

刘典何文,刘金福,黄中艳.昆明太华山站空气湿度的气候变化及其对降水的影响[J].气象研究与应用,2020,41(2):25–30.

Liu Dianhewen, Liu Jinfu, Huang Zhongyan. Climate change of air humidity at Taihuashan Station in Kunming and its influence on precipitation[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(2): 25–30.

# 昆明太华山站空气湿度的气候变化及其对降水的影响

刘典何文<sup>1</sup>, 刘金福<sup>2</sup>, 黄中艳<sup>3\*</sup>

(1. 云南大学资环学院, 昆明 650504; 2. 昆明市气象局, 昆明 650501; 3. 云南省气象学会, 昆明 650034)

**摘要:** 基于太华山站气候资料, 使用线性相关、回归和功率谱等方法, 分析 1954–2015 年各季节和年空气湿度的变化特点及其对降水的影响。结果表明, (1) 62a 来该站各季节和年平均绝对湿度呈线性增大趋势, 但无周期性变化; 平均相对湿度无显著线性变化, 但雨季、干季期有约 5a 的周期变化。(2) 干季降水偏多年同期相对湿度和绝对湿度都较大, 雨季降水量则只与平均相对湿度呈正相关。(3) 气候变暖会显著增大雨季、冬季和年平均绝对湿度, 但不显著影响雨季、干季和年降水量的变化趋势。

**关键词:** 绝对湿度; 相对湿度; 气候变化; 功率谱

**中图分类号:** P467

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.2.05

**OSID:**



## 引言

自 20 世纪中叶以来全球气候变暖进一步加剧, 成为影响人类社会可持续发展的重大问题<sup>[1]</sup>。因此气候冷暖、干湿旱涝气候变化成为科学研究的焦点<sup>[2–9]</sup>。空气湿度是表示大气中水汽量多少的物理量指标, 常用相对湿度和绝对湿度来表示空气湿度的大小和变化。目前对空气湿度的相关研究可分为两类, 一类是关于空气湿度变化的规律及其与降水、气温等气象要素的关系, 如许学莲等<sup>[10]</sup>分析了柴达木盆地相对湿度变化特征, 韩会庆等<sup>[11]</sup>分析了贵州省绝对湿度的时空分布变化特点; 另一类是研究空气湿度对农作物生产、疾病传播的影响等, 如安静杰等<sup>[12]</sup>分析了相对湿度等气象因素对棉花伏蚜种群消长的影响, Thai 等<sup>[13]</sup>分析认为热带地区较高的绝对湿度与流感增加存在正相关性。但是, 空气湿度的变化对气候变暖是如何响应的? 气候变暖背景下空气湿度变化影响降水的方式发生了怎样的改变? 目前尚不明确。并且, 相关研究很少涉及云南, 更鲜有涉及滇中地区。

昆明太华山是滇池西岸边山脉的主要山峰, 太华山气象站位于昆明市主城区西南方约 6km 的太华山顶 (24°57'N, 102°37'E), 海拔 2358.3m, 是滇中地区海拔最高的站点; 它是云南气象观测历史最长、探测环境保护最好、观测记录“三性”优良、一直正常业务运行的国家基准气候站, 70a 来从未迁站且很少受到城市化发展影响的站点, 是分析研究滇中区域气候变化的最重要代表站<sup>[14]</sup>。本文拟使用长序列样本资料, 分析该站绝对湿度、相对湿度变化及其与气温、降水量的关系, 从而为研判气候变暖对滇中地区空气湿度及其对降水的影响提供科学依据。

## 1 资料和方法

选用太华山站 1954–2015 年的月、季和年平均水汽压、平均相对湿度资料, 以及对应时段的降水量和平均气温资料, 利用线性倾向率和多项式拟合、相关分析、线性回归和功率谱分析方法进行研究。考虑到滇中地区属于典型的季风气候, 干湿季节分明, 雨季 (5–10 月) 降水量占年降水量约 85%, 干季 (11 月至次年 4 月) 降水量仅占约 15%, 且两季节大气环

收稿日期: 2020–03–05

基金项目: 国家自然科学基金 (41665004)

