

Analysis on Variation Feature of Pan Evaporation and Effect Factors in Chang Tang Nature Reserve of Tibet during 1971-2017

Jun Hu¹, Jun Du^{2*}, Lei Yuan¹

¹Climatic Center of the Tibet Autonomous Region, Lhasa Tibet

²Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa Tibet

Email: hujun0891@126.com, dujun0891@163.com

Received: May 10th, 2019; accepted: May 23rd, 2019; published: May 30th, 2019

Abstract

Studying the prospect of the status quo and utilization of water resources in Chang Tang Nature Reserve of Tibet (CTNRT) can provide important reference value for ecological environmental protection in CTNRT. Using the data of monthly pan evaporation and its impact climatic factors (for instance, sunshine duration, wind speed, relative humidity, precipitation and daily temperature range etc.) at 5 meteorological stations in CTNRT from 1971 to 2017, we analyze the trend by using of linear trend analysis, complete correlation coefficient and Mann-Kendall test. The results showed that: 1) The annual pan evaporation exhibited significant decreasing trend with a rate of 34.4 mm/10a in CTNRT during the recent 47 years, especially in the recent 27 years, and indicating that the reducing trend was obvious in spring and summer, whereas the maximum decrease was in spring with a rate of 15.1 mm/10a. 2) The increase trends of mean temperature and precipitation are found in CTNRT. Significant decline trends of daily temperature range, sunshine duration and wind speed are detected. The annual amount of pan evaporation had a positive relationship with the sunshine duration, wind speed and daily temperature range, while it had a negative relationship with the precipitation and relative humidity. The main factors accounted for the descending of evaporation in nature reserve region were the reduction of daily temperature range and wind speed. 3) The M-K mutation test shows that the abrupt change of the annual and spring pan evaporation in CTNRR occurred in 2011.

Keywords

Pan Evaporation, Change Trend, Climate Abrupt, Chang Tang Nature Reserve of Tibet

*通讯作者。

1971~2017年羌塘国家级自然保护区蒸发量变化特征及影响因素分析

胡 军¹, 杜 军^{2*}, 袁 雷¹

¹西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨

²西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨

Email: hujun0891@126.com, dujun0891@163.com

收稿日期: 2019年5月10日; 录用日期: 2019年5月23日; 发布日期: 2019年5月30日

摘 要

研究羌塘国家级自然保护区水资源现状和利用前景, 可为自然保护区生态环境保护提供重要的参考价值。本文利用1971~2017年自然保护区5个气象站逐月蒸发皿蒸发量、日照时数、平均风速等资料, 采用线性回归、完全相关系数和Mann-Kendall等方法, 分析了自然保护区年、季蒸发皿蒸发量的气候变化特征及其影响气象因子。结果表明: 1) 近47a自然保护区年蒸发量呈显著的减少趋势, 为 $-34.4 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 特别是近27a年蒸发量减少更明显; 主要表现在春、夏两季, 以春季减幅最大, 为 $-15.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。2) 影响蒸发量的主要气象因子气温和降水量都呈上升趋势, 而气温日较差、日照时数和平均风速均趋于下降。平均风速和气温日较差的显著减小是引起蒸发量下降的主要因素。3) M-K检测显示, 自然保护区只有年和春季蒸发量发生了气候突变, 突变时间均出现在2011年。

关键词

蒸发皿蒸发量, 变化趋势, 气候突变, 羌塘国家级自然保护区

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

蒸发是全球能量和水循环的关键环节, 也是决定各地区天气与气候状况的重要因子。蒸发作为潜热通量是决定天气与气候的重要因子, 是水循环中最直接受土地利用和气候变化影响的一项, 对气候变化的响应十分敏感, 是地球系统中最活跃的因子之一。

