingyu Z. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展,2011,30(7):920-929.
- [8] 喻鸥,阎建忠,张懿铨. 区域气候变化脆弱性综合评估研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(1):27-34.
- [9] 石青,陆兆华,梁震,等. 神东矿区生态环境脆弱性评估[J]. 中国水土保持,2007(8):24-26.
- [10] 顾康康,刘景双,王洋,等. 辽中地区矿业城市生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学,2008,28(6):759-764.
- [11] 卢远,苏文静,华瑾. 基于景观格局和生态敏感性的左江流域生态脆弱性分析[J]. 水土保持研究,2011,18(3):78-82.
- [12] 孙平军,修春亮. 基于 PSE 模型的矿业城市经济发展脆弱性研究[J]. 地理研究,2011,30(2):301-310.
- [13] 陈百明,周小萍.《土地利用现状分类》国家标准的解读[J]. 自然资源学报,2007,22(6):994-1003.
- [14] 封建民,郭玲霞,李晓华. 基于景观格局的陕北资源富集区生态脆弱性评价:以陕西省神木县为例[J]. 水土保持通报,2015,35(4):271-276.
- [15] 曹运江,宋伟,冯少真,等. 贵州广致煤矿矿山环境影响范围与程度界定研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2010,25(3):36-41.
- [16] 贾艳红,赵军,南忠仁,等. 基于熵权法的草原生态安全评价:以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志,2006,25(8):1003-1008.
- [17] 孙平军,修春亮,王忠芝. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究:以辽宁阜新为例[J]. 经济地理,2010,30(8):1354-1359.
- [18] 黄莹,包安明,刘海隆,等. 基于景观格局的新疆生态脆弱性综合评价研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):261-266.
- ~~~~~
- (上接第 178 页)
- [7] 白美兰,郝润全,沈建国. 近 46a 气候变化对呼伦湖区域生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(1):101-107.
- [8] 王素慧,梁宏伟,杨玉生. 呼伦湖湿地水环境治理对策[J]. 内蒙古水利,2006,105(1):35-40.
- [9] Mann HB. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945,13(3):245-259.
- [10] Kendall MG. Rank [M]. Correlation Measures, London: Charles Griffin, 1975.
- [11] Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S. Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region, China[J]. Climatic Change, 2012,110(1/2):403-429.
- [12] 陆志华,夏自强,于岚岚,等. 松花江流域年降水和四季降水变化特征分析[J]. 水文,2012,32(2):62-71.
- [13] 顾润源,李思慧,赵慧颖,等. 呼伦湖流域径流对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2012,31(6):1517-1524.
- [14] 郑广芬,陈晓光,孙银川,等. 宁夏气温,降水,蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. 气象科学,2006,26(4):412-421.
- [15] 吉磊,何新林,刘兵,等. 近 50a 玛纳斯河流域上游气候变化的分析[J]. 长江科学院院报,2014,31(12):21-27.
- [16] 李敏敏,延军平. “蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨[J]. 资源科学,2013,35(11):2298-2307.
- [17] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural and forest meteorology, 2001,107(4):255-278.