作者简介: 刘典何文 (1999–), 女, 云南大学资环学院大气科学专业学生。E-mail: 1520229312@qq.com

通讯作者: 黄中艳 (1964–), 男, 正研高工, 主要从事农业气象与气候应用分析。E-mail: qxhzy@sina.com

流系统截然不同<sup>[3]</sup>,不仅分析春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-2月)和年度湿度变化及其与气温、降水量关系,而且还重点分析雨季、干季情况。

其中,根据水汽状态方程<sup>[11]</sup>,将水汽压转换为绝对湿度,转换公式为:

$$a = A \frac{e}{T} \quad (1)$$

式中  $a$  为绝对湿度 (湿空气块的水汽密度,单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $e$  为水汽压 (单位:  $\text{mmHg}$ );  $A$  为常数,取 217;  $T$  为热力学开氏温度 (单位:  $\text{K}$ ), 水的冰点摄氏温度计为  $0^\circ\text{C}$  时, 开氏温度计为  $273.15\text{K}$ 。

功率谱分析是用三角函数拟合空气湿度的时间序列, 将序列分解为多个频率为基本频率整数倍的谐振动之和, 以确定空气湿度时间序列是否有周期性变化及其主要周期<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 空气湿度历年变化特点

#### 2.1.1 年和各季节空气湿度的趋势变化

如图 1a 所示, 62a 来太华山站年平均绝对湿度总体呈上升趋势, 线性倾向率为  $0.082\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 拟合度  $R^2=0.422$  (显著性水平  $P=0.01$ ); 其 6 阶次多项式拟合曲线方程  $R^2=0.714$  ( $P=0.001$ ), 较线性拟

合更准确。平均相对湿度表现出阶段性波动变化特点较鲜明; 6 次多项式曲线拟合  $R^2=0.171$  ( $P=0.01$ ); 但直线拟合显著性水平仅为  $P=0.1$ 。

平均绝对湿度雨季、干季值历年变化趋势与年值变化相似。线性倾向率雨季  $0.085\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、干季  $0.079\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (都是  $P=0.001$ ); 6 次多项式曲线拟合效果好 (图 1b 和图 1c), 其雨季、干季拟合的  $R^2$  分别为 0.618、0.654 ( $P=0.0001$ , 0.001)。

平均相对湿度雨季、干季线性倾向率分别为  $0.12\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.28\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 但都未通过显著性检验; 使用 6 次多项式曲线拟合适宜, 其雨季、干季拟合的  $R^2$  为 0.237、0.092 ( $P$  为 0.001、0.10), 雨季平均相对湿度阶段性波动变化较干季鲜明 (图 1c)。

春、夏、秋、冬季平均绝对湿度历年变化的线性倾向率分别为  $0.081\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.093\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.083\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.07\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (显著性  $P=0.01$ ); 平均相对湿度的直线拟合结果中, 春季显著性  $P=0.1$ , 而夏、秋、冬季的直线拟合均未通过显著性检验。四季平均绝对湿度 6 次多项式拟合,  $R^2$  分别为 0.275、0.407、0.199、0.358 (显著性  $P$  分别为 0.001、0.001、0.01、0.001)。四季平均相对湿度的 6 次多项式拟合结果: 春季  $R^2=0.160$ 、 $P=0.001$ , 夏季  $R^2=0.231$ 、 $P=0.001$ , 秋季  $R^2=0.167$ 、 $P=0.01$ , 冬季  $R^2=0.097$ 、 $P=0.1$ 。

