

杨司琪, 张强, 奚小霞, 等. 2019. 中国夏季风影响过渡区与其他地区蒸发皿蒸发量趋势相反的原因 [J]. 大气科学, 43(6): 1441–1450. YANG Siqu, ZHANG Qiang, XI Xiaoxia, et al. 2019. The Reason of Trends in Pan Evaporation in the Summer Monsoon Transition Region Contrary to Those of Other Regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1441–1450. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18255

中国夏季风影响过渡区与其他地区蒸发皿蒸发量趋势相反的原因

杨司琪¹ 张强^{2,3} 奚小霞¹ 乔梁^{1,4}

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

3 甘肃省气象局, 兰州 730020

4 甘肃省气象信息与技术装备保障中心, 兰州 730020

摘 要 夏季风影响过渡区是天气和气候的敏感区, 随着全球和区域的变暖, 该区域特殊的气候环境响应引起人们重点关注。以南昌、定西、乌鲁木齐作为夏季风影响区、夏季风影响过渡区以及非夏季风影响区的代表站, 通过对比中国夏季风影响过渡区和其他地区 50 年来温度、日照时数、相对湿度、降水量、低云量、风速的变化趋势, 以及分析各气象因子单独变化对蒸发皿蒸发量的影响, 发现在夏季风影响过渡区各个气象因子的变化均使蒸发皿蒸发量增加, 而在其他地区, 只有温度变化会使蒸发皿蒸发量增加, 其他各因子的变化均会造成蒸发皿蒸发量的下降。贡献度更直观的反映各气象因子对不同地区蒸发皿蒸发的作用。结果表明温度变化对夏季风影响过渡区蒸发皿蒸发变率的贡献最大, 贡献度为 48.93%。风速变化对夏季风影响区蒸发皿蒸发变率的贡献最大, 贡献度为 51.54%。降水变化对非夏季风影响区蒸发皿蒸发变率的贡献最大, 贡献度为 58.57%。此外, 低云量的变化对夏季风影响过渡区、夏季风影响区和非夏季风影响区的贡献均达到 20% 以上。因此, 不同地区影响蒸发皿蒸发的最主要的因子是不同的, 但低云量对任何地区蒸发皿蒸发的影响都非常重要。

关键词 夏季风影响过渡区 蒸发皿蒸发 气象因子独立变化 贡献度

文章编号 1006-9895(2019)06-1441-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18255

The Reason of Trends in Pan Evaporation in the Summer Monsoon Transition Region Contrary to Those of Other Regions in China

YANG Siqu¹, ZHANG Qiang^{2,3}, XI Xiaoxia¹, and QIAO Liang^{1,4}

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

3 Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020

4 Gansu Provincial Meteorological Information and Technic Support and Equipment Center, Lanzhou 730020

收稿日期 2018-11-13; 网络预出版日期 2019-04-26

作者简介 杨司琪, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆一气相互作用等方面的研究。E-mail: yangsq1993@163.com

通讯作者 张强, E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41630426

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41630426)

Abstract The summer monsoon transition region is a sensitive region of weather and climate. With global warming, its special climatic environmental response has drawn more attention. Nanchang station, Dingxi station, and Ürümqi station are representative of the summer monsoon region, the summer monsoon transition region, and the non-monsoon region, respectively. Temperature, sunshine duration, relative humidity, precipitation, low cloud cover, and wind speed were compared between the summer monsoon transition region and other regions of China over the past 50 years. Trends in pan evaporation for each changing meteorological factor were analyzed. The authors found that, in the summer monsoon transition region, any single meteorological factor change would lead to increasing trends in pan evaporation. However, in the other regions, only air temperature change led to increasing pan evaporation; changes in other factors caused a decrease in pan evaporation. The contribution rate intuitively reflected the effect of each meteorological factor. Results showed that temperature had the greatest contribution to pan evaporation in the summer monsoon transition region with a contribution rate of 48.93%. Wind speed had the greatest contribution to pan evaporation in the summer monsoon region, with a contribution rate of 51.54%. Precipitation contributed the most to pan evaporation in the non-monsoon region, with a contribution rate of 58.57%. In addition, the contribution of low cloud cover reached more than 20% regardless of the region. Therefore, the main factors affecting pan evaporation were different for each different region, while the effect of low cloud cover was significant for all regions.

Keywords Summer monsoon transition region, Pan evaporation, Single meteorological factor changing, Contribution rate

1 引言

蒸发是地表水分平衡和能量平衡的重要组成部分,对气候变化的响应十分敏感(张强和王胜, 2007)。在全球增温的背景下,理论上蒸发可用的地表能量应该增加、水循环加速,从而进一步促进蒸发(Zhang et al., 2016)。然而研究发现全球许多地区的蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势(史军等, 2008; Padmakumari et al., 2013; Breña-Naranjo et al., 2017; Li et al., 2018),这种现象被称为“蒸发悖论”(Roderick and Farquhar, 2002)。为了解释这一现象,国内外许多专家学者进行了大量的研究,并提出了不同的观点。Peterson et al. (1995)根据蒸发皿蒸发量与云量的相关性将蒸发皿蒸发量下降归因于云量的增加。Roderick and Farquhar (2002)通过进一步研究认为蒸发皿蒸发量的下降主要是由太阳总辐射的下降引起的。左洪超等(2005)认为蒸发皿蒸发实际上表征了某地区的蒸发潜力,在中国,蒸发潜力与大气相对湿度的相关性最好。还有许多气象工作者在局部地区也注意到了蒸发皿蒸发量下降的现象,并针对局地地区分析了蒸发皿蒸发量下降的原因(谢平等, 2008; 王兆礼等, 2010; 鲍振鑫等, 2014),此外, Zhang et al. (2016)发现位于黄土高原的定西蒸发皿蒸发趋势与其他大部分地区不同,表现为“反蒸发悖论”现象。针对不同地区分析得到的结论并不相同,因此,需要分区

