

索南看卓, 任国玉, 贾文茜, 等. 2018. 武汉城市相对湿度气候学特征与长期变化趋势 [J]. 气候与环境研究, 23 (6): 715–724. Suonan Kanzhuo, Ren Guoyu, Jia Wenqian, et al. 2018. Climatological characteristics and long-term trend of relative humidity in Wuhan [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 715–724, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17122.

武汉城市相对湿度气候学特征与长期变化趋势

索南看卓¹ 任国玉^{1,2} 贾文茜¹ 孙秀宝³

¹ 中国地质大学(武汉)大气科学系, 武汉 430070

² 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

³ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘要 在对相对湿度(RH)序列进行均一性检验和订正的基础上,分析了武汉4个城市站RH的气候学特征和长期变化趋势。结果表明:(1)迁站对RH序列引起较大非均一性偏差,其中武汉站2010年迁站引起的偏差达到8%;(2)城区年平均RH较高,介于75%~85%,武汉站最高;(3)每年1~6月城区RH逐渐增加,6月达到峰值,之后缓慢减少,但季节内变化一般很小,月际间差异仅有0.1%~2.5%,存在夏季RH最高,春、秋次之,冬季最低的季节性特征;(4)武汉城市区域1961~2015年平均RH总体呈长期减少趋势,线性变化趋势-0.81%/10a,20世纪90年代之后下降趋势加剧;(5)近55年城区春、秋、冬3个季节平均RH均呈不同程度的下降,以春季最为明显,夏季存在较为显著的上升趋势,但1991年后及四季均呈现显著的下降趋势。

关键词 相对湿度 资料非均一性 武汉 城市化 气候特征 长期趋势

文章编号 1006-9585 (2018) 06-0715-10

中图分类号 P463.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17122

Climatological Characteristics and Long-Term Trend of Relative Humidity in Wuhan

SUONAN Kanzhuo¹, REN Guoyu^{1,2}, JIA Wenqian¹, and SUN Xiubao³

¹ Department of Atmospheric Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430070

² Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

³ College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the homogeneity test and correction of the relative humidity series, climatological characteristics and long-term trend of relative humidity in the urban area of Wuhan are analyzed. The results showed that: (1) The non-homogeneity deviation caused by relocated stations in the relative humidity series is prodigious, and the deviation caused by relocation of Wuhan station in 2010 is 8%. (2) Annual average relative humidity in the urban area of Wuhan remains high, and the values vary between 75%–85% with the highest value occurring at Wuhan station. (3) The relative humidity gradually increases from January to June, and then begins to decrease slowly after reaching its peak value in June. Monthly differences are pretty small with the values within 0.1%–2.5%. Seasonal characteristics of relative humidity in the urban area of Wuhan show that the RH is the highest in the summer and lowest in the winter during the whole year. (4) From 1961 to 2015, the average relative humidity in the urban area of Wuhan urban area exhibited a

收稿日期 2017-08-14; **网络预出版日期** 2017-11-16

作者简介 索南看卓, 女, 1993年出生, 硕士研究生, 主要从事城市气候研究。E-mail: 1138223859@qq.com

通讯作者 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575003

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575003)

long-term decreasing trend, and the linear trend was accelerated after the 1990s. (5) In the past 55 years, time series of average relative humidity in the spring, autumn, and winter all show declining trends in varied degrees, of which the trend in the spring is more obvious, and a significant rising trend is found in the summer. However, the annual and seasonal means are showing a significant downward trend after 1991.

Keywords Relative humidity, Data non-uniformity, Wuhan, Urbanization, Climate characteristics, Long-term trend

1 引言

气象学中通常用空气中的实际水汽压与饱和水汽压的百分比值来表征大气的相对湿度 (RH)。不同于其他大气水分参数, RH 除受到大气中实际水汽含量影响外, 还受到空气的水汽潜在容纳能力影响 (Peixoto and Oort, 1996; 盛裴轩等, 2003), 而后者主要取决于空气温度。RH 的高低对人体的健康和生活的舒适程度等均有较大影响, 并且是降水、气温预报以及紫外线和舒适度等专业预报的主要影响因子, 其大小是衡量一个地区干湿程度的标志之一 (刘明春等, 2012)。空气 RH 也是影响大气颗粒物浓度的主要气象因子, 从而间接影响到空气质量和大气能见度 (白永清等, 2016)。因此, RH 的研究对城市气候和应用气候研究, 以及对于水资源管理和空气污染预报预警都有重要的科学意义。

湖北省武汉市地处长江中游江汉平原, 境内横贯长江和汉江两条河流, 河网密布, 湖泊众多, 水域面积占全市土地总面积的 1/4, 是我国典型的亚热带内陆湿地型特大城市。城市内湿地有利于空气 RH 增加 (Saaroni and Ziv, 2003), 改变局地气候环境条件 (汪光焘等, 2005; 轩春怡等, 2010)。朱春阳 (2015) 在对武汉市三环内主城区 14 块湖泊湿地的温湿研究中发现, 城市 RH 与湿地面积大小和距离湿地远近呈显著正相关关系; 杨凯等 (2004) 研究上海市城区河流及水体周边小气候效应发现, 湖泊下风向的 RH 较上风向增幅达到 10%, 指出水体的面积和布局是影响小气候效应的重要因素; 轩春怡等 (2010) 研究发现, 城市水体在夏季具有降温、增湿、缓解城市热岛效应的功能, 并能使其周边地区的气温和地表温度降低。目前, 对武汉城区内相对湿度的气候特征, 关注极少。

此外, 有研究分析了半干燥区气象站的 RH 长期变化, 发现近 50 年年平均和四季平均 RH 在波动中下降 (靳英华等, 2009); Um et al. (2007) 发现, 作为韩国大城市代表观测点的首尔站, 其年平均 RH 自 1905 年以后呈明显下降趋势, 而选取的中等

规模城镇站和乡村站 RH 减少趋势低于首尔站; 城市的快速发展和城市化进程的加快也同样影响北京城市气候变化, 其中城区年平均 RH 总体呈明显下降趋势, 而郊区则略有上升 (郑思轶和刘树华, 2008; Liu et al., 2009), Yang et al. (2017) 也发现, 北京城区年平均相对湿度比郊区低得多, 呈现出明显的所谓“干岛效应”, 中心城区年平均 RH 可比郊区站低 7%~10%; 甘肃武威市年平均 RH 总体呈减少趋势, 并存在 6~8 a 的周期波动 (刘明春等, 2012)。