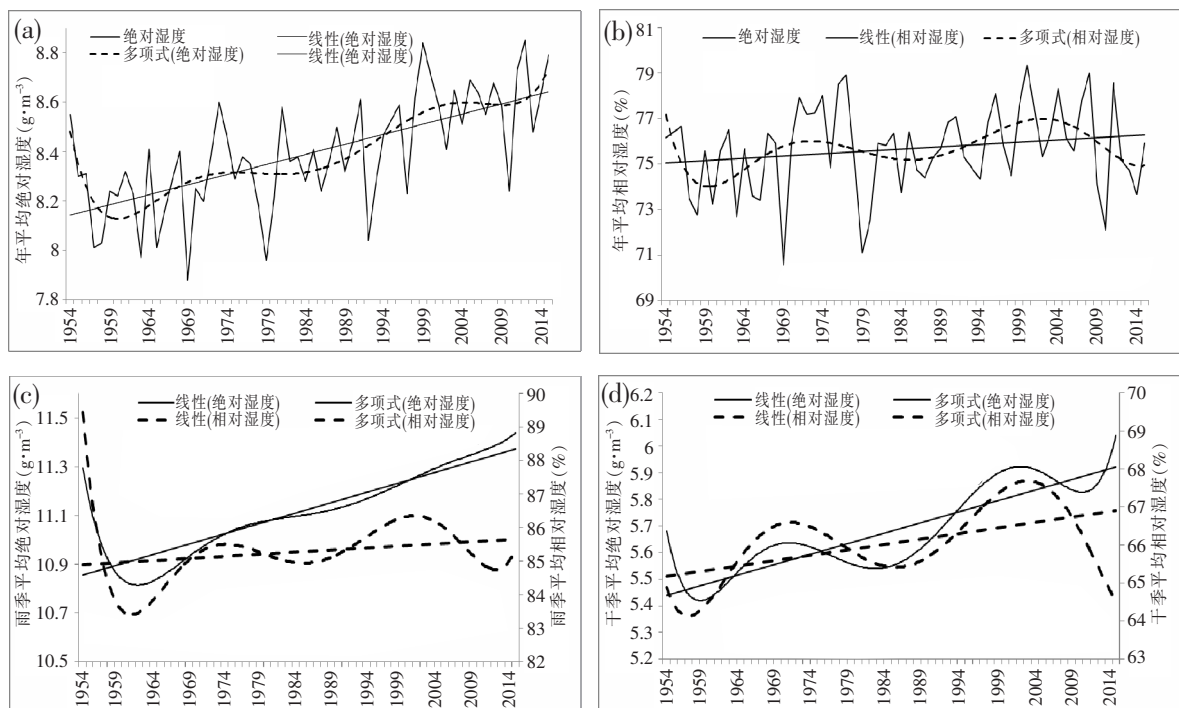


图 1 太华山站年(a)、雨季(c)、干季(d)平均绝对湿度和相对湿度的历年变化及拟合

### 2.1.2 空气湿度历年变化的功率谱分析

图 2 是太华山站年、干季、雨季两湿度指标的功率谱分析结果。平均绝对湿度的周期性变化不显著, 62a 的长周期变化未通过显著性检验(年、干季和雨

季都是  $P=0.1$ )。平均相对湿度干季、雨季都有约 5a 的周期变化, 雨季  $P=0.10$ , 干季显著性较高 ( $P=0.05$ ), 但年平均相对湿度周期性变化不显著。

