

中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究

徐丽君¹, 卫琦¹, 徐俊增¹, 龙上敏², 薛璟¹, 戴惠东³

(1. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098;
3. 昆山市城市水系调度与信息管理处, 江苏 昆山 215300)

摘要: 降雨量(P)和相对湿度(RH)是反映全球干湿变化最常用的气象因子,掌握二者在不同干旱区、不同时段(全年、雨季和非雨季)的变化趋势及其非一致性规律,对于准确认识全球变暖背景下干旱区干湿变化状况具有重要指导意义。基于中国北方干旱区20个气象站点1951-2018年的日气象数据,采用M-K趋势检验法研究了各站点 P 和 RH 在全年、雨季和非雨季时段的长期变化趋势,着重讨论了两者的变化趋势的非一致性。结果表明:不同时段 P 呈增加趋势的站点占总站点个数的70%~100%,其在全年、雨季和非雨季的增幅分别为0.02~4.42、0.01~3.96和0.03~0.84 mm/a;不同时段 RH 的变化趋势大多与 P 相反,其在全年、雨季和非雨季呈降低趋势的站点比例分别为85%、85%和90%,降幅为0.01%/a~0.19%/a、0.01%/a~0.17%/a和0.01%/a~0.21%/a; P 和 RH 在全年和非雨季时段的非一致性均高达90%,而在雨季时段的非一致程度较低,仅为65%;且气温 T (全年和雨季)及其增量 ΔT (非雨季)可能是导致 P 与 RH 呈非一致性的关键因子;未来气候变暖背景下,气温的升高将加剧雨季的降雨-蒸发过程,且这一问题将覆盖越来越多的干旱区。

关键词: 降雨量;相对湿度;雨季;非雨季;非一致性;中国北方干旱区

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0038-07

Inconsistent change trends between precipitation and relative humidity in arid areas of north China

XU Lijun¹, WEI Qi¹, XU Junzeng¹, LONG Shangmin², XUE Jing¹, DAI Huidong³

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Urban Water Scheduling and Information Management Department of Kunshan, Suzhou 215300, China)

Abstract: Precipitation (P) and relative humidity (RH) are the most commonly used meteorological factors in the study of global dry and wet changes. It is of great significance for the researchers to grasp the change trends and their inconsistent patterns in different arid regions and different periods (annual, rainy and non-rainy seasons), in order to accurately acknowledge the dry and wet changes in arid regions under the background of global warming. Based on the daily meteorological data of 20 meteorological stations in arid regions of north China from 1951 to 2018, the M-K trend test method was used to study the long-term trends of P and RH at each station in the whole year, rainy season and non-rainy season, and the inconsistency of the two trends was emphatically discussed. The results demonstrated that the stations with increasing P in different periods accounted for 70% - 100% of the total number of stations, and the P of the annual, rainy and non-rainy seasons increased by 0.02 - 4.42, 0.01 - 3.96 and 0.03 - 0.84 mm/a, respectively. Whereas the change trend of RH in different periods was almost opposite to that of P , and the proportion of stations with decreasing trend in the whole year, rainy season and non-rainy season accounted for 85%, 85% and 90%, with a decrease of 0.01%/a - 0.19%/a, 0.01%/a -

收稿日期:2020-12-05; 修回日期:2021-01-31

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B200201004)

作者简介:徐丽君(1996-),女,安徽合肥人,在读硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论及其农田生态效应。

通讯作者:卫琦(1986-),男,山西运城人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事节水灌溉理论及其农田生态效应研究。

0.17%/a and 0.01%/a - 0.21%/a, respectively. The inconsistency of P and RH in the whole year and non-rainy season periods reached 90%, whereas that in the rainy season period only accounted for 65%. It is found that the temperature T (annual and rainy season) and its increment ΔT (non-rainy season) may be the key factors leading to the inconsistency between P and RH . In the context of future climate warming, the rising temperature will exacerbate the precipitation - evapotranspiration process during the rainy season and this problem will inflict an increasing number of arid areas.

Key words: precipitation (P); relative humidity (RH); rainy season; non-rainy season; inconsistency; arid areas of north China

1 研究背景

20 世纪中期以来,全球变暖加剧,不同地区(尤其是干旱区)的干湿状况发生了显著的变化^[1-6],掌握气候变暖背景下干旱区干湿变化趋势及区域间差异,对于了解不同干旱区生态系统变化、制定相应对策具有重要指导意义。降雨量(P)作为最常用的气象因子,其长期变化趋势通常被用于反映气候的干湿变化^[7-9]。例如,马柱国等^[10]利用 1951 - 2004 年的月 P 资料研究了中国北方地区过去 54 年的干湿变化,结果表明北方地区的 P 整体上呈逐渐减少趋势、干旱化趋势不断加剧。陈洁等^[11]基于 1961 - 2010 年的月 P 资料分析了中国大陆过去 50 年的干湿变化状况,结果发现华北和东北地区 P 呈减少趋势,干旱化趋势加剧,而西北和青藏高原地区的 P 呈增加趋势,气候呈湿润化趋势。