域讨论蒸发皿蒸发情况。

中国位于欧亚大陆东部,是一个受夏季风影响非常显著的区域。夏季风活动基本上决定了我国的气候分布格局(张强等, 2017)。根据夏季风的影响程度,中国气候可以分为夏季风影响区、夏季风影响过渡区和非夏季风影响区3个区域(Qian et al., 2009)。由于夏季风到达的最北位置每年都不同,夏季风影响过渡区有的年份受夏季风影响,有的年份则不受影响。夏季风的南北摆动直接控制着干变化(李栋梁等, 2013),导致该区域大气环流波动强烈、天气系统不稳定(曾剑等, 2016),使得该区域具有较为特殊的气候特点。而夏季风影响区和非夏季风影响区基本位于湿润区和干旱区,气候状态相对稳定(张强等, 2017)。黄土高原地区恰为夏季风影响过渡区内的典型地区,且该区域内很多站点蒸发皿蒸发趋势与定西站相同,一致表现为上升趋势。因此,有必要探究造成夏季风影响过渡区与其他地区蒸发皿蒸发趋势相反的原因。

影响蒸发皿蒸发的因素有很多,鲍振鑫等(2014)从影响蒸发皿蒸发量的热力条件、动力条件和水汽条件综合考虑,研究了平均温度、相对湿度、风速、日照时数对海河流域蒸发皿蒸发的影响。苏宏超等(2003)提出了降水量的增加,导致空气湿度增加,饱和水汽压差减小是造成新疆蒸发量下降的主要原因。Zhang et al. (2016)在研究影响定西蒸发皿蒸发量的条件时强调了低云量的作

用。因此，本文综合考虑了不同地区各气象因子对蒸发皿蒸发量的影响，利用 1961~2010 年南昌站、定西站、乌鲁木齐站的逐月平均气温、月降水量、月日照时数、月平均低云量、月平均相对湿度、月平均风速和月蒸发量资料，比较不同地区蒸发皿蒸发量以及各气象因子的变化趋势，分析各气象因子独立变化对蒸发皿蒸发量的影响，讨论不同地区各气象因子对蒸发皿蒸发量的贡献，进一步认识夏季风影响过渡区和其他地区蒸发皿蒸发量趋势相反的原因。

2 资料与方法

2.1 资料

南昌站、定西站、乌鲁木齐站分布在夏季风进退方向的直线上，且夏季风在我国的影响由东南向西北减弱，也就是说南昌、定西、乌鲁木齐正好处于夏季风影响的不同区间内（图 1），各站的气候类型具有一定的典型性（表 1）。有研究表明，南昌站蒸发皿蒸发量与夏季风影响区的郑州站、驻马店站、武汉站蒸发皿蒸发量的相关系数分别为 0.5439、0.5017、0.2934；定西站蒸发皿蒸发量与夏季风影响过渡区的榆中站、庆阳站、天水站蒸发皿蒸发量的相关系数分别为 0.7015、0.5462、0.7850；乌鲁木齐站蒸发皿蒸发量与非夏季风影响区的哈密站、喀什站、伊宁站蒸发皿蒸发量的相关系数分别为 0.7210、0.4459、0.3573（杨司琪等，2018）。因此，本文同样选择南昌站、定西站、乌鲁木齐站作为各区域的代表站。

研究所用资料为 1961~2010 年 3 个气象站的常规观测资料，包括逐月平均气温、月降水量、月日照时数、平均低云量、平均相对湿度、平均风速和月蒸发量，其中对于蒸发量的观测，中国常规观测中使用 E601B 蒸发皿（直径 62 cm）和 20 cm 蒸发皿（直径 20 cm，以下简称 E20）两种类型的蒸发皿，分别在非冻结和冻结情况下使用（陈伯龙等，

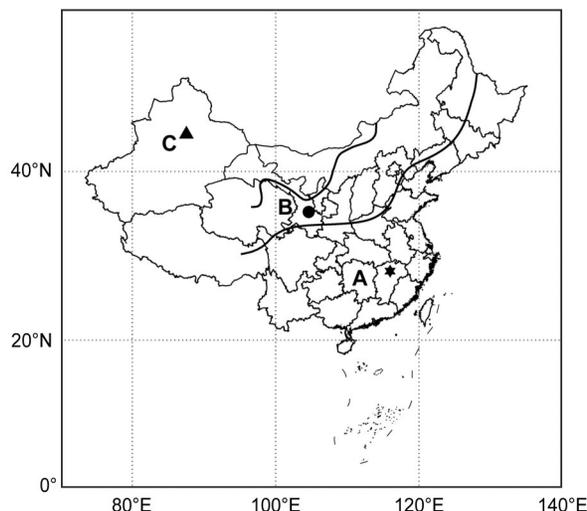


图 1 南昌站（六角形）、定西站（圆形）和乌鲁木齐站（三角形）的站点位置。A 区域：夏季风区；B 区域：夏季风影响过渡区；C 区域：非夏季风区

Fig. 1 Locations of Nanchang (hexagon), Dingxi (circle), and Ürümqi (triangle) stations. Region A: summer monsoon region; region B: summer monsoon transition region; region C: non-summer monsoon region