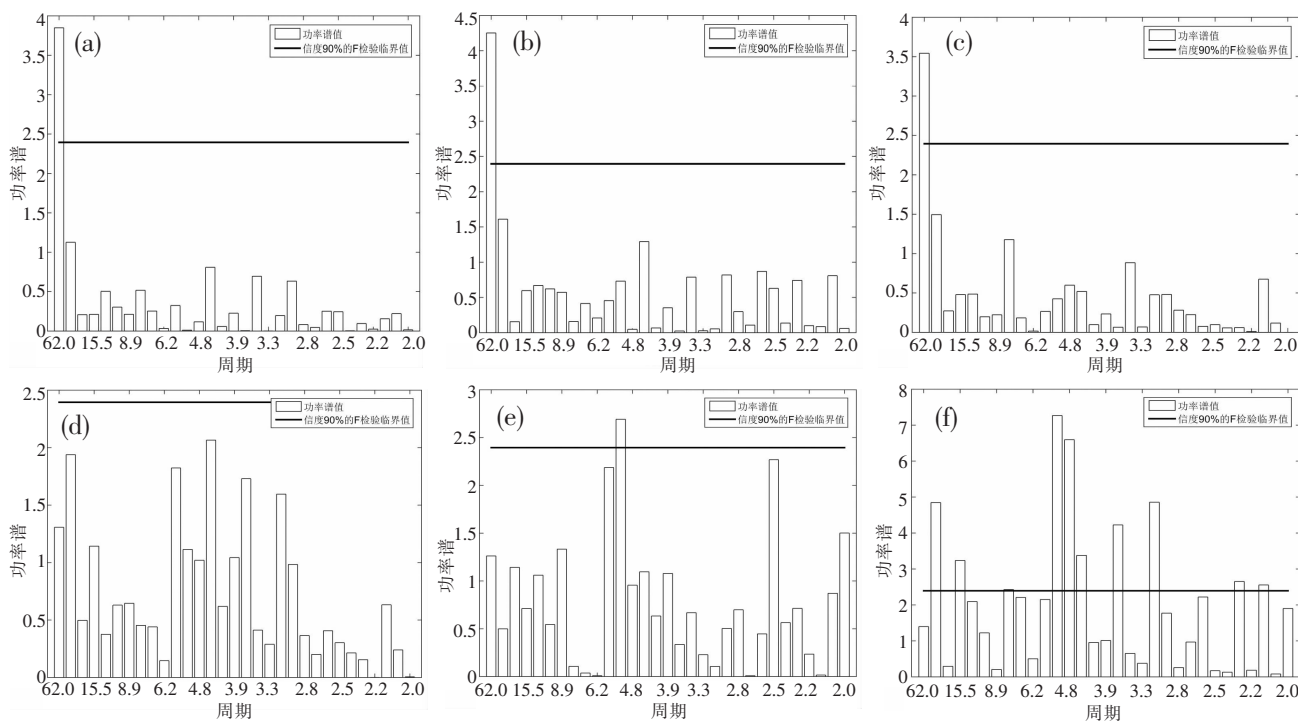


图 2 太华山站平均绝对湿度(a:年;b:雨季;c:干季)、相对湿度(d:年;e:雨季;f:干季)变化的功率谱分析(粗水平线表示显著性水平  $P=0.1$  的功率谱临界值)

### 2.2 空气湿度的线性变化趋势及其与气候变暖的相关性

图 3 是太华山站雨、干季和年平均气温、绝对湿度的 62a 变化和线性拟合。可见, 年平均气温线性倾向率为  $0.136^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$  ( $P=0.001$ ); 雨季、干季平均气温线性倾向率分别为  $0.122^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.149^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (都是  $P=0.001$ ), 都表现出显著的气候变暖。根据表 1, 年平均气温与平均相对湿度呈显著负相关, 相关系数  $r=-0.416$  ( $P=0.01$ ), 且季节平均相对湿度也随气候变暖而减小 ( $P=0.05$  或  $0.01$ ), 其中冬季、干季

表现最明显; 年平均气温与平均绝对湿度呈正相关,  $r=0.466$  ( $P=0.01$ ), 雨季、夏季也均呈显著正相关 ( $P=0.01$ ), 但干季相关不显著, 说明雨季、夏季和年度平均绝对湿度随气候变暖呈显著增大的变化趋势。

鉴于干季气候变暖程度比雨季大, 有必要分析干季空气湿度变化与气温的关系。干季绝对湿度的线性倾向率为  $0.079\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10\text{a}^{-1}$  ( $R^2=0.327$ ), 可信度高 ( $P<0.001$ ), 与气候变暖变化趋势很一致(图 3c); 但干季相对湿度变化并不显著响应气候变暖, 这一现象很值得关注。