近 30 a 来学者们在分析蒸发皿蒸发量(以下简称蒸发量)变化趋势时发现蒸发量不升反降[1] [2] [3], 这种现象在北半球表现的尤为明显。Michael 等[4]将全球气温升高与潜在蒸散量减少同时发生的水文气候现象称之为“蒸发悖论”。这种“蒸发悖论”现象在我国也存在[5]-[18], 至于“蒸发悖论”产生的原因, 不同学者持有不同的观点, 归纳起来包括: 由于大气中云量的增加, 造成太阳辐射量的下降[4] [6] [9] [10]; 由于大气中气溶胶等污染物的增加, 造成太阳辐射量的下降[7]; 由于空气湿度的增加, 造成水汽压差减小[5] [13]; 由于夏季季风的变化, 引起陆面风速的下降[6] [15] [17] [18]; 等等。

青藏高原作为“第三极”和“世界屋脊”，在全球暖化的大背景下，近几十年来青藏高原存在明显的暖湿化趋势[19][21]，蒸发作为地气系统之间能量和水分交换的纽带，分析蒸发量的变化及成因有助于正确分析和认识气候变化的事实及其对青藏高原生态环境产生的影响。鉴于此，国内学者对青藏高原蒸发量的时空变化及成因也进行了广泛的研究[6][22][23][24][25]，不过研究成果年限大多截止于21世纪初，而近10a最新变化的研究尚未见报道，尤其是针对羌塘自然保护区蒸发量的变化特征更是鲜有报道。羌塘高原作为典型的青藏高原内流区，其降水、蒸发的变化直接影响自身及其周边区域冰冻圈与生态系统的变化。当前全球变暖日益显著，分析近47a(1971~2017年)自然保护区蒸发皿蒸发量变化的时空分布，并对造成蒸发量变化的气候因子进行讨论，这不仅有助于更好地了解自然保护区对气候变化的响应，也可为该区域的水资源管理和生态环境保护提供重要的参考依据。

2. 研究区概况

羌塘国家级自然保护区位于西藏自治区西北部，昆仑山、可可西里山以南，冈底斯山和念青唐古拉山以北，地处北纬32°12'~36°29'，东经79°59'~90°26'之间，平均海拔5000m以上，被称为“世界屋脊的屋脊”。保护区面积约 $29.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，它是我国面积最大的自然保护区，是仅次于格陵兰国家公园的世界第二大陆地自然保护区，也是平均海拔最高的自然保护区。行政隶属西藏那曲市西部三县(安多、尼玛、双湖)和阿里地区北部三县(改则、日土、革吉)。

自然保护区空气稀薄，自然环境严酷，气候寒冷而干燥，属于高原寒带季风干旱的气候类型。年平均气温大都在0℃以下，高原的西北边缘属寒带气候，年平均气温可低至-5℃以下。南羌塘海拔4200~5000m亚寒带地区，最暖的7月份平均气温为6℃~10℃，局部地区可达12.8℃；北羌塘海拔5000m以上的寒带地区为3℃~6℃，最冷月平均气温都在-10℃以下。年降水量50~460mm，其中80%以上集中于6~9月，干湿季分明，但多为雪、霰、雹等固态降水形式。自然保护区光照条件充足，全年日照时数2800~3600h，年太阳辐射总值在6100MJ/m²以上，远超过同纬度地区。羌塘草原冬春多大风，高原风力强，频度高，年大风日数大于100d，如安多站大风日数平均每年有123d，最多可达283d(1976年)。

3. 资料和方法

自然保护区内无气象站，只能选取自然保护区边缘的狮泉河、改则、申扎、班戈和安多5个气象站(图1)1971~2017年逐月蒸发皿蒸发量(E20)、日照时数、平均风速、相对湿度、降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温等资料，按12~2月为冬季，3~5月为春季，6~8月为夏季，9~11月为秋季生成逐季气象要素序列，并通过算术平均法建立自然保护区的年、季气象要素序列。多年平均值采用1981~2000年的标准气候平均值。

由于各站先后在2002年以后，5~9月使用了E601B型大型蒸发皿进行观测蒸发量，为了保证E20资料的延续性和可比性，笔者采用等比方法[23]对其进行了折算转化，即：

$$E_s = E_b \times \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_b} \quad (1)$$

式(1)中， E_s 为E20型蒸发皿蒸发量(mm)， E_b 为E601B型蒸发皿蒸发量(mm)； \bar{E}_s 为1971~2000年E20型蒸发皿蒸发量的平均值(mm)， \bar{E}_b 为2002~2017年E601B型蒸发皿蒸发量的平均值(mm)。