2013)。

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，需要对两种蒸发皿得到的蒸发量数据进行均一化，计算公式为

$$E_s = \frac{E_b}{K}, \quad (1)$$

其中， E_s 、 E_b 分别为 E20 型蒸发皿、E601B 型蒸发皿测得的蒸发量， K 为两类蒸发皿的均一化系数，不同站点的均一化系数不同，南昌站 K 为 0.6763，定西站 K 为 0.5513，乌鲁木齐站 K 为 0.6620（杨司琪等，2018）。

2.2 方法

2.2.1 气候趋势系数

本文借助气候趋势系数对气象要素的气候变化趋势进行判别。气候趋势系数可研究气象要素在气

表 1 南昌站、定西站、乌鲁木齐站的地理位置及气候条件

Table 1 Geographic locations and climatic conditions of Nanchang, Dingxi, and Ürümqi stations

站点名称	地理位置	气候条件
南昌站	赣江、抚河下游，鄱阳湖西南岸	亚热带季风气候
定西站	黄土高原西部边缘地带和西秦岭末端	中温带半干旱区
乌鲁木齐站	北天山北坡、准噶尔盆地南缘、亚欧大陆腹地	温带大陆性气候

候变化中升降的定量程度, 并通过统计检验来判定这种气候趋势是否有意义。气候趋势系数 (r_{xt}) 定义 (施能等, 1995) 为

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}, \quad (2)$$

其中, n 为年数, x_i 是第 i 年要素值, \bar{x}_i 为均值, $\bar{t} = (n + 1)/2$ 。 r_{xt} 为正 (负) 值时, 表示该要素在所计算的 n 年内有线性增加 (减少) 的趋势。 $r_{xt} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布, 从而检验这种气候趋势是否有意义。

2.2.2 气候倾向率

气候倾向率 ($10a_1$) 也可以反应某地区气象要素的趋势变化, 一般用线性方程表示:

$$\begin{cases} x_t = a_0 + a_1 t, t = 1, 2, \dots, n, \\ \frac{dx_t}{dt} = a_1, \end{cases} \quad (3)$$

其中, x_t 是第 t 年气象要素值, a_0 为常数项, a_1 为气象要素的变化率 (施能等, 1995)。

2.2.3 多因子拟合

参考 Zhang et al. (2016) 建立的蒸发皿蒸发拟合模型, 使用 1961~2010 年的资料, 利用最小二乘法得到拟合公式:

$$E = \bar{E} \left(a \frac{T}{\bar{T}} + b \frac{S_d}{\bar{S}_d} + c \frac{R_h}{\bar{R}_h} + d \frac{P}{\bar{P}} + e \frac{L_c}{\bar{L}_c} + f \frac{W_s}{\bar{W}_s} + g \right), \quad (4)$$

式中, E 、 \bar{E} 分别为年平均蒸发皿蒸发量、50 年平均的蒸发皿蒸发量, T 、 \bar{T} 分别为年平均温度、50 年平均温度, S_d 、 \bar{S}_d 分别为年日照时数、50 年平均日照时数, R_h 、 \bar{R}_h 分别为年平均相对湿度、50 年平均相对湿度, P 、 \bar{P} 分别为年降水量、50 年平均降水量, L_c 、 \bar{L}_c 分别为年平均低云量、50 年平均低云量, W_s 、 \bar{W}_s 分别为年平均风速、50 年平均风速, a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为拟合系数, g 为常数项。各地各项拟合系数及常数项如表 2。各地拟合方程均通

过了显著性水平 (α) 为 0.05 的 F 检验。

各站蒸发皿蒸发量的拟合值和观测值出入不大 (图 2)。定西站蒸发皿蒸发量的拟合值和观测值的相关系数达到 0.91, 标准误差和相对误差约为 13.74 和 3%; 南昌站蒸发皿蒸发量的拟合值和观测值的相关系数达到 0.92, 标准误差和相对误差约为 5.34 和 5%; 乌鲁木齐站蒸发皿蒸发量的拟合值和观测值的相关系数达到 0.89, 标准误差和相对误差约为 6.54 和 13.74 和 6%, 拟合效果均较好。

2.2.4 贡献度

贡献度是某一个构成要素的增量值与全部构成要素增量值的百分比, 它说明该构成要素的增量值在全部构成要素的增量值中所占的份额 (杨为众等, 2007)。贡献度 (c) 可以直观的反映不同影响因素对整体作用的程度, 其计算公式为

$$c = \frac{k_{e_x}}{k_e} \times 100\%, \quad (5)$$

其中, x 代表不同的气象因子, k_{e_x} 为不同气象因子单独变化时蒸发皿蒸发量趋势的斜率, k_e 为各个因子共同作用时蒸发皿蒸发的斜率。

3 结果分析

3.1 蒸发皿蒸发量及各气象因子的气候趋势

Zhang et al. (2016) 证实了“蒸发悖论”不是必然存在的。表 3 中定西站蒸发皿蒸发量的气候趋势系数为 0.5854, 而南昌站和乌鲁木齐站蒸发皿蒸发量的气候趋势系数为 -0.8508 和 -0.8039, 且均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 说明了在中国, 夏季风影响过渡区蒸发皿蒸发量具有显著上升趋势, 而夏季风影响区和非夏季风影响区蒸发皿蒸发量则为显著下降趋势。