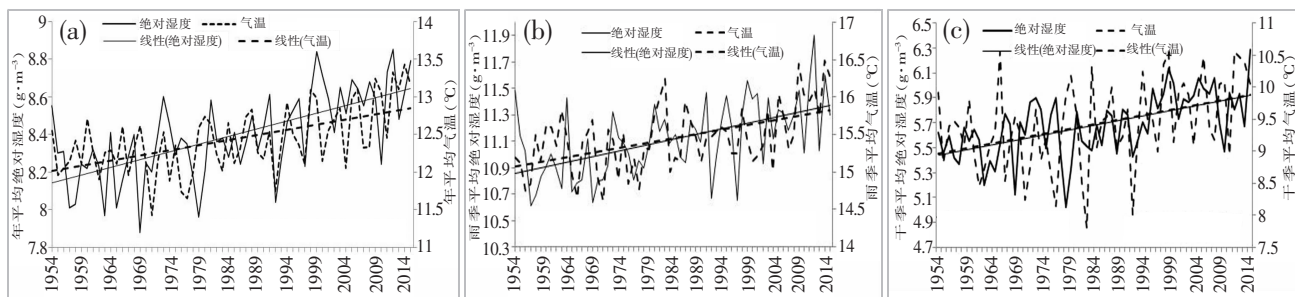


图 3 太华山站年(a)、雨季(b)和干季(c)平均绝对湿度与气温的历年变化和拟合

表 1 太华山站各季节和年平均气温与同期平均相对湿度、绝对湿度的相关系数

	年	雨季	干季	夏季	冬季
气温/相对湿度	-0.416 <sup>***</sup>	-0.424 <sup>***</sup>	-0.614 <sup>***</sup>	-0.487 <sup>***</sup>	-0.614 <sup>***</sup>
气温/绝对湿度	0.466 <sup>***</sup>	0.458 <sup>***</sup>	0.185	0.454 <sup>***</sup>	0.242 <sup>*</sup>

备注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示显著性水平 P 为 0.001、0.01、0.05。

2.3 空气湿度变化对降水量变化的指示性

2.3.1 相对湿度、绝对湿度与降水量的相关性

由表 2 可见,太华山站雨季、干季、夏季、冬季、年度降水量与平均相对湿度均呈正相关关系,其中前三者相关性显著(P=0.001 或 0.01)。平均绝对湿度与年度、雨季降水量呈负相关关系,其他三者呈正相关关系,且干季的相关性显著(P=0.01)。

表 2 太华山站各季节和年相对湿度、绝对湿度与降水量的相关系数

要素	年	雨季	干季	夏季	冬季
平均相对湿度	0.114	0.390 <sup>**</sup>	0.567 <sup>***</sup>	0.553 <sup>***</sup>	0.206
平均绝对湿度	-0.074	-0.075	0.351 <sup>**</sup>	0.074	0.068

备注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示显著性水平 P 为 0.001、0.01、0.05。

2.3.2 干季空气湿度与降水量的关系

只有干季的降水量与相对湿度、绝对湿度都呈显著正相关(表 2),同时干季绝对湿度历年线性变化显著地响应同期气候变暖(图 3c)。

(1)干季降水量的最优回归方程

将干季降水量 R 视为因变量,平均气温 T、绝对湿度 A 和相对湿度 RH 视为自变量;先对原始变量

作标准化处理后,作所有回归关系的分析,再根据 R<sup>2</sup> 值、F 值和标准回归系数的显著性水平三方面比较来筛选最优方程。结果得到干季降水量 R 的最优回归方程为:

$$ZR=-7.899e^{-5}-0.471ZT+0.439ZA \quad (2)$$

上式中,ZR、ZT、ZA 分别为干季降水量、平均气温、平均绝对湿度的标准变量,方程的 R<sup>2</sup>=0.337, F=15.003,F 检验和两回归系数检验都是 P=0.001。回归方程显示,绝对湿度、平均气温对于干季降水量的作用是相反的,且平均气温对于干季降水量的影响力略大于绝对湿度的影响。

(2)干季降水量最大、最小年空气湿度的差别

由表 3 可见,比较干季降水量最大 5a 与最小 5a 的平均状况,两者对应的平均绝对湿度之差值(0.29)与 62a 平均绝对湿度的标准差(0.2496)相当,而两者对应的平均相对湿度之差值(6.498)为 62a 平均相对湿度的标准差(3.1718)的两倍多。再考虑到两湿度指标与降水量的相关系数绝对值的差别(表 2),可知相对湿度比绝对湿度更能准确指示干季降水量的多少。但结合回归方程(2)的含义,干季降水易于在相对湿度和绝对湿度同时较大时产生。