20 世纪 90 年代以来武汉经济发展加速, 城区面积迅速扩大, 不但占用了耕地, 而且大量围湖建房, 使市区湖泊面积急剧减少 (余程鹏, 2008)。快速城市发展及其相伴随的城区湖泊面积减小, 对于城区 RH 产生了什么影响, 目前还不清楚。但有研究表明, 城市化致使武汉城区气候发生了显著变化, 主要表现为年和四季城市热岛强度持续增强, 近地面气温显著上升 (陈正洪等, 2005a, 2007; 王苗等, 2015)。研究还显示, 武汉市最低气温表征的热岛强度和相对湿度呈正相关, 而最高气温和平均气温表征的热岛强度则与相对湿度呈现负相关 (王苗等, 2015), 说明武汉市相对湿度年际和长期变化表现出较为复杂的特征。武汉市作为我国典型的亚热带内陆湿地型特大城市, 研究其相对湿度序列变化趋势特征及其可能原因, 对于深入理解城市气候不同要素之间的相互作用机理, 进一步研究和评估城市气候变化对人体健康和生态系统的影响, 均具有重要意义。

本文对武汉城市气象站 RH 观测资料进行了均一化处理, 并利用均一化资料分析了 1961~2015 年期间年、季节 RH 的气候学特征和长期变化趋势, 结果有助于加深认识武汉城市 RH 的季节变化和长期变化规律。

2 资料与方法

2.1 资料与研究区域

研究区域为武汉城区, 经纬度范围为 (29°58'N~

31°22'N, 113°41'E~115°05'E)。1961~2015 年武汉地区逐月平均 RH 数据来自于国家气象信息中心。数据已进行了人工转自动观测的非均一性误差订正。蔡甸站的 1968 年 6、7、8 月缺测, 分别以 55 年月均值补偿。为使分析结果更加可靠, 选取了具有长序列观测资料, 并且能够代表武汉城市的 4 个气象站, 对各站点的 RH 序列重新进行非均一性检验和订正。

2.2 城市站确定

由于城市热岛效应(UHI)的影响, 城市和郊区的地表温度(LST)分布通常显示为围绕城市中心的封闭等温线。因此, 理论上讲可以根据具有适当间隔的等温线分布来确定 UHI 影响区域。Ren and Ren (2011) 利用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 资料在国家基本、基准站中选出不受 UHI 影响的 113 个乡村站。本文采用 Ren and Ren (2011) 的方法, 利用卫星遥感(RS)资料获取气象台站周围的地表亮度温度等值线, 确定城市气象站的相对位置。

利用 8 d 合成的 2016 年 7 月 28 日 MOD11A2 地表亮度温度/发射率产品, 其空间分辨率为 1 km, 以 0.5 °C 等温线间隔绘制武汉地区地表亮度温度等值线分布图(图 1)。LST 的等温线间隔应反映出受 UHI 影响的市中心到郊区的温度梯度, 而且受到诸如微观形态学等局部因素的影响较小。城市环境温度场中最外圈闭合等温线可用以代表受城市热岛影响区域的边界(Winkler et al., 1981; Ren and Ren., 2011)。本文确定该日最外圈闭合等值线为

34.85 °C, 将其作为武汉市城市地表热岛效应的界限。图 1 中, 在城市地表热岛中心存在很明显的低值区, 将温度高值区域分为两个部分, 结合谷歌地图(Google Earth)大比例尺地图可知, 长江干流和市区湖泊是影响武汉城市地表热岛空间分布的重要因素。

城市代表站的选取参照以下标准: (1) 研究期间迁站次数最多 3 次(包括 1961 年), 以便尽可能保证站史的简洁性(图 2)。(2) 与武汉站的海拔高度差小于 50 m, 避免由于高度差异带来的气温直减率影响; 距离少于 30 km, 保证与武汉站处于相同的大尺度环流和气候背景下。(3) 在迁站过程中站点位置至少有一次包含在最外层等温闭合线以内, 以保证受到城市化气候效应的影响。(4) 利用 Google Earth 或土地利用资料证实站点周围微环境, 排除周围水体等特殊环境的影响。其中, 武汉站新旧站址受到不同微气候环境的影响, 但均在上述温度闭合等值线之内, 是受到城市化影响明显的一个城市代表站。

据此选择 4 个武汉城市的代表站点, 即武汉站(站号 57494)、江夏站(站号 57493)、蔡甸站(站号 57489)和新洲站(站号 57492)。具体站点信息见表 1。

表 1 武汉城市站站点信息

Table 1 Information of urban stations in Wuhan

站点(站号)	站点位置		观测场海拔 高度/m	1960 年后	
	经度	纬度		迁站次数	迁站年月
武汉(57494)	114°03'E	30°36'N	23.6	2	1994 年 4 月 2010 年 1 月
江夏(57493)	114°20'E	30°20'N	73.5	1	2006 年 1 月
蔡甸(57489)	114°00'E	30°35'N	38.4	1	1965 年 4 月
新洲(57492)	114°50'E	30°50'N	40.7	3	1976 年 9 月 1995 年 1 月 2014 年 1 月

2.3 非均一性订正

气候资料序列中由于迁站、更换仪器等非自然原因造成的观测记录不连续点称之为非均一性。使用未订正的数据会模糊气候变化信号, 分析某地区实际发生的气候变化, 应该首先检验和订正其非均一性, 即均一化。

本文通过构建参考资料序列, 参考 Peterson-Easterling 方法(Peterson and Easterling, 1994), 订正所选站点相对湿度数据序列的非均一性。年均值序列较小受到季节变率的影响, 为最大程度上去除

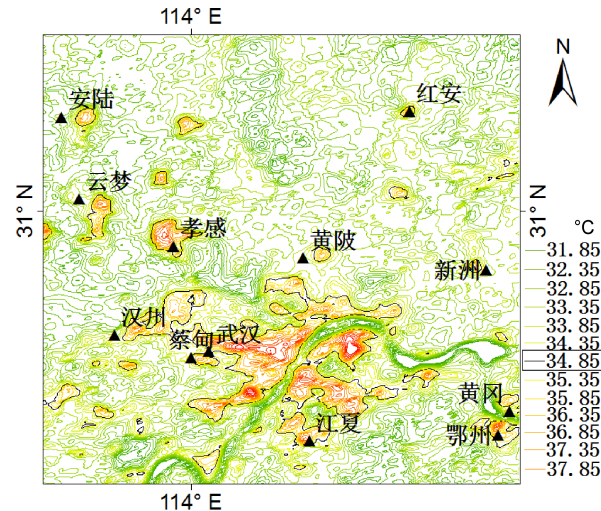


图 1 2016 年 7 月 28 日武汉地区地表亮度温度分布(单位: °C)
Fig.1 Land surface brightness temperature (°C) distribution in Wuhan area in 28 July 2016