线性变化趋势[23]采用公式(2)进行计算：

$$Y = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

式(2)中， Y 为气象要素； t 为时间； a_0 为常数项； a_1 为线性趋势项，把 $a_1 \times 10$ 年称为气象要素每10年的

气候倾向率。对于变化趋势的显著性,采用时间 t 与原序列变量 y 之间的相关系数进行不同程度的显著性检验($P < 0.10$, $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$)。

由于影响蒸发量的因子较多,为准确分析其主要影响因子,文中采用完全相关系数法[9] [20],即该因子既与蒸发量有较高的相关性又随时间发生显著变化,完全相关系数见公式(3)。

$$R = r_c \times r_t \quad (3)$$

式(3)中: R 为完全相关系数, r_c 为气象要素与蒸发量的相关系数, r_t 为气象要素与时间的相关系数。因而,只有当某气象要素既与蒸发量相关性较强,且随时间发生显著变化时,它与蒸发量的完全相关系数才比较大。 r_c 与 r_t 必须通过 $P < 0.05$ 。

应用 Mann-Kendall 方法(简称 M-K 法)进行突变检验[26],以分析蒸发量的气候突变特征。

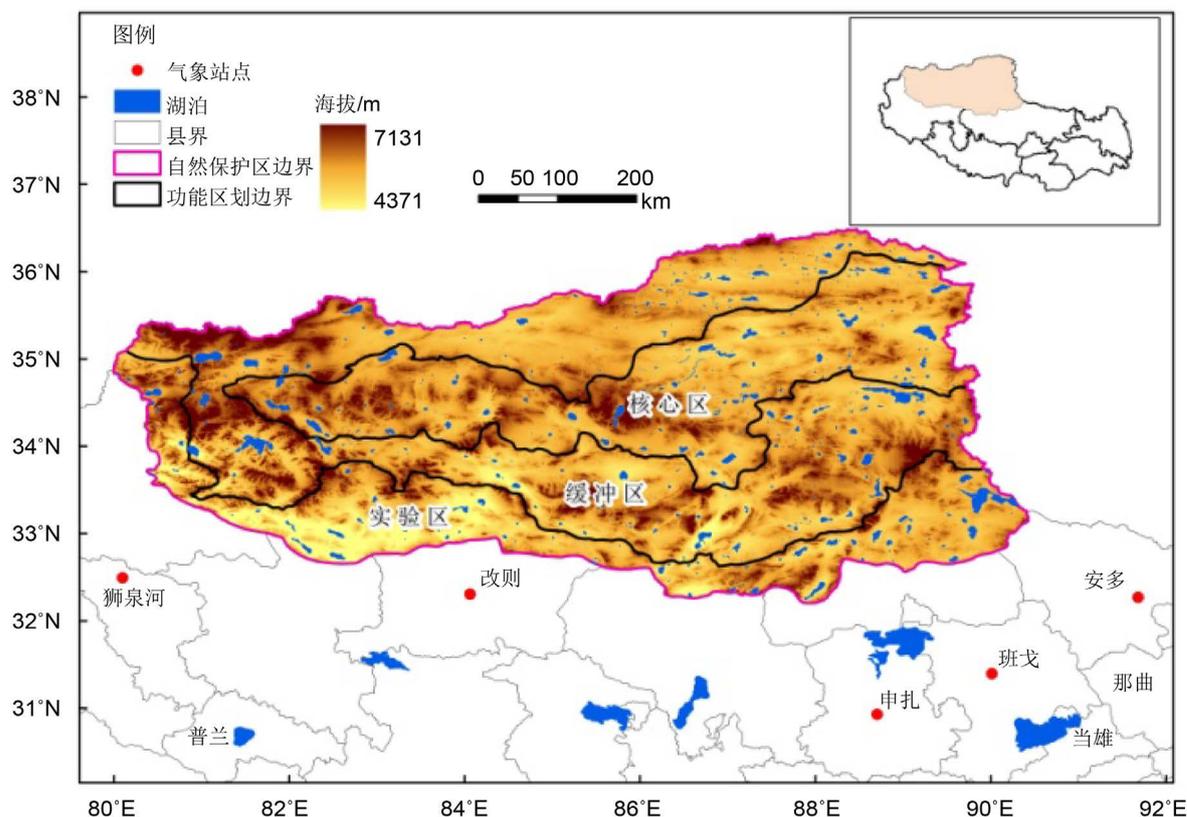


Figure 1. Map showing the meteorological stations in Chang Tang Nature Reserve of Tibet (CTNRT)