蒸发皿蒸发受到多种气象因子共同作用 (Zhang et al., 2016)。表 3 可以看出, 50 年来, 在夏季风影响过渡区, 温度显著升高, 相对湿度、降水量、低云量显著下降, 日照时数和风速有上升趋势。

表 2 南昌站、定西站、乌鲁木齐站的拟合系数 (a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f) 及常数项 (g)

Table 2 Fitting coefficients (a , b , c , d , e , f) and constant term (g) at Nanchang, Dingxi, and Ürümqi stations

站点名称	a	b	c	d	e	f	g
南昌站	1.0453	0.3105	1.2730	-0.2035	-0.2716	0.2668	-1.4232
定西站	0.2855	0.0440	-0.2250	-0.1020	-0.1138	0.0316	1.0799
乌鲁木齐站	0.2269	0.5819	0.91999	-0.3609	-0.276	0.2583	-0.3474

表3 1961~2010年南昌站、定西站、乌鲁木齐站年蒸发皿蒸发量及各气象因子的气候趋势系数

Table 3 The climatic trend coefficients of annual pan evaporations and meteorological factors for Nanchang, Dingxi, and Ürümqi stations during 1961–2010

站点名称	年蒸发皿蒸发量	气候趋势系数					
		年平均温度	年日照时数	年平均相对湿度	年降水量	年平均低云量	年平均风速
定西站	0.585***	0.801***	0.013	-0.592***	-0.274*	-0.505***	0.186***
南昌站	-0.851***	0.606***	-0.066	-0.421***	0.168	0.833***	-0.898***
乌鲁木齐站	-0.804***	0.282**	-0.359**	-0.0153	0.583***	0.436***	-0.239*

注：***为通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验；**为通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验；*为通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。

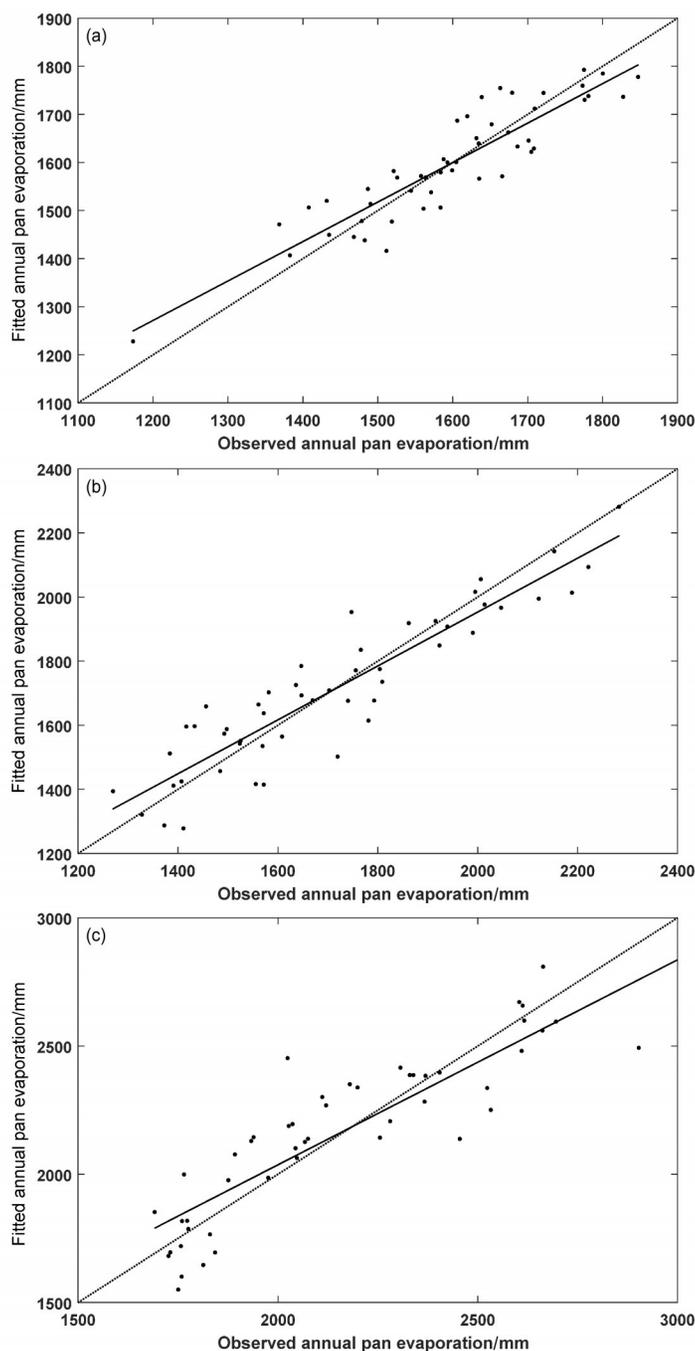


图2 1961~2010年 (a) 定西站、(b) 南昌站和 (c) 乌鲁木齐站蒸发皿年均蒸发量拟合值与观测值散点图

Fig. 2 Scatter diagrams of annual pan evaporations from fitting and observations at Nanchang, Dingxi, and Ürümqi stations during 1961–2010

势但并不显著。在夏季风影响区, 温度和低云量显著上升, 相对湿度和风速显著下降, 日照时数的下降趋势和降水量的上升趋势不显著。在非夏季风影响区, 温度、降水量、低云量为显著的上升趋势, 日照时数和风速为显著的下降趋势, 相对湿度有下降趋势但并不显著。通过对比不同地区各气象因子的气候趋势系数, 可以看出, 除温度和相对湿度, 定西站与南昌站和乌鲁木齐站的其他气象因子变化趋势相反。因此, 日照时数、降水量、低云量、风速的相反变化, 是造成蒸发皿蒸发量趋势相反的重要原因。夏季风影响过渡区独特的气候变化有利于蒸发皿蒸发。