序列中自回归过程的影响(曹丽娟和严中伟, 2011), 本文对武汉城市站 RH 年值序列进行非均一性检验和订正(Li et al., 2004; 周雅清和任国玉, 2005)。具体步骤和方法如下:

建立参考序列: 为了提高对台站相对湿度序列不连续点检测的能力, 构建步长为 1 的逐年差值序列, 这样可以剔除序列趋势和周期影响, 使其比待检原始序列变率减小。因此建立 12 个单站的年均 RH 序列之后, 计算其逐年差值时间序列 D :

$$D_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i, \quad (1)$$

其中, φ 表示 RH, i 为年份序号。

计算武汉地区待检城市站与候选参考站逐年差值序列之间的相关系数, 选取相关系数最大的 5 个站作为参考站。然后利用各自相关系数的平方作为权重计算出参考时间序列:

$$D_{\text{new}} = \sum_{j=1}^5 r_j^2 D_j, \quad (2)$$

其中, r_j^2 为第 j 个站与待检站之间的相关系数, j 为站号标记, 使用逐年差值时间序列的加权方法得到的参考序列, 其标准偏差接近待检站的标准偏差。最后, 反算得到相对湿度参考序列。

待检序列断点确定: 结合滑动 t 检验法和 M-K 检验法, 对待检序列和参考序列的差值序列确定最终的不连续点, 并通过台站迁站历史资料确定其合理性。如果突变点附近年份存在台站迁移, 认为该突变点是属于人为影响, 进行下一步的订正; 否则保留原始记录。1961 年后武汉各城市站的迁站次数, 时间与位置见图 2。

城市站数据订正: 计算待检站序列与参考序列差值序列断点前后各五年的平均值的差值, 并将其作为订正值。订正顺序是从后向前进行的, 最近断点之后序列保持不变。最后得到 4 个武汉城市站的均一化 RH 序列。表 2 是对各站相对湿度序列的订正次数, 对应的迁站时间和订正值。

2.4 统计方法

本文使用 4 个城市站的逐月 RH 数据, 统计 1961~2015 年武汉城市区域平均逐月和四季平均相对湿度, 在此基础上分析多年平均气候学特征。以 3、4、5 月的均值代表春季, 6、7、8 月的均值代表夏季, 9、10、11 月的均值代表秋季, 12、1、2 月的均值代表冬季。计算订正后各个站和 4 站平均的逐年逐月、季节平均 RH 距平及距平百分率。以 1981~2010 年(30 年)作为参考期计

算距平值和距平百分率。线性趋势通过最小二乘法获得, 用 t 检验方法确认线性趋势的显著性水平。

表 2 各站检测出的人为不连续点及其对应的迁站时间、订正次数和订正值

Table 2 Detected man-made discontinuities in the RH series for each station, and corresponding relocation time and numbers of revision and revised values

站点	t 检验断点年份	M-K 检验断点年份	对应迁站时间	订正次数	订正值
武汉	无	2013 年*、1969 年	2010 年 1 月	1	8.60%
江夏	1965 年、1975 年、2007 年*	1983 年	2006 年 1 月	1	-1.13%
蔡甸	无	1993 年	无	0	无
新洲	1965 年、1975 年*、2010 年	1985 年	1976 年 9 月	1	-5.34%

* 表示合理断点年份。

3 结果与分析

3.1 相对湿度的气候学特征

近 55 年武汉市 RH 的逐月多年平均(图 3)显示, 武汉市各月平均 RH 均大于 75%。RH 在 1~6 月逐渐增加, 并且在 6 月达到峰值, 可达 80%以上, 随后缓慢减小, 于 12 月下降至全年最低值。各月间的差异并不明显, 仅在 0.1%~2.5%, 这与武汉市雨季的进退有着密切的联系。各月 RH 的分布带有季节性特征, 即春秋低于夏季, 但高于冬季。

55 年武汉年均 RH 为 84.73%, 新洲为 75.98%, 江夏为 76.19%, 蔡甸为 78.01%, 武汉站年平均 RH 值明显高于其余 3 个城市站。图 4 给出了 1961~2015 年不同时间段 4 个武汉城市站各季节 RH 的多年平均值。1961~2015 年内(图 4c)总体上呈现出夏季 RH 最高, 春、秋次之, 冬季最低的季节性特征, 与逐月多年平均 RH 分布相似(图 3)。此外, 武汉站各个季节的 RH 也明显高于其余 3 个站, 以 1961~1989 年期间最为明显, 而近 35 年的武汉站与 3 个站的差异变小。对于各站各季节之间 RH 的差异, 理论上可以用理想气体状态方程 $PV=nRT$ 解释。以夏季为例, 在气体分子数 n 、理想气体常数 R 和气体体积 V 不变的条件下, 夏季温度 T 高, 饱和水汽压 P 随温度的升高而增大, 由于夏季降水量充沛, 水分蒸发强, 水汽容易达到饱和, 导致实际水汽压的增大, 进而使得夏季的 RH 值偏高。