图 1. 羌塘自然保护区气象站点分布图

4. 结果分析

4.1. 蒸发量变化特征

4.1.1. 变化趋势

表 1 给出了 1971~2017 年自然保护区年、季蒸发量的变化趋势,结果发现,近 47 a 无论是年蒸发量还是四季蒸发量均呈减少趋势,年蒸发量平均每 10 年减少 34.4 mm (图 2, $P < 0.01$),四季蒸发量以 $-3.8 \sim -15.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速度趋于减少,其中春季减幅最大($P < 0.05$),其次是夏季,为 $-12.4 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.10$),秋季减幅最小。近 27a (1991~2017 年)自然保护区年蒸发量减少趋势更明显,减少趋势达 -61.1

$\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$), 主要表现在春、夏两季, 分别为 $-41.9 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$)和 $-33.4 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$); 而秋、冬两季蒸发量却呈增加趋势, 以冬季增幅较大, 为 $10.4 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

从蒸发量变化趋势的空间分布来看, 在年尺度上, 近 47 a 蒸发量除狮泉河以 $16.8 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度呈不显著的增加趋势外, 其他各站均表现为减少趋势, 平均每 10 年减少 22.2~93.4 mm, 其中申扎减幅最大($P < 0.001$), 其次是安多, 为 $-59.7 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$), 改则减幅最小。

在季尺度上, 近 47 a 春季蒸发量除狮泉河为增加趋势($7.1 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$)外, 其他各站呈减少趋势, 为 $-4.7\sim-41.6 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 以申扎减幅最大($P < 0.001$), 改则最小。夏季, 蒸发量仅在狮泉河表现为增加趋势, 为 $6.6 \text{ mm}/10\text{a}$; 其他各站呈减少趋势, 平均每 10 年减少 12.1~26.5 mm (除班戈外, $P < 0.05$), 仍以申扎减幅最大。在秋季, 蒸发量除改则无变化、狮泉河略有增加外, 其余 3 站呈减少趋势, 为 $-3.8\sim-10.2 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 减幅以安多最大、班戈最小。冬季蒸发量表现为减少趋势的有 2 个站(安多、申扎), 分别为 $-6.8 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $-17.7 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$), 狮泉河无变化; 改则和班戈趋于增加。

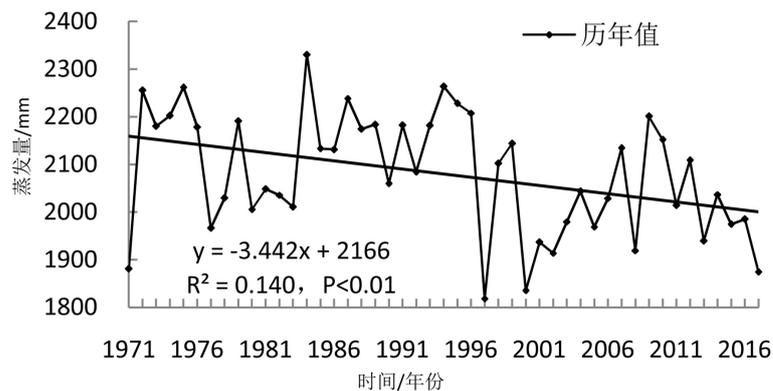


Figure 2. The variation of annual pan evaporation in CTNRT during 1971~2017
图 2. 1971~2017 年自然保护区年蒸发量的变化

Table 1. Climate trend rate of annual and seasonal pan evaporation in CTNRT during 1971-2017 (Unit: $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$)
表 1. 1971~2017 年羌塘国家级自然保护区各站年、季蒸发量的变化趋势(单位: $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$)