3.2 气象因子对蒸发皿蒸发的影响

各气象因子在影响蒸发皿蒸发的同时也相互影响, 因此需要进一步讨论各因子单独变化时蒸发皿蒸发如何变化。由于各站蒸发皿蒸发量的拟合结果

都能较好地反应本站实际蒸发皿蒸发量, 因此利用公式 (5), 通过控制变量, 可以得到 50 年每个气象因子单独变化时蒸发皿蒸发量的变化情况。

图 3、5、7 为夏季风影响过渡区、夏季风影响区和非夏季风影响区各气象因子单独变化时蒸发皿蒸发量的变化趋势。可以看出, 夏季风影响区、夏季风影响过渡区和非夏季风影响区温度单独变化时, 蒸发皿蒸发量均呈现上升趋势 (图 3a、4a、5a), 各地区温度变化均会导致蒸发皿蒸发量增加。因此, 并不会出现所谓的“蒸发悖论”。

在夏季风影响过渡区各气象因子单独变化时 (图 3、图 4), 蒸发皿蒸发量均呈现为上升趋势。而在夏季风影响区 (图 5、图 6) 和非夏季风影响区 (图 7、图 8), 只有在温度单独变化的情况下, 蒸发皿蒸发量会呈现上升趋势, 在日照时数、相对湿度、降水量、低云量、风速单独变化时, 蒸发皿

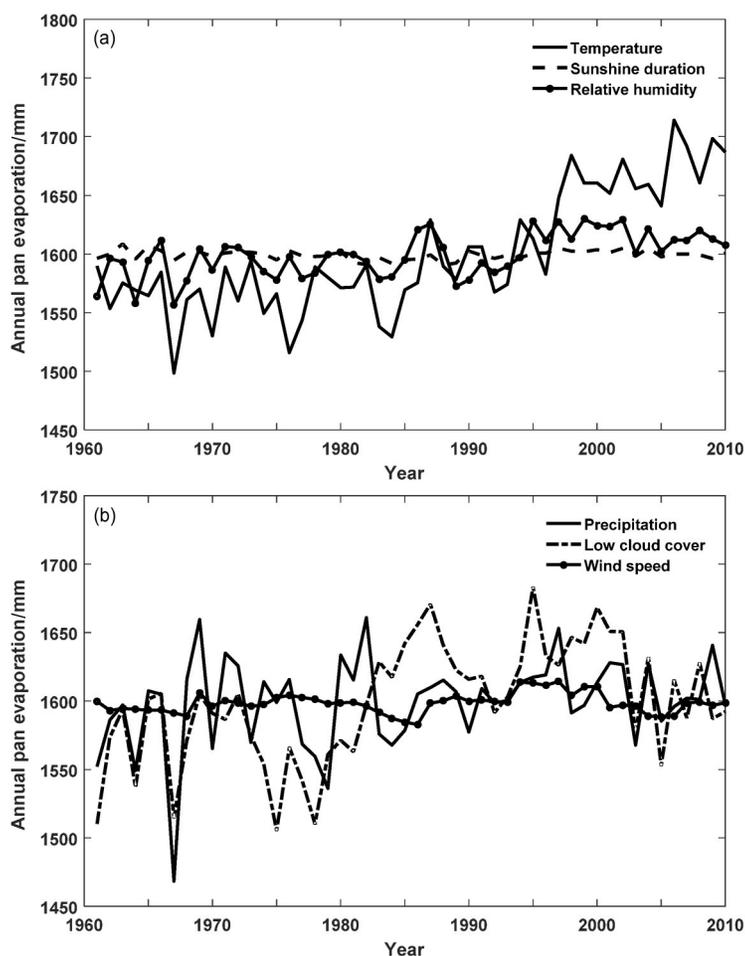


图3 1961~2010年定西站单一气象因子变化时蒸发皿年均蒸发量的变化: (a) 温度、日照时数、相对湿度; (b) 降水量、低云量、风速
Fig. 3 Annual pan evaporation changing with single meteorological factor changing at Dingxi station during 1961-2010: (a) Temperature, sunshine duration, relative humidity; (b) precipitation, low cloud cover, wind speed

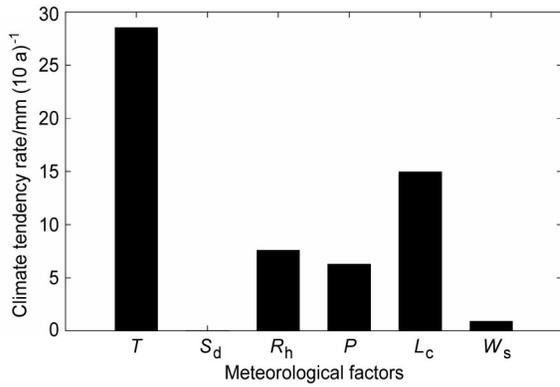


图4 1961~2010年定西站单一气象因子变化时蒸发皿年均蒸发量的气候倾向率(单位: mm(10a)⁻¹)。T、S_d、R_h、P、L_c、W_s分别表示温度、日照时数、相对湿度、降水量、低云量、风速

Fig. 4 Climate tendency rate of pan evaporation with single meteorological factor changing at Dingxi station during 1961-2010. T, S_d, R_h, P, L_c, W_s represent temperature, sunshine duration, relative humidity, precipitation, low cloud cover, wind speed, respectively