1961~2015 年不同时间段的 RH 平均值显示

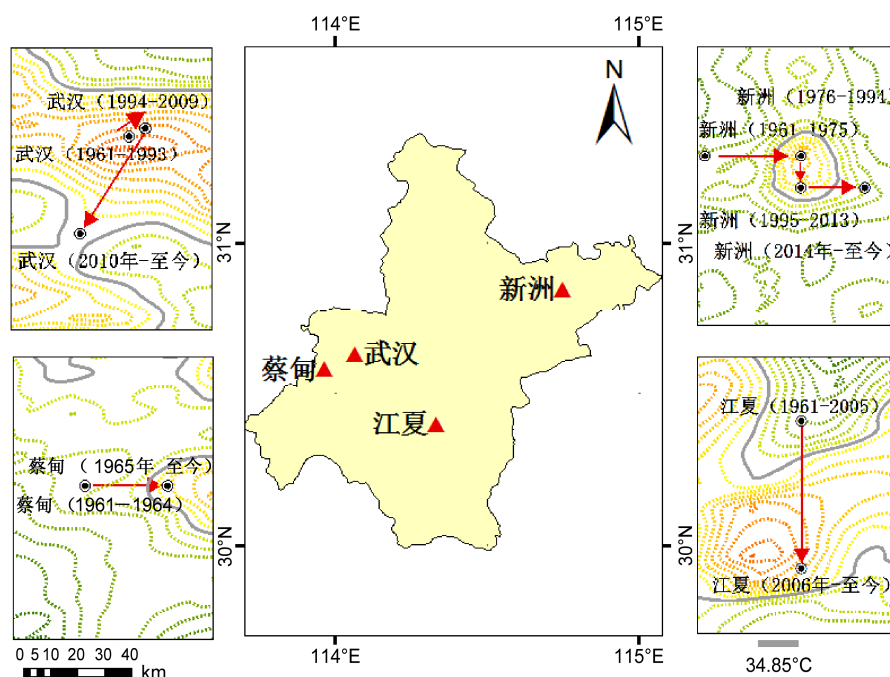


图2 武汉各城市站的迁站过程(等值线:地表亮度温度,单位:°C,等值线间隔:0.5°C)

Fig. 2 Relocation processes of each urban station in Wuhan area (contour stands for land surface brightness temperature, units: °C, isoline interval: 0.5 °C)

(表3),各季节RH从高到低依次为夏季(80.53%)、春季(79.10%)、秋季(78.33%)和冬季(76.98%)。无论在1990年以前还是以后以及整个研究时段,各季节RH之间的差距并不大,差异都在4%以内。从1990年前后时期比较来看,1990年以前春秋三季RH均高于1990年以后RH的平均值,而夏季1990年前后时期基本保持一致。

表3 1961~2015年不同时间段武汉城市四季RH均值

Table 3 Seasonal mean RH at urban stations in Wuhan during different periods of 1961–2015

年份	RH 均值			
	春季	夏季	秋季	冬季
1961~1989 年	80.94%	80.45%	79.39%	77.28%
1990~2015 年	76.88%	80.62%	77.16%	76.64%
1961~2015 年	79.10%	80.53%	78.34%	76.98%

对于武汉年平均RH及其不同季节、月份之间差异的解释,已经有一些研究。受武汉地理位置的影响,武汉地处地势低洼的长江中游河谷中,类似盆地的地势加之充足的水系使得水汽集易散难,所以全年和四季都维持着高的相对湿度(吴敏,1999)。同时,武汉具有亚热带季风性湿润气候特点,6月进入梅雨季,大气中低层的西南暖湿气流带来充沛的水汽(朱乾根等,2007),近地表空气相对湿度达到全年最高,雨量和暴雨频次也多(陈

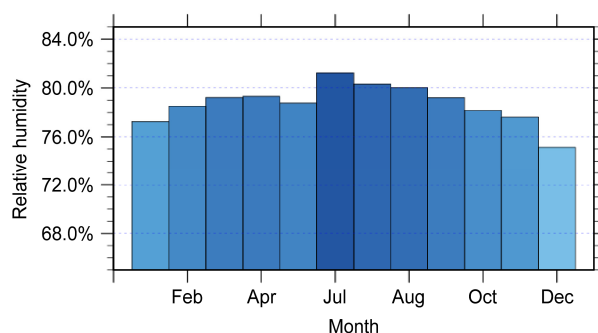


图3 1961~2015年武汉城市各月RH均值

Fig. 3 Monthly mean RH (Relative Humidity) in urban area of Wuhan during 1961–2015

正洪等,2005b)。12月RH出现低值,可能和冬季风南侵带来的干冷空气有关。

3.2 相对湿度的长期变化

图5a给出了武汉城市站年平均RH距平的时间序列,可以看出1961~2015年武汉城市的平均RH总体呈减少趋势,下降趋势为-0.83%/10 a。长期序列显示,RH出现两个变化阶段,第一个阶段是1990年代以前,RH大部分年份都为正距平,并且变化趋势并不明显;第二个阶段是1990年代以后,RH大部分年份都为负距平,并且呈现显著下降的趋势。在1980年代末期,RH出现了几个高值年,最

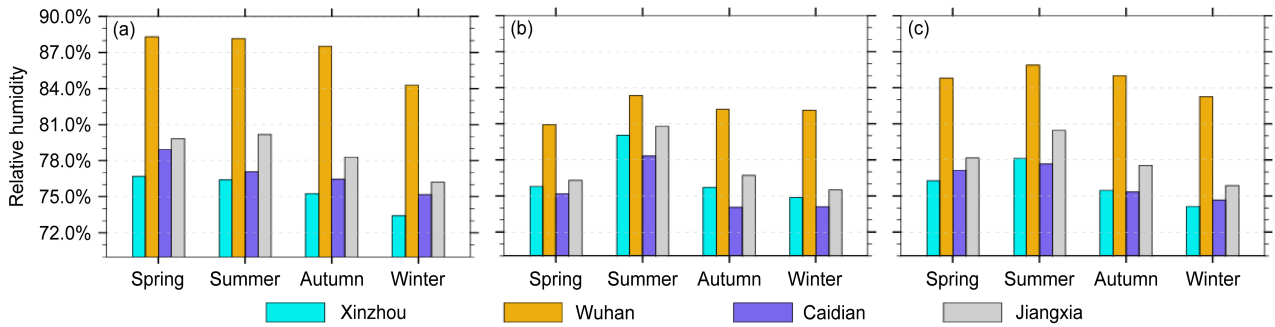


图4 (a) 1961~1989年、(b) 1990~2015年、(c) 1961~2015年时间段4个武汉城市站四季RH均值

Fig. 4 Seasonal mean RH at the four urban stations in Wuhan during (a) 1961~1989, (b) 1990~2015, and (c) 1961~2015