站点	春季	夏季	秋季	冬季	年
安多	-26.1***	-17.8**	-10.2*	-6.8	-59.7****
班戈	-13.5	-12.1*	-3.8	3.5	-25.5
申扎	-41.6****	-26.5****	-9.8**	-17.7****	-93.4****
改则	-4.7	-21.3**	0.3	2.7	-22.2
狮泉河	7.1	6.6	2.2	0.0	16.8
保护区	-15.1**	-12.4*	-3.8	-4.3	-34.4***

注: *, **, ***, ****分别表示 $P < 0.10$, $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$, 下同。

4.1.2. 突变分析

通过对近 47a 自然保护区年和四季蒸发量进行 M-K 突变检验发现(图 3), 年蒸发量从 1999 年开始快速下降, 根据 UF 曲线和 UB 曲线在 2 条临界线 ± 1.96 之间的交点位置, 确定在 2011 年发生了突变, 突变前后蒸发量平均值分别为 2095.6 mm 和 1990.5 mm, 突变后较突变前偏少了 5%。同样, 春季蒸发量在 2011 年发生转折, 由偏多跃变偏少, 突变点前后蒸发量分别为 609.5 mm 和 551.4 mm, 后者较前期偏少

了 10%；而其他 3 个季节蒸发量的突变点不明显。

4.2. 影响蒸发量的气象因子的变化趋势

蒸发作为反映大气蒸发潜力的一个重要指标，影响的因素很多，气象因素主要分为三大类，即动力因子(风速)、热力因子(气温、日照、气温日较差等)、水汽因子(相对湿度、降水量等)。

利用公式(2)也计算了近 47a 自然保护区影响蒸发量的气象因子的变化趋势(表 2)，结果表明：1) 自然保护区年平均风速以 $-0.32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度显著减小($P < 0.001$)，四季平均风速均表现为显著的减少

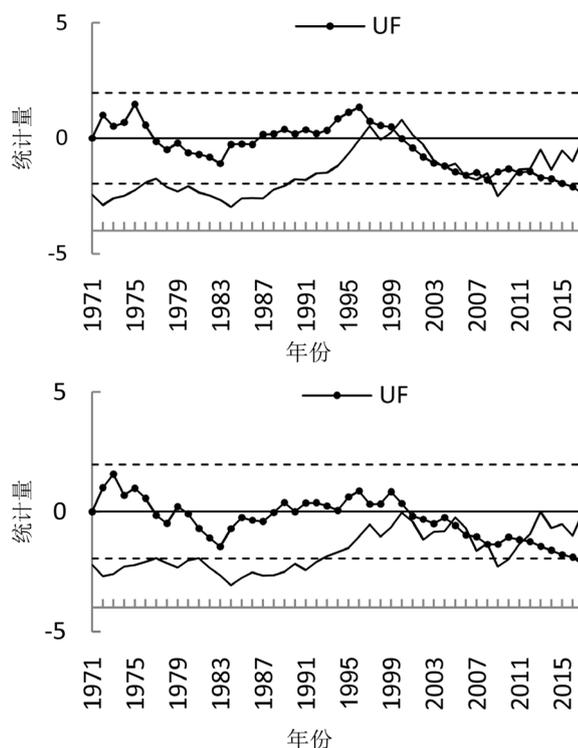


Figure 3. M-K verification of the annual (a) and spring (b) pan evaporation in CTNRT during 1971-2017