蒸发量表现为下降趋势。因此，造成夏季风影响过渡区蒸发皿蒸发量趋势与众不同的原因是所有气象因子单独变化均有利于蒸发皿蒸发。而造成夏季风影响区和非夏季风影响区蒸发皿蒸发量呈现下降趋势的原因是，日照时数、相对湿度、降水量、低云量、风速使蒸发皿蒸发减少的作用掩盖了温度使蒸发皿蒸发量增加的作用。

3.3 各气象因子的贡献度

由于各气象因子对蒸发皿蒸发的影响程度不同，它们单独变化时使蒸发皿蒸发量增加(减少)的程度与蒸发皿实际增加(减少)程度的百分比表示了各气象因子对蒸发皿蒸发量的贡献度。气象因子单独变化能够使蒸发皿蒸发量增加(减少)，且蒸发皿实际蒸发量增加(减少)，则该气象因子的趋势变化对蒸发皿蒸发变化贡献度为正，反之贡献度为负。表4为不同地区各气象因子的趋势变化对蒸发皿蒸发变率的贡献度，可以看出，夏季风影响

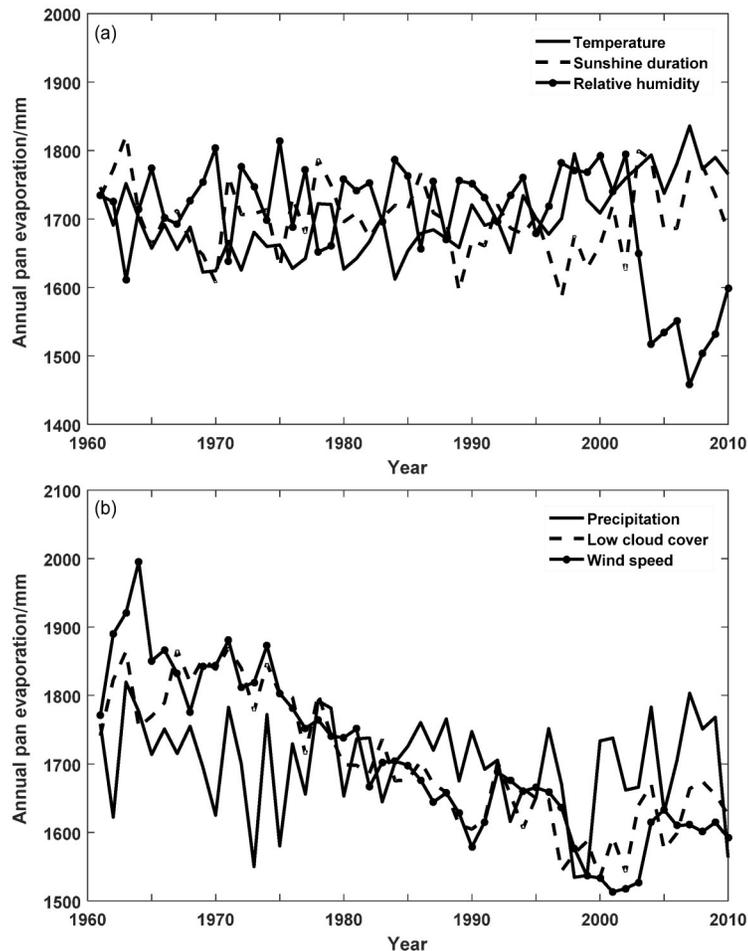


图5 同图3，但为南昌站蒸发皿年均蒸发量的变化

Fig. 5 As in Fig. 3, but for annual pan evaporation changing at Nanchang station

过渡区各气象因子均对蒸发皿蒸发量的增加有正贡献，其中，温度变化对其贡献度最大，为48.93%。夏季风影响区和非夏季风影响区温度变化对蒸发皿蒸发量的减小有负贡献，其他气象因子为正贡献。不同的是，夏季风影响区风速变化对蒸发皿蒸发量

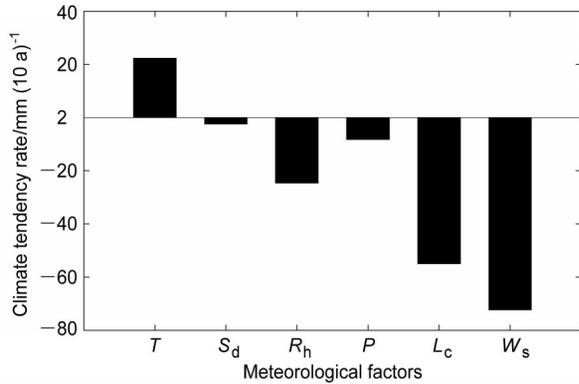


图6 同图4，但为南昌站蒸发皿年均蒸发量的倾向率
Fig. 6 As in Fig. 4, but for pan evaporation tendency rate at Nanchang station

的减少贡献度最大，达到51.54%，而非夏季风影响区降水变化对蒸发皿蒸发量的减少贡献度最大，达到58.57%。因此，不同地区影响蒸发皿蒸发量的主要因子是不同的。此外，无论是夏季风影响

表4 南昌站、定西站、乌鲁木齐站各气象因子（日平均温度、日照时数、相对湿度、降水量、低云量、风速）的趋势变化对蒸发皿蒸发变率的贡献度

Table 4 Contribution degrees of meteorological factors (daily average temperature, sunshine duration, relative humidity, precipitation, low cloud cover, and wind speed) trend changes to the pan evaporation change rate for Nanchang, Dingxi, and Ürümqi stations