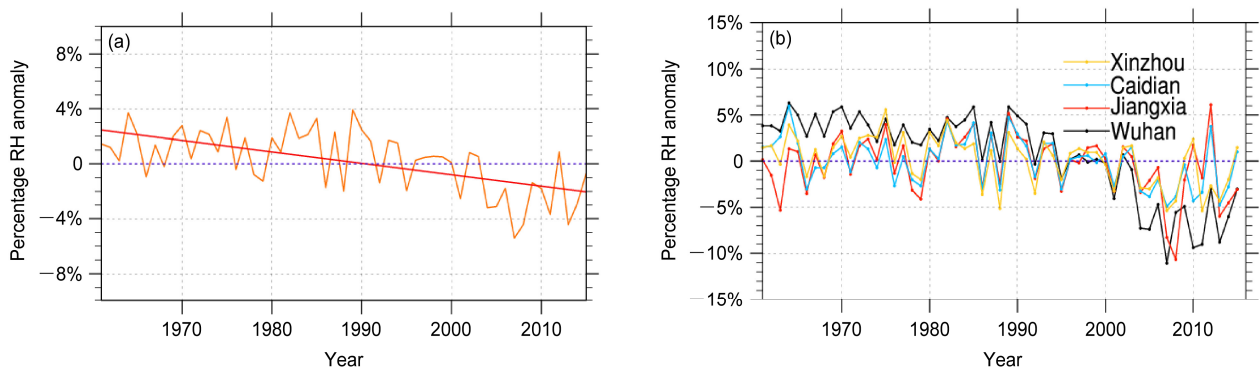


图5 1961~2015年 (a) 武汉城市RH距平序列和 (b) 武汉城市各站RH距平百分率年代序列

Fig. 5 Time series of (a) RH anomaly in urban area of Wuhan and (b) percentage RH anomaly series at four urban stations in Wuhan from 1961 to 2015

高年份达到了 82.6%；2000 年代以后，武汉城市 RH 出现了最低的 15 年，最低值出现在 2007 年，年均 RH 仅为 73.2%。因此，根据以上观测事实可以发现，武汉市气候逐渐向干化发展，特别是在 1990 年代以后干化趋势更为明显，这种现象与针对北京市、武威市等地的研究发现基本一致（郑思轶和刘树华，2008；刘明春等，2012）。

图 6 为对武汉城市各站平均季节 RH 距平序列和线性趋势。春、秋、冬 3 个季节的 RH 都显示出一致的下降趋势，这与年平均 RH 的变化趋势相同，但下降速率不同，分别是 $-1.410\%/10\text{ a}$ 、 $-0.540\%/10\text{ a}$ 、 $-0.507\%/10\text{ a}$ ，其中春季下降趋势最明显；夏季的 RH 存在较为显著的上升趋势，可达 $0.214\%/10\text{ a}$ 。年平均 RH 的下降主要是春秋冬三季下降引起的，春季的下降贡献最大。

1961~2015 年和 1990~2015 年武汉城市年及各季节 RH 距平变化趋势（表 4）显示，RH 距平年代变化从 1961 年以来呈现显著下降趋势，而 1990 年以后这种下降趋势更加明显，下降速率几乎是 1961 年以来变化的两倍。1961~2015 和 1990~2015

两个时段除了夏季，各季节均在 1990 年以后下降更显著；夏季 1961~2015 时期显示显著上升趋势，而 1990~2015 时期则显示出显著的下降趋势。

表 4 1961~2015 年和 1990~2015 年武汉城市四季及年平均 RH 距平变化趋势

Table 4 Changing trends of annual and seasonal mean RH in urban area of Wuhan for the periods 1961~2015 and 1990~2015

	RH 距平变化趋势/ $\% (10\text{ a})^{-1}$				
	年	春季	夏季	秋季	冬季
1961~2015 年	-0.83	-1.41	0.21	-0.54	-0.51
1990~2015 年	-1.61	-2.46	-1.14	-1.44	-1.38

注：均通过了 0.01 的显著性检验。

研究发现，1961~2012 年期间武汉降水量变化最大的季节是夏季，趋势为 $22.96\text{ mm}/10\text{ a}$ ，夏季降水在 20 世纪 60 年代到 70 年代偏少，70 年代中期以后逐渐上升，于 20 世纪 90 年代达到最高，此后呈现微弱的下降趋势（张意林等，2008；曹小雪，2015），这与本文研究得到的夏季 RH 变化趋势有明显的相似性。春季是平均气温上升速率最大的季

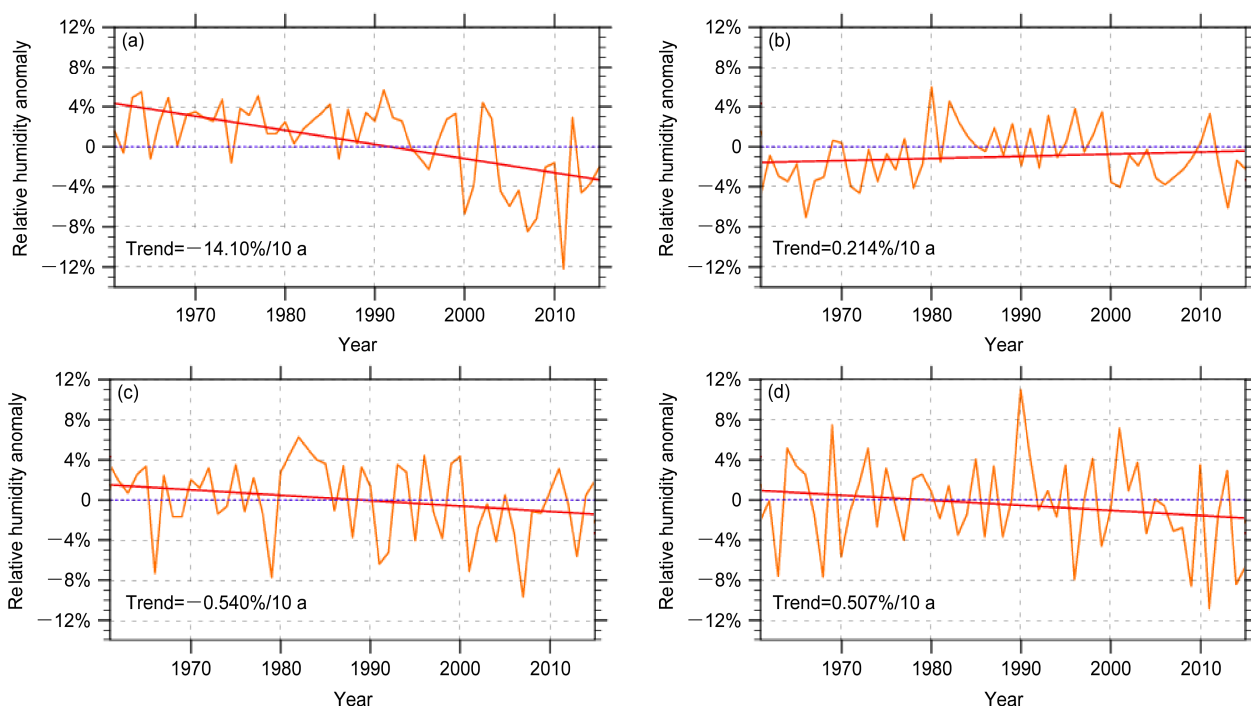


图6 1961~2015年武汉城市 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季 RH 的距平序列 (红色直线表示线性趋势, 蓝色虚线表示零线)