图 3. 1971~2017 年自然保护区年(a)和春季(b)蒸发量 M-K 检验

趋势，减幅为 $-0.24\sim-0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)，主要以春、冬两季减幅最为明显。2) 年平均气温表现为极显著的升高趋势，升幅为 $0.46\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)；四季平均气温以 $0.37\text{℃}\sim0.55\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度显著升高，冬季升温率最大。各季节平均最高气温和平均最低气温均呈现为显著的升高趋势，升温率分别为 $0.54\text{℃}\sim0.65\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)和 $0.21\text{℃}\sim0.49\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)，主要表现在冬季；年平均最高气温和平均最低气温也分别以 $0.37\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)和 $0.59\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$)的速度显著升高。年气温日较差以 $-0.22\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度明显减小($P < 0.001$)，季气温日较差亦呈减小趋势，为 $-0.16\text{℃}\sim-0.35\text{℃}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$)，以夏季减幅最大。3) 年日照时数呈减少趋势，平均每 10 年减少 14.3 h ($P < 0.10$)，主要表现在夏季，为 $-14.6 \text{ h}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$)。4) 年、季空气平均相对湿度波动大，线性变化趋势不明显，均在 $\pm 1.0\%\cdot(10\text{a})^{-1}$ 之内。5) 年降水量趋于增加趋势，为 $11.0 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (未通过显著性检验)；降水增多主要体现在春季和夏季，增幅分别为 $3.8 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$)和 $8.0 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.05$)；秋、冬两季降水量增减幅度不大。

综上所述, 影响因子的变化趋势表现为: 气温和降水是上升趋势, 气温日温差、日照时数、风速呈下降趋势, 相对湿度变化不大, 这些气候因素变化的综合影响最终造成了近 47a 自然保护区蒸发皿蒸发量的减少。

4.3. “蒸发悖论”现象分析

分析发现(表 1、表 2), 近 47a 保护区年平均气温显著升高, 平均每 10 年上升 0.46℃, 而与此相对应的则是年蒸发皿蒸发量出现下降, 平均每 10 年下降 34.4 mm。在年尺度上, 除西部的狮泉河无悖论现象外, 其余站点都存在“蒸发悖论”现象, 以申扎、安多最为明显。

Table 2. The linear trend of annual and seasonal impact factors on pan evaporation in CTNRT during 1971~2017

表 2. 近 47 a 自然保护区蒸发皿蒸发量影响因子的变化趋势

时间	平均气温/ [°C·(10a) ⁻¹]	平均最高气温/ [°C·(10a) ⁻¹]	平均最低气温/ [°C·(10a) ⁻¹]	气温日较差/ [°C·(10a) ⁻¹]	降水量/ [mm·(10a) ⁻¹]	日照时数/ [h·(10a) ⁻¹]	平均风速/ [m·s ⁻¹ ·(10a) ⁻¹]	相对湿度/ [%·(10a) ⁻¹]
年	0.46****	0.37****	0.59****	-0.22****	11.0	-14.3*	-0.32****	-0.24
冬季	0.55****	0.49****	0.65****	-0.16**	0.7	6.3**	-0.40****	0.22
春季	0.38****	0.31***	0.54****	-0.23****	3.8***	-3.6	-0.40****	0.50
夏季	0.37****	0.21***	0.57****	-0.35****	8.0**	-14.6***	-0.24****	-0.39
秋季	0.49****	0.41****	0.58****	-0.17*	-1.0	-3.0	-0.24****	-0.98

虽然在近 47a 整体上保护区蒸发皿蒸发量呈下降的变化趋势, 但不同季节中影响蒸发量变化的气象因子的分布和变化存在差异, 进而会导致不同季节中蒸发皿蒸发量的变化趋势存在差异。在保护区平均状态下, 四季都存在“蒸发悖论”现象, 其中春、夏两季最为显著。从数量上看, 春、夏两季存在“蒸发悖论”的站点数为 4 个, 要多于秋季的 3 个和冬季的 2 个, 无悖论的站点主要分布在西部, 而有悖论的站点又以申扎、安多最为明显, 一年四季都存在“蒸发悖论”现象。总体来看, 除西部的狮泉河站点外, 悖论影响的区域主要出现在保护区的中东部, 且以春、夏两季最为明显。

4.4. 影响蒸发量变化的成因分析

由于风速和日照均为影响蒸发的重要因子, 它们的明显减少在很大程度上从气候因子角度解释自然保护区蒸发量减少趋势的原因; 降水量呈增加趋势, 说明它对蒸发量减少也起了作用。一般来讲, 气温升高, 蒸发量增大, 显然气温变化不是蒸发量减少的主要因子, 然而气温日较差的显著减小与蒸发量减少有一定的关系。

Table 3. Complete correlation coefficients between annual, seasonal pan evaporation and climatic elements in CTNRT