	气象因子的趋势变化对蒸发皿蒸发变率的贡献度					
	温度	日照时数	相对湿度	降水量	低云量	风速
定西站	48.93%	0.06%	12.99%	10.77%	25.67%	1.58%
南昌站	-15.92%	1.69%	17.60%	5.87%	39.22%	51.54%
乌鲁木齐站	-7.08%	15.30%	0.64%	58.57%	23.92%	8.65%

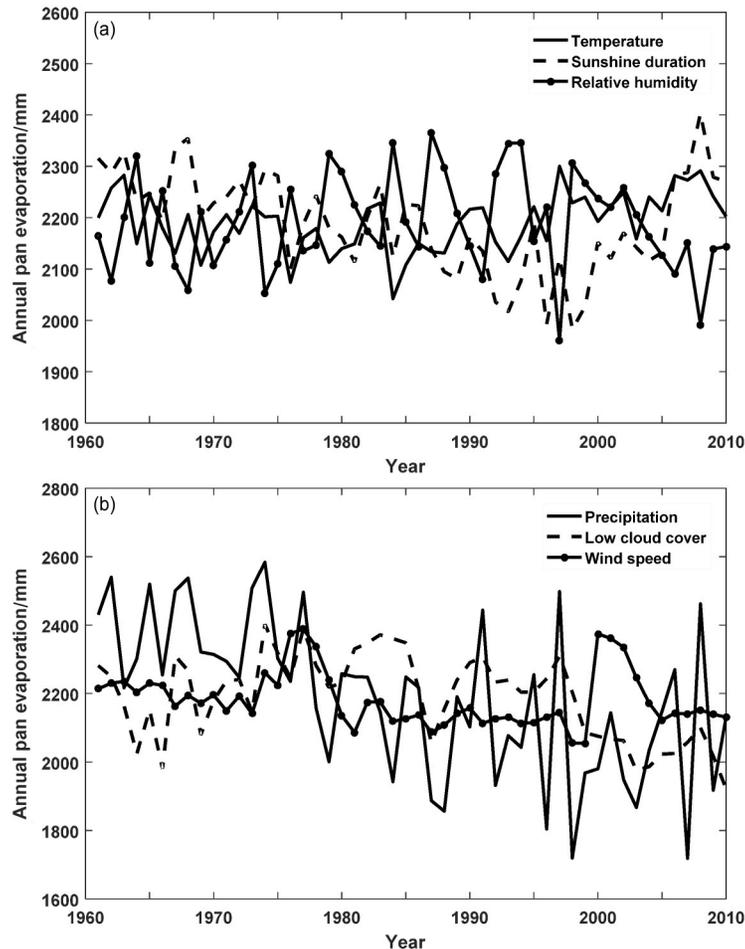


图7 同图3，但为乌鲁木齐站蒸发皿年均蒸发量的变化
Fig. 7 As in Fig. 3, but for annual pan evaporation changing at Ürümqi station

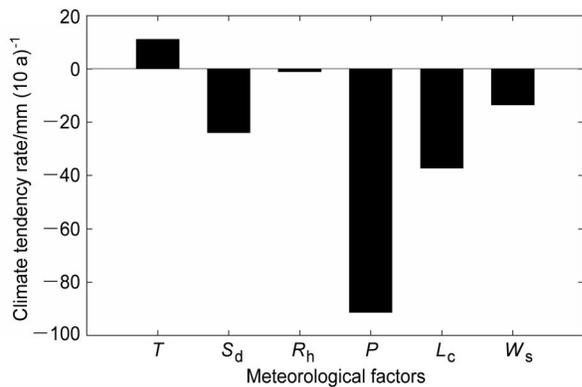


图8 同图4，但为乌鲁木齐站蒸发皿年均蒸发量的倾向率
Fig. 8 As in Fig. 4, but for annual pan evaporation tendency rate at Ürümqi station

区、非夏季风影响区还是夏季风影响过渡区，低云量变化的贡献度均为次大值，可见，低云量虽不是最主要的因子，但其对蒸发皿蒸发的影响是非常重要的。

4 结论与讨论

虽然增温是全球性的，但夏季风影响过渡区气候环境对增温响应比较特殊，对比不同地区各气象因子的气候趋势系数，发现夏季风影响过渡区与中国其他地区日照时数、降水量、低云量和风速相反的气候趋势变化是造成过渡区与非过渡区蒸发皿蒸发量的变化趋势不相同的重要原因。

通过分析50年各气象因子单独变化时蒸发皿蒸发量的变化，能够更准确的认识气象因子变化如何影响不同地区蒸发皿的蒸发。在夏季风影响过渡区，各因子单独变化均有利于蒸发皿的蒸发，使得夏季风影响过渡区蒸发皿蒸发量呈现出上升的趋势。而中国其他地区，也就是夏季风影响区和非夏季风影响区，只有温度单独变化有利于蒸发皿的蒸发，其他气象因子单独变化均会使蒸发皿蒸发量下降，因此在夏季风影响区和非夏季风影响区出现了蒸发皿蒸发量趋势下降的现象。

此外，各气象因子对不同地区蒸发皿蒸发量的影响程度并不相同。在夏季风影响过渡区，温度变化对蒸发皿蒸发变率的贡献最大；在夏季风区，风速变化对蒸发皿蒸发变率的贡献最大，在非季风区降水变化的贡献最大。无论是夏季风区、非夏季风区还是夏季风影响过渡区低云量的影响都十分重要。