Fig. 6 Time series of RH anomalies (black curves) in urban area of Wuhan averaged in the (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter and their linear trends (red lines) from 1961 to 2015 (blue lines denote the zero line)

节, 为 $0.47^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 在 20 世纪 90 年代初之后上升趋势更为明显 (曹小雪, 2015), 这可能是影响武汉春季 RH 变化趋势最大的一个因素。因此 RH 在春、夏两季具有完全不同的变化趋势, 可能与降水量和温度在这两个季节的长期变化有一定联系。

4 讨论

观测数据序列中的非均一性, 对于单站气候要素长期趋势分析结果有明显影响。本文对 RH 数据的非均一性进行了检验和订正。非均一性数据订正的可信度及合理性, 可以从 E-P 方法检测序列断点的能力进行评价。从表 2 来看, 此方法检测出了序列中由于台站迁址所造成的断点, 并检测出非台站迁站所造成的断点信息。对武汉城市站 RH 序列均一化后, 订正绝对值均值大约为 5.03%。武汉站在 2010 年迁站至城郊之后有 RH 突然升高现象, 站史资料显示这种上升并非真实的自然变化, 而是迁站引起的非均一性误差。这种虚假的 RH 升高使得以线性回归得到的变化趋势由 $-0.83\%/10\text{ a}$ 上升到 $-0.65\%/10\text{ a}$ 。由此可见, RH 序列因迁站引起的非均一性影响较为明显, 开展 RH 序列变化研究时,

对其进行合理的订正是有必要的。当然, 本文的非均一性订正以剔除迁站影响为主, 没有考虑观测时间变化等可能引起的误差, 有待今后进一步完善。

李灿和陈正洪 (2010) 的分析表明, 1951~2007 年武汉市平均相对湿度的气候倾向率为 $-1.248\%/10\text{ a}$; 曹小雪 (2015) 研究则得出 1961~2012 年 RH 的下降速率是 $-1.36\%/10\text{ a}$ 。本文在均一性数据和客观选择城市站的基础上, 得到 1961~2015 年期间年平均 RH 的变化趋势为 $-0.83\%/10\text{ a}$ 。可见, 三者分析结果基本相近, RH 都呈下降趋势, 但年平均趋势大小有差别 (表 5)。本文获得的年平均 RH 下降趋势明显小于其他两项研究结果, 但本文结果指出武汉市平均 RH 变化主要是在 1990 年之后的急速下降造成的, 这段时间变化趋势可达 $-1.62\%/10\text{ a}$; 各个季节平均 RH 下降趋势均小于前人研究结果, 夏季本文结果为弱上升趋势。这些差异可能与不同的研究时段、站点选择方法、有无对资料序列做均一性检验和订正、以及城市台站数量差异等诸多因素有关。

武汉市城市发展在 20 世纪 80 年代末 90 年代初明显加速, 到 2009 年后城区面积增加了 2.25 倍; 五环线内水体面积由 1987 年的 509.94 km^2 减少至

表 5 武汉市 RH 长期变化趋势不同研究结果之间的对比

Table 5 Comparison of different research results of long-term trends of RH in Wuhan

参考文献	研究时段	研究区域/站点	有无非均一化 检验与订正	气候倾向率/ $\% (10\text{ a})^{-1}$				
				年	春	夏	秋	冬
李灿和陈正洪 (2010)	1951~2007 年	武汉市	无	-1.25*	无	无	无	无
曹小雪 (2012)	1961~2012 年	武汉站	无	-1.36*	-2.32*	-1.05*	-1.41*	-0.57
本文	1961~2015 年	武汉城市 (武汉站、江夏站、蔡甸站、新洲站)	有	-0.83*	-1.41*	0.21*	-0.54*	-0.51*

(注: 1990~2015 年: -1.61^*)

*代表通过 0.001 的显著性检验。

2009 年的 298.51 km^2 , 主要是城市发展过程中大量的土地用于住房建设, 导致水体区域被填埋 (王宁涛等, 2012)。1990 年之后武汉城市化加速很有可能 RH 急剧下降的一个主要因素。

RH 的变化也同样受到气象因素的直接影响。有研究显示 RH 与气温和风速呈负相关, 与降水量呈正相关 (靳英华等, 2009), 1953~2002 年半干燥地区三者与相对湿度的相关系数分别为: -0.384 、 0.351 、 0.072 , 即其中气温对其影响最大。在上海, 城市干岛效应 (UDI) 总是伴随着城市热岛效应 (UHI) 现象 (周淑贞, 1994); 北京城市干岛强度 (UDII) 与城市热岛强度 (UHII) 的空间结构也具有相似的分布, 强度均在秋季和冬季的夜晚大于春季和夏季的白天, 但 UHII 和 UDII 最大值和最小值出现的季节略有差异 (Yang et al., 2017)。在 1961~2000 年, 武汉城市的年均气温在 20 世纪 80 年代末期开始明显增加, 其热岛效应影响存在着显著的随时间增大趋势, 年平均、最低、最高气温的热岛增温速率分别为 0.2 、 0.37 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (陈正洪等, 2005a, 2006)。曹小雪 (2015) 指出, 虽然 2007~2012 年气温呈现下降趋势, 但这一阶段的气温平均值高于近 52 年平均值 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即仍然处于温暖期。这可能是城市热岛效应加强和全球气候变暖共同作用的结果。本文计算表明, 武汉城市站年平均气温与 RH 序列的相关系数为 -0.65 , 这与靳英华等 (2009) 的研究结果相类似, 说明武汉城区气温的明显上升可能是导致相对湿度不断下降的直接气象因素。