表 3. 自然保护区蒸发皿蒸发量与各气候要素的完全相关系数

时间	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	气温日较差	降水量	日照时数	平均风速	相对湿度
年	0.023	0.046	0.196	0.336****	0.192	0.178	0.403****	0.039
冬季	0.333****	0.306****	0.293***	0.094**	0.059	0.061	0.438****	0.028
春季	0.239***	0.220***	0.011	0.305****	0.278***	0.116	0.441****	0.107
夏季	0.081	0.204***	0.292***	0.461****	0.210**	0.333***	0.316***	0.100
秋季	0.234**	0.294****	0.103	0.206	0.039	0.114	0.368****	0.188

为了进一步说明影响因子和蒸发量的关系, 本文通过完全相关系数法分析(表 3), 结果表明: 在年尺度上, 蒸发量与平均风速的完全相关系数最大, 其次是气温日较差, 这说明平均风速和气温日较差是影响自然保护区蒸发量的主要因素。从季节上来看, 冬季蒸发量与平均风速的完全相关系数最大, 与平均气温、最高气温和最低气温的完全相关系数紧随其后, 而实际上冬季蒸发量的减少主要与平均风速的显著变小有关。春季蒸发量与平均风速的完全相关系数最大, 气温日较差次之, 与降水量的相关系数也较大, 说明春季蒸发量的减少与平均风速、气温日较差的明显减少密切相关, 还与降水量的增加也有关系。夏季, 蒸发量与气温日较差的完全相关系数最大, 其次是与日照时数和平均风速的完全相关系数也比较大, 表明夏季蒸发量的显著减少主要是气温日较差、日照时数和平均风速的明显减小引起的。秋季, 蒸发量与平均风速的完全相关系数最大, 其次是平均最高气温, 与平均气温的完全相关系数也比较大, 但秋季蒸发量的减少主要还是因为平均风速显著减小造成的。以上分析表明, 蒸发量确实是各种气象要素综合作用的效应, 仅用单个环境因子难以解释蒸发量的变化。

5. 讨论与结论

对于蒸发量的观测, 我国常规观测中使用 E601B 和 E20 两种类型的蒸发皿, 分别在非冻结和冻结情况下使用[27]。由于 E20 测得的蒸发量比同期 E601B 测得的蒸发量明显偏大, 为了得到同一种蒸发皿测得的蒸发量, 国内学者多采用折算系数[18] [27] [28] [29]方法进行订正。由于自然保护区各站先后在 2002 年以后, 5~9 月使用了 E601B 型大型蒸发皿进行观测, 为了保证蒸发量资料的延续性和可比性, 笔者采用等比方法[23]对其进行了折算转化, 但蒸发量仍存在偏差, 对分析结果会产生一些影响, E20、E601B 型蒸发皿蒸发量合理的折算还需有待进一步探讨。鉴于此, 本文利用折算转化后的蒸发皿蒸发量, 分析了近 47a (1971~2017 年)其变化的时空分布特征, 并对造成其减少的气候因子进行了讨论, 得到如下主要结论:

1) 近 47a 自然保护区无论是年蒸发量还是季蒸发量均呈现不同程度的减少趋势, 其中年蒸发量每 10 年减少 34.4 mm, 四季蒸发量以 $-3.8\sim-15.1\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度趋于减少, 以春季减幅最大。除西部的狮泉河站外, 悖论影响的区域主要出现在保护区的中东部, 且以春、夏两季最为明显。从年代际变化来看, 保护区年蒸发量呈现出“增加-减少”的年代际变化特征, 20 世纪 70~90 年代为正距平, 21 世纪最初 10 年为负距平。

2) 影响蒸发量的气象因子变化趋势表现为: 平均气温、平均最高气温、平均最低气温和降水量都是上升趋势, 相对湿度变化不大, 而气温日温差、日照时数和平均风速均呈下降趋势, 这些气象因子变化的综合影响最终造成了近 47a 自然保护区蒸发量的减少。从完全相关系数法分析表明, 气温日较差和平均风速的减小与蒸发皿蒸发量的减少具有最显著的相关性, 是蒸发量减少的主要影响因子。此外, 夏季蒸发量的显著减少, 还与日照时数变小密切相关。