参考文献 (References)

鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 2014. 气象因子在海河流域蒸发悖论中的作用机理 [J]. 水资源与水工程学报, 25(3): 1-7. Bao Z X, Yan X L, Wang G Q, et al. 2014. Mechanism of effect of meteorological factors in paradox theory of pan evaporation of Haihe River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering (in Chinese), 25(3): 1-7. doi:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.01

Breña-Naranjo J A, Laverde-Barajas M Á, Pedrozo-Acuña A. 2017. Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010 [J]. Int. J. Climatol., 37(1): 204-213. doi:10.1002/joc.4698

陈伯龙, 左洪超, 高晓清, 等. 2013. 20 cm 蒸发皿蒸发量的数学物理模型研究 [J]. 地球物理学报, 56(2): 422-430. Chen B L, Zuo H C, Gao X Q, et al. 2013. A mathematical and physical model study on the 20 cm pan evaporation [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(2): 422-430. doi:10.6038/cjg20130206

李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等. 2013. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展 [J]. 高原气象, 32(1): 305-314. Li D L, Shao P C, Wang H, et al. 2013. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(1): 305-314. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00030

Li M, Chu R H, Shen S H, et al. 2018. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River basin, a climate transition zone in eastern China [J]. Sci. Total Environ., 625: 496-509. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.317

Padmakumari B, Jaswal A K, Goswami B N. 2013. Decrease in evaporation over the Indian monsoon region: Implication on regional hydrological cycle [J]. Climatic Change, 121(4): 787-799. doi:10.1007/s10584-013-0957-3

Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 298(5597): 1410-1411. doi:10.1126/science.1075390-a

史军, 崔林丽, 周伟东. 2008. 1959年~2005年长江三角洲气候要素变化趋势分析 [J]. 资源科学, 30(12): 1803-1810. Shi J, Cui L L, Zhou W D. 2008. Change trend of climatic factors in the Yangtze River Delta from 1959 to 2005 [J]. Resources Science (in Chinese), 30(12): 1803-1810.

施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 53(4): 431-439. Shi N, Chen J Q, Tu Q P. 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53(4): 431-439. doi:10.11676/qxxb1995.049.

苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 2003. 新疆近50a来的气温和蒸发变化 [J]. 冰川冻土, 25(2): 174-178. Su H C, Wei W S, Han P. 2003. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25(2): 174-178. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.010

- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 337(6551): 678–688.
- Qian W H, Ding T, Hu H R, et al. 2009. An overview of dry-wet climate variability among monsoon-westerly regions and the monsoon northernmost marginal active zone in China [J]. *Advance in Atmospheric Science*, 26(4): 630–641. doi:10.1007/s00376-009-8213-5
- 王兆礼, 覃杰香, 陈晓宏. 2010. 珠江流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其原因分析 [J]. *农业工程学报*, 26(11): 73–77. Wang Z L, Qin J X, Chen X H. 2010. Variation characteristics and impact factors of pan evaporation in Pearl River basin, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese)*, 26(11): 73–77. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.013
- 谢平, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 2008. 东江流域蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征分析 [J]. *热带地理*, 28(4): 306–310. Xie P, Chen X H, Wang Z L, et al. 2008. The changes of the pan evaporation and their influencing climate factors over the Dongjiang basin [J]. *Tropical Geography (in Chinese)*, 28(4): 306–310. doi:10.3969/j.issn.1001-5221.2008.04.003
- 杨司琪, 张强, 奚小霞, 等. 2018. 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*, 37(4): 1017–1024. Yang S Q, Zhang Q, Xi X X, et al. 2018. Comparative analysis of pan evaporation trends between the summer monsoon transition region and other regions of China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(4): 1017–1024. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00006
- 杨为众. 2007. 明辨统计分析中的贡献、贡献度与贡献率概念 [J]. *内蒙古统计*, 37(1): 68–69. Yang W Z. 2007. Distinguished the concepts of contribution, contribution degree and contribution rate in statistical analysis [J]. *Statistics of Inner Mongolia*, 37(1): 68–69.
- 曾剑, 张强, 王春玲. 2016. 东亚夏季风边缘摆动区陆面能量时空分布规律及其与气候环境的关系 [J]. *气象学报*, 74(6): 876–888. Zeng J, Zhang Q, Wang C L. 2016. Spatial-temporal pattern of surface energy fluxes over the East Asian summer monsoon edge area in China and its relationship with climate [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 74(6): 876–888. doi:10.11676/qxxb2016.064
- 张强, 王胜. 2007. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究 [J]. *干旱气象*, 25(2): 1–4. Zhang Q, Wang S. 2007. Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 25(2): 1–4. doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2007.02.001
- Zhang Q, Wang W Y, Wang S, et al. 2016. Increasing trend of pan evaporation over the semiarid loess plateau under a warming climate [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 55(9): 2007–2020. doi:10.1175/JAMC-D-16-0041.1
- 张强, 张红丽, 张良, 等. 2017. 论我国夏季风影响过渡区及其陆—气相互作用问题 [J]. *地球科学进展*, 32(10): 1009–1019. Zhang Q, Zhang H L, Zhang L, et al. 2017. Study on summer monsoon transition zone and its land-air interaction [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 32(10): 1009–1019. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.10.1009
- 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 2005. 近 40 a 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*, 50(11): 1125–1130. Zuo H C, Li D L, Hu Y Q, et al. 2005. Characteristics of climatic trends and correlation between pan-evaporation and environmental factors in the last 40 years over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1235–1241. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2005.11.012