武汉城市暖干化的结论, 和其他处于沿海季风区城市相关研究结论基本一致。例如, 1959~2005 年城市化进程对长江三角洲城市 RH 变化的影响也较为突出, 尤其是在上海、宁波、杭州、常州等城市, RH 出现了显著下降, 城市干岛效应愈发突出 (史军等, 2008); 随着城市规模的扩大, 南京市

的城市干岛效应总体也呈现增强趋势 (顾丽华等, 2009)。

本文研究结果对天气和气候预报、城市水资源研究、城市气候以及城市规划有实际借鉴意义。总体上看, 在一个相对湿度很高的城市, 城市化导致的气候暖干化趋势, 对于缓解高温热浪影响、提高制冷和取暖能源利用效率具有一定正面影响, 但对于湿地保护和城市园林生态系统功能维护, 可能具有不利影响。

5 结论

运用武汉市 4 个气象站资料, 分析了城市 RH 的气候学和长期变化特征, 得到以下主要结论:

(1) 武汉城市站由于迁站引起的非均一性对 RH 序列造成约 5% 的误差, 这种虚假的 RH 升高使得以线性回归得到的变化趋势由 $-0.83\%/10\text{ a}$ 上升至 $-0.65\%/10\text{ a}$ 。

(2) 城区各月平均 RH 均大于 75%。RH 在 1~6 月逐渐增加, 6 月达到峰值, 可达 80% 以上, 随后缓慢减小, 于 12 月下降至全年最低值, 月际间保护范围为 $0.1\%\sim 2.5\%$ 。

(3) 城区夏季平均 RH 为 80.53%, 春季 79.10%, 秋季 78.33%, 冬季为 76.98%; 春秋三季平均 RH, 1990 年以前高于 1990 年以后, 夏季 1990 年前后基本保持一致; 武汉站年均 RH 为 84.73%, 其各个季节的 RH 均明显高于其余 3 站。

(4) 1961~2015 年期间, 城市区域年平均 RH 在 1990s 以前以正距平为主, 下降趋势并不明显, 1990s 以后大部分为负距平, 并且呈现显著下降的趋势; 4 个城市站中, 武汉站下降趋势最明显。

(5) 1961~2015 年武汉城市在春、秋、冬三个季节平均 RH 都呈现显著下降趋势, 但夏季平均 RH 存在较为显著的上升趋势; 除了夏季, 各季节趋势

均在 1991 年以后出现加速下降现象, 夏季在 1991 年以后也表现出下降趋势。

参考文献 (References)

- 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 2016. 武汉大气能见度与 PM2.5 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报 [J]. 气象学报, 74 (2): 189–199.
- Bai Yongqing, Qi Haixia, Liu Lin, et al. 2016. Study on the nonlinear relationship among the visibility, PM2.5 concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74 (2): 189–199, doi:10.11676/qxb2016.013.
- 曹丽娟, 严中伟. 2011. 地面气候资料均一性研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 7 (2): 129–135.
- Cao Lijuan, Yan Zhongwei. 2011. Progresses in research of homogenization of climate data [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 7 (2): 129–135, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.009.
- 曹小雪. 2015. 1961~2012 年武汉市气候变化特征分析 [D]. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文, 11–19.
- Cao Xiaoxue. 2015. Analysis of characteristics climate change in Wuhan city from 1961–2012 [D]. M.S. thesis (in Chinese), Wuhan: Central China Normal University, 11–19.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉, 等. 2005a. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 771–779.
- Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu, et al. 2005a. Change of urban heat island intensity and its effect on regional temperature series: A case study in Hubei province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 771–779, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.008.
- 陈正洪, 杨宏青, 任国玉, 等. 2005b. 长江流域雨量变化趋势及对干流流量影响 [J]. 人民长江, 36 (1): 22–23, 30.
- Chen Zhenghong, Yang Hongqing, Ren Guoyu, et al. 2005b. Area rainfall variation tendency in the Yangtze River basin and its influence on runoff of the main stream [J]. Yangtze River (in Chinese), 36 (1): 22–23, 30, doi:10.3969/j.issn.1001-4179.2005.01.010.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉. 2006. 武汉城市热岛强度非对称变化及对气温序列的影响 [C]// 中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集. 成都: 中国气象学会, 63–767.
- Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu. 2006. Asymmetrical change of urban heat island intensity and its impact on temperature series in Wuhan [C]//Proceedings of China Meteorological Society 2006 Annual Meeting "Atmospheric Composition and Climate, Environmental Change" Sub-Venues Proceedings (in Chinese). Chengdu: Chinese Meteorological Society, 763–767.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉. 2007. 武汉市城市热岛强度非对称性变化 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 282–286.
- Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu. 2007. Asymmetrical change of urban heat island intensity in Wuhan, China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 282–286, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.05.007.
- 顾丽华, 邱新法, 曾燕. 2009. 南京市城市干岛和湿岛效应研究 [C]//第 26 届中国气象学会年会气候环境变化与人体健康分会场论文集. 杭州: 中国气象学会, 606–612.
- Gu Lihua, Qiu Xinfu, Zeng Yan. 2009. Study on the effects of urban Dry Island and Wet Island in Nanjing [C]//Proceedings of the 26th Annual Meeting of Climate Meteorology and Human Health in China (in Chinese). Hangzhou: Chinese Meteorological Society, 606–612.
- 靳新华, 廉士欢, 周道玮, 等. 2009. 全球气候变化下的半干旱区相对湿度变化研究 [J]. 东北师范大学报 (自然科学版), 41 (4): 134–138.
- Jin Yinghua, Lian Shihuan, Zhou Daowei, et al. 2009. Study on change of relative humidity in semiarid region under global climate change [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese), 41 (4): 134–138, doi:10.3321/j.issn:1000-1832.2009.04.030.
- 李灿, 陈正洪. 2010. 武汉市主要年气候要素及其极值变化趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 19 (1): 37–41.
- Li Can, Chen Zhenghong. 2010. Trend of main climatic factors and its extreme values in Wuhan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 19 (1): 37–41.
- Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (2): 260–268, doi: 10.1007/BF02915712.
- 刘明春, 杨晓玲, 殷玉春, 等. 2012. 武威市相对湿度气候特征及预报 [J]. 干旱区研究, 29 (4): 654–659.
- Liu Mingchun, Yang Xiaoling, Yin Yuchun, et al. 2012. Climate characteristics and forecast of relative humidity in Wuwei City [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 29 (4): 654–659, doi:10.13866/j.azr.2012.04.020.
- Liu W D, You H L, Dou J X. 2009. Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area [J]. Theor. Appl. Climatol., 96 (3–4): 201–207, doi:10.1007/s00704-008-0024-6.
- Peixoto J P, Oort A H. 1996. The climatology of relative humidity in the atmosphere [J]. J. Climate, 9 (12):3443–3463, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<3443:TCORHI>2.0.CO;2.
- Peterson T C, Easterling D R. 1994. Creation of homogeneous composite climatological reference series [J]. International Journal of Climatology, 14 (6): 671–679, doi:10.1002/joc.3370140606.
- Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends [J]. J. Climate, 24 (13): 3179–3189, doi:10.1175/2010JCLI3658.1.
- Saaroni H, Ziv B. 2003. The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: The case of Tel Aviv, Israel [J]. International Journal of Biometeorology, 47 (3): 156–165, doi:10.1007/s00484-003-0161-7.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 19–22.
- Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Eastrophysics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 19–22.
- 史军, 周伟东, 崔林丽. 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 Jun, Zhou Weidong, Cui Linli. 2008. Change trend of climatic factors in the Yangtze River delta from 1959 to 2005 [J]. Resources Science (in Chinese), 30 (12): 1803–1810.
- Um H H, Ha K J, Lee S S. 2007. Evaluation of the urban effect of long-term relative humidity and the separation of temperature and water vapor effects [J]. International Journal of Climatology, 27 (11): 1531–1542, doi:10.1002/joc.1483.
- 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 2005. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用 [J]. 中国科学 (D 辑), 35 (S1): 145–155.
- Wang Guangtao, Wang Xiaoyun, Miao Shiguang, et al. 2005. Research and