3) M-K 突变检验显示, 近 47a 自然保护区只有年和春季蒸发量发生了气候突变, 突变时间均出现在 2011 年, 蒸发量由偏多跃变为偏少。

基金项目

国家自然科学基金项目(41765011)。

参考文献

- [1] Peterson, T.C., Golubev, V.S. and Groisman, P.Y. (1995) Evaporation Losing Its Strength. *Nature*, **377**, 687-688. <https://doi.org/10.1038/377687b0>
- [2] Roderick, M.L. and Farquhar, G.D. (2004) Changes in Australian Pan Evaporation from 1970 to 2002. *International*

- Journal of Climatology*, **24**, 1077-1090. <https://doi.org/10.1002/joc.1061>
- [3] Roderick, M. and Farquhar, G.D. (2005) Changes in New Zealand Pan Evaporation since the 1970s. *International Journal of Climatology*, **25**, 2031-2039. <https://doi.org/10.1002/joc.1262>
- [4] Michael, L.R. and Graham, D.F. (2002) The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years. *Science*, **298**, 1410-1411.
- [5] 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵. 近 40a 中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J]. 科学通报, 2005, 50(11): 1125-1130.
- [6] 汪步惟, 张雪芹. 1971-2014 年青藏高原参考蒸散变化及其归因[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 269-279.
- [7] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 830-838.
- [8] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152.
- [9] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 259-269.
- [10] 宋萌勃, 陈吉琴, 张晓健, 等. 长江流域 1951-2000 年蒸发皿蒸发量变化趋势[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 24-33.
- [11] 宫恒瑞. 1981-2010 年乌昌地区 20 cm 蒸发皿蒸发量变化原因分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 815-821.
- [12] Yin, Y., Wu, S., Zhao, D., et al. (2013) Modeled Effects of Climate Change on Actual Evapotranspiration in Different Eco-Geographical Regions in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, **23**, 195-207. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1003-0>
- [13] 祁添垚, 张强, 王月, 等. 1960-2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1599-1606.
- [14] 马日新, 黄金廷, 田华, 等. 格尔木河流域近 60 a 降水、蒸发及温度变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1005-1012.
- [15] 陈伏龙, 冯平, 吴泽斌. 三工河流域平原区蒸发量变化特征及影响因素[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 45-53.
- [16] 岳元, 申双和, 金字, 等. “蒸发悖论”在吉林省的表现及成因分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1993-2002.
- [17] 曹静, 阿拉木萨. 科尔沁沙地西部蒸发皿蒸发量变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 418-424.
- [18] 杨司琪, 张强, 奚小霞, 等. 夏季风影响过渡区与非夏季风影响过渡区蒸发皿蒸发趋势的对比分析[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1017-1024.
- [19] 李林, 李红梅, 申红艳, 等. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1079-1089.
- [20] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979-2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [21] 姚永慧, 张百平. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义[J]. 地理研究, 2015, 34(11): 2084-2094.
- [22] 杜军, 胡军, 刘依兰, 等. 近 25 年雅鲁藏布江中游蒸发皿蒸发量及影响因素的变化[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 120-126.
- [23] 李景玉, 张志果, 徐宗学, 等. 影响西藏地区蒸发皿蒸发量的主要气象因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 20-29.
- [24] Liu, X., Zheng, H., Zhang, M., et al. (2011) Identification of Dominant Climate Factor for Pan Evaporation Trend in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, **21**, 594-608. <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0866-1>
- [25] 刘蓓. 青海不同地形下蒸发皿蒸发量变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 481-488.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [27] 陈伯龙, 左洪超, 高晓清. 20 cm 蒸发皿蒸发量的数学物理模型研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 422-430.
- [28] 朱华亮, 温华洋, 邱康俊. 基于两种方法的小型蒸发器与 E-601B 蒸发器蒸发量折算研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2018(1): 20-26.
- [29] 毛智军, 柳苗. 近 41 年浙江衢州地区蒸发量变化特征及影响因素分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 135-142.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ccrl@hanspub.org