表 3 太华山站干季降水量最大、最小 5a(平均)对应的空气湿度的平均值和标准差

	绝对湿度平均值( g · m <sup>-3</sup> )	绝对湿度标准差( g · m <sup>-3</sup> )	相对湿度平均值( % )	相对湿度标准差( % )
降水量最大 5a	5.68	1.11	68.596	1.99
降水量最小 5a	5.39	0.86	62.098	1.69
差值(最大-最小)	0.29		6.498	

备注:干季 62a 平均绝对湿度、平均相对湿度的标准差分别为 0.2496、3.1718。

3 湿度、气温和降水之间的关系分析

(1) 空气湿度与气温的相关分析结果具有科学性和客观性。表 1 中,相对于季,雨季绝对湿度与气温相关性最强,这与雨季地面较潮湿且气温较高,使得从地表蒸发到空气中的水分较多有关;干季云南

地区下垫面干燥,导致可蒸发到空气中的水分也少,故干季气温与绝对湿度相关不显著。与夏季相比,冬季气温较低且年际波动幅度较大,故冬季相对湿度对气温变化更敏感<sup>[3]</sup>,但冬季属干季,气温与绝对湿度相关性差。

(2) 两个湿度指标与降水量密切程度的比较。



2.3.2 节的分析表明,平均相对湿度比平均绝对湿度更能反映空气湿度与降水量的内在关系,这符合相对湿度大有利于空气上升时凝结致雨<sup>[15]</sup>的大气物理学理论。

(3)雨季空气湿度与降水的内在关系。雨季,云南地区降水量大小主要与大气环流输送来的水汽量多少、对流天气或冷暖空气在当地交汇的频次数有关<sup>[16-17]</sup>,期间西南季风都为云南地区输送大量水汽(雨季历年平均绝对湿度为  $11.11\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),造成空气中从下垫面蒸发上来的水汽量比重很小;同时雨季气温较高,只有当空气相对湿度较大时才容易因空气对流上升或与冷空气交汇而产生降水。这是雨季和夏季降水量与相对湿度呈高度正相关(见表 2)的根本原因。

(4)干季空气湿度对气候变暖的响应及与降水的关系。干季云南地区因受干暖气团控制<sup>[18]</sup>,大气环流输送到云南上空的水汽大大减少(干季历年平均绝对湿度仅为  $5.67\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),空气中来源于地表蒸发的水汽含量的比重加大,从而造成干季降水量与绝对湿度呈正相关(见表 2);但气温升高(气候变暖)同时会引发空气相对湿度下降<sup>[19]</sup>,从而不利于降水发生(表 1);只有当绝对湿度和相对湿度都较大时,干季降水发生的概率才会增大。

(5)气候变暖对降水的影响。图 1、图 2 显示气候变暖背景下雨季和年平均绝对湿度呈线性增大的同时,干季平均相对湿度都有显著周期性变化<sup>[14]</sup>。事实上 62a 来该站雨季和年降水量均呈显著线性减小变化趋势(都是  $P=0.05$ ),而不是随气候变暖降水增多(原因可能涉及大气环流和季风的气候变化问题),而干季降水量 62a 来无显著的线性趋势变化。因此,气候变暖虽然有增大雨季和冬季绝对湿度的重要作用(表 1),但并未显著增大平均相对湿度(图 1),故尚无充分证据表明气候变暖会显著影响雨季、干季和年降水量的线性趋势变化倾向。

## 4 结论

(1)1954—2015 年太华山站各季节和年平均绝对湿度线性增大趋势显著,其中年值的线性倾向率为  $0.082\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。平均相对湿度阶段性波动变化鲜明,其中雨季和干季平均相对湿度周期性变化(约 5a)显著。

(2)太华山站雨季、夏季平均气温升高可加大下垫面蒸发进而增大空气中的水汽含量,故雨季、夏季

和年平均绝对湿度易于随平均气温升高而增大;但干季、冬季期间因下垫面较为干燥,平均绝对湿度与平均气温无显著相关。平均相对湿度各季和年平均绝对湿度都与平均气温呈高度负相关。