- application on the technology system of multi-scale assessment of the impact on the atmospheric environment by urban planning [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 35 (S1): 145–155, doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2005.z1.014.
- 王苗, 邬昀, 任永建, 等. 2015. 武汉地区城市热岛效应及影响要素分析 [C]//中国气象学会 2015 年年会论文集. 天津: 中国气象学会, 232–245.
- Wang Miao, Wu Yun, Ren Yongjian, et al. 2015. An analysis of the features of the urban heat island in Wuhan and the influence elements[C]//Proceedings of Chinese Meteorological Society 2015 Annual Conference Proceedings (in Chinese). Tianjin: Chinese Meteorological Society, 232–245.
- 王宁涛, 崔放, 陈植华, 等. 2012. 武汉市 1987~2009 年城市发展及其驱动力分析 [J]. 安全与环境工程, 19 (4): 1–7.
- Wang Ningtao, Cui Fang, Chen Zhihua, et al. 2012. Analysis on the urban development and driving force in Wuhan City during 1987–2009 [J]. Safety and Environmental Engineering (in Chinese), 19 (4): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1671-1556.2012.04.001.
- Winkler J A, Skaggs R H, Baker D G. 1981. Effect of temperature adjustments on the Minneapolis-St. Paul urban heat island [J]. J. Appl. Meteor., 20 (11): 1295–1300, doi:10.1175/1520-0450(1981)020<1295:EOTAOT>2.0.CO;2.
- 吴敏. 1999. 武汉的地形、洪灾及成因 [J]. 湖北档案, (2): 41.
- Wu Min. 1999. Terrain, flood and cause of Wuhan [J]. Hubei Archives (in Chinese), (2): 41.
- 轩春怡, 王晓云, 蒋维楣, 等. 2010. 城市中水体布局对大气环境的影响 [J]. 气象, 36 (12): 94–101.
- Xuan Chunyi, Wang Xiaoyun, Jiang Weimei, et al. 2010. Impacts of water layout on the atmospheric environment in urban areas [J]. Meteorology (in Chinese), 36 (12): 94–101, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.12.014.
- 杨凯, 唐敏, 刘源, 等. 2004. 上海中心城区河流及水体周边小气候效应分析 [J]. 华东师范大学报 (自然科学版), (3): 105–114.
- Yang Kai, Tang Min, Liu Yuan, et al. 2004. Analysis of microclimate effects around river and waterbody in Shanghai urban district [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (in Chinese), (3): 105–114, doi:10.3969/j.issn.1000-5641.2004.03.019.
- Yang P, Ren G Y, Hou W. 2017. Tempo-spatial patterns of relative humidity and the Urban dryness Island effect in Beijing City [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56 (8): 2221–2237, doi:10.1175/JAMC-D-16-0338.1.
- 余程鹏. 2008. 武汉市土地利用变化及其对水环境的影响 [D]. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文, 65–66.
- Yu Chengpeng. 2008. Land-use change of Wuhan city and its environmental impact on water [D]. M.S. thesis (in Chinese), Wuhan: Central China Normal University, 65–66.
- 张意林, 覃军, 陈正洪. 2008. 近 56 a 武汉市降水气候变化特征分析 [J]. 暴雨灾害, 27 (3): 253–257.
- Zhang Yilin, Qin Jun, Chen Zhenghong. 2008. Analysis on the change characteristics of precipitation in the latest 56 years in Wuhan [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27 (3): 253–257, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2008.03.010.
- 郑思轶, 刘树华. 2008. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 123–133.
- Zheng Siyi, Liu Shuhua. 2008. Urbanization effect on climate in Beijing[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 123–133, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.02.
- 周淑贞. 1994. 上海大气湿度的城、郊对比分析 [J]. 海洋湖沼通报, (2): 13–25.
- Zhou Shuzhen. 1994. Discussion of the urban-rural differences in atmospheric humidity of Shanghai area [J]. Transaction of Oceanology and Limnology, (2): 13–25, doi:10.13984/j.cnki.cn37-1141.1994.02.002.
- 周雅清, 任国玉. 2005. 华北地区地表气温观测中城镇化影响的检测和订正 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 743–753.
- Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2005. Identifying and correcting urban bias for regional surface air temperature series of North China over period of 1961–2000 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 743–753, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.04.005.
- 朱春阳. 2015. 城市湖泊湿地温湿效应—以武汉市为例 [J]. 生态学报, 35(16): 5518–5527.
- Zhu Chunyang. 2015. Effects of urban lake wetland on temperature and humidity: A case study of Wuhan City [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 35 (16): 5518–5527, doi:10.5846/stxb201312132951.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 354–355.
- Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Principles and methods of weather science (in Chinese) [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 354–355.