(3)太华山站雨季降水量与平均相对湿度呈显著正相关;干季降水则同时受相对湿度和绝对湿度的影响,仅当两者都较大时才易于产生降水。雨季、干季降水与空气湿度内在关系的差别,来源于两季节大气环流带来的水汽量比重和下垫面干燥程度的显著差异。

(4)气温升高具有降低平均相对湿度、增大雨季期平均绝对湿度的功效,但不会显著影响雨季、干季和年降水量的线性趋势变化倾向。

## 参考文献:

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉. 气候变化国家评估报告 I: 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [3] 黄中艳. 云南干季月蒸发量与常规气象要素的关系[J]. 地理科学进展, 2010, 29(2): 138-144.
- [4] 潘娜, 肖国杰, 邬亮, 等. 丽江近 62a 气温变化特征分析[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(3): 74-78.
- [5] 高宪权, 莫丽霞. 气候变化背景下桂东地区旱涝变化特征分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(1): 18-23.
- [6] 欧春苗, 韦青萍, 黄肖寒, 都安县 1964—2014 年气候变化特征分析[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(S1): 22-23.
- [7] 孙瑞, 吴志祥, 陈帮乾, 等. 近 55 年海南岛气候要素时空分布与变化趋势[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(2): 1-7, 122.
- [8] 何洁琳, 陆甲, 李艳兰, 等. 百色气候变化特征及城市适应策略建议[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(1): 34-37.
- [9] 伍秀莲, 白先达. 气候变化对漓江生态环境的影响[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(1): 97-101.
- [10] 许学莲, 许圆圆, 曹雪枫, 等. 1961—2018 年柴达木盆地相对湿度变化特征分析 [J]. 青海环境, 2019, 29(4): 149-152.
- [11] 韩会庆, 蔡广鹏, 伍静, 等. 1960—2013 年贵州省绝对湿度时空变化特征[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(3): 348-353.
- [12] 安静杰, 孙小诺, 党志红, 等. 2018 年冀南棉区棉花伏蚜严重发生的气象因素分析[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(10): 36-39.
- [13] Thai P Q, Choisy M, Duong T N, et al. Seasonality of abso-

- lute humidity explains seasonality of influenza-like illness in Vietnam[J]. *Epidemics*, 2015(13):65–73.
- [14] 刘典何文. 1954–2015 年昆明太华山站气候干湿变化分析[J]. *气象研究与应用*, 2017, 38(1):68–73.
- [15] 孙激, 原韦华, 李建, 等. 我国东南沿海午后短时降水极端峰值强度与湿度和地表气温的关联[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(5):932–940.
- [16] 晏红明, 李清泉, 王东阡. 云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(1):12–22.
- [17] 陶云, 黄玮, 郑建萌, 等. 云南冬季降水的演变特征及成因分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(1):130–139.
- [18] 解明恩, 程建刚. 云南气象灾害特征及成因分析[J]. *地理科学*, 2004(6):721–726.
- [19] 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. *气象学报*, 2016, 74(3):352–366.

## Climate change of air humidity at Taihuashan Station in Kunming and its influence on precipitation

Liu Dianhewen<sup>1</sup>, Liu Jinfu<sup>2</sup>, Huang Zhongyan<sup>3</sup>

(1. School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650504;

2. Kunming Meteorological Bureau, Kunming 650501;

3. Yunnan Meteorological Society, Kunming 650034)

**Abstract:** Based on the climate data of Taihuashan station from 1954 to 2015, the change characteristics of air humidity in different seasons and years and influences on precipitation were analyzed by using the methods of linear correlation, regression and power spectrum. The results showed that (1) the average absolute humidity of the station in each season and year increased linearly in 62 years, but there was no periodic change. There was no significant linear change in the average relative humidity, but there was a periodic change of about 5 years in rainy season and dry season. (2) When both the relative humidity and the absolute humidity had a high value, the dry season would have more precipitation, while the precipitation in rainy season was only positively correlated with the average relative humidity. (3) Climate warming would significantly increase the average absolute humidity in rainy season, winter and year, but not significantly affect their change trend.

**Key words:** absolute humidity; relative humidity; climate change; power spectrum