除降雨量外,相对湿度(RH)是一个从空气水蒸气含量变化的角度来反映区域干湿变化的变量^[12-14]。例如,卢爱刚等^[15]基于 1958 - 2007 年的月 RH 资料研究了中国近 50 年的空气湿度变化,结果发现中国西部地区 RH 呈增大的“暖湿化”趋势;而东部地区 RH 呈减小的“暖干化”趋势。李瀚等^[16]利用 1966 - 2013 年的月 RH 资料研究了中国西南地区的 RH 变化特征,结果显示该地区 1966 - 2000 年 RH 的值呈轻微上升趋势,而 2000 - 2013 年呈快速下降趋势。在以往研究中,已有一些学者同时关注了 P 和 RH 的变化趋势,发现年 P 和 RH 存在变化趋势的不一致性。例如,李东等^[17]发现乌鲁木齐地区 1962 - 2011 年的 P 呈增加趋势,而 RH 却基本保持稳定。郑然等^[18]发现青藏高原 1971 - 2011 年内年 P 呈增大趋势,而 RH 自 1990 年后呈减小趋势。然而,上述研究都是在个别站点发现的现象,且缺乏系统性的分析。考虑到 P 和 RH 均为表征全球干湿变化趋势的重要因子,且干旱区分布范围较广、年内降雨量分布极不均匀,因此,针对干旱区不同区域的站点,区分雨季与非雨季时段,对研判 P 和 RH 的变化

趋势及其非一致性规律尤为重要,但相关方面的研究还鲜有报道。

随着气候变暖,气温的升高将改变全球降雨的格局,并进一步影响空气实际水汽含量的变化,因此,基于 P 和 RH 的变化趋势开展干旱区在不同时段、不同区域的干湿变化状况研究,对于认识气候变暖背景下干旱区的干湿变化状况具有一定的重要性。以此为背景,本研究拟选择中国北方从新疆到黑龙江不同区域的干旱区多个典型的气象站点,基于 1951 - 2018 年的日 P 值和 RH 值资料,研究各站点 P 和 RH 在全年、雨季和非雨季时段的变化趋势,分析讨论两者在指示干湿变化趋势中的一致性,旨在了解气候变暖背景下不同指标(P 和 RH) 表征北方干旱区干湿变化状况及其非一致性规律,研究结果对于评价指标的合理选择以及干旱区干湿变化状况的准确评估具有重要参考意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用的气象资料由国家气象科学中心(<http://www.nmic.cn/>)提供。考虑到资料的完整性和代表性,在遴选代表性气象站点的过程中,所采用的主要原则如下:(1)气象资料序列长且年份不断档,即所选择站点 1951 - 2018 年的日 P 和 RH 资料中不存在异常数据且具有连续性;(2)站点覆盖整个北方干旱区,根据经纬度进行区域划分,考虑到中国干旱区横向分布范围辽阔,站点纬度密度应大于经度密度,经纬度范围分别选择在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}N$ 和 $75^{\circ} \sim 130^{\circ}E$ 之间,挑选了空间分布均匀且具有明显差异性和较强代表性的站点。通过筛选,选取了中国北方干旱区 20 个常规气象站点近 68 年(1951 - 2018 年)的日气象数据,主要包括日降雨量(P , mm)和日相对湿度(RH , %),对干旱区降雨和相对湿度变化的特征进行系统分析。各气象站点的基本信息如表 1 所示。

2.2 统计方法

采用 SPSS (statistical product and service solutions) 对不同时段 (全年、雨季和非雨季) 的 P 和 RH 进行了统计分析, 其中全年、雨季和非雨季时段分别

代表 1-12 月、4-10 月和 11-次年 3 月。采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[19] 对 P 和 RH 的趋势变化进行了分析, 在反映干湿变化状况时, 两者出现增加趋势表明变湿润, 反之则变干旱。

表 1 所选中国北方干旱区典型气象站点的基本信息

站点	经度	纬度	年平均 气温 $T/^\circ\text{C}$	年平均 P/mm	年平均 $RH/\%$	站点	经度	纬度	年平均 气温 $T/^\circ\text{C}$	年平均 P/mm	年平均 $RH/\%$
榆林	38°16'	109°47'	9.9	404.4	55.1	和田	37°08'	79°56'	12.9	38.2	41.2
太原	37°47'	112°33'	9.4	432.5	58.7	张掖	38°56'	100°26'	7.6	123.8	51.6
哈尔滨	45°45'	126°46'	2.8	511.3	65.6	喀什	39°28'	75°59'	12.1	65.1	50.0
承德	40°59'	117°57'	5.3	519.2	55.5	玉树	33°01'	97°01'	2.8	456.4	54.1
酒泉	39°46'	98°29'	7.6	83.4	46.7	格尔木	36°25'	94°54'	5.4	41.0	32.3
阿克苏	41°10'	80°14'	10.6	71.9	56.3	那曲	31°29'	92°04'	-1.6	392.5	51.4
固原	36°00'	106°16'	6.2	443.9	60.9	西宁	36°43'	101°45'	6.0	377.5	56.5
靖远	36°34'	104°41'	9.3	225.7	58.1	银川	38°29'	106°13'	9.3	191.3	56.1
玛多	34°55'	98°13'	-3.5	273.7	57.1	呼和浩特	40°49'	111°41'	8.2	399.1	52.9
民勤	38°38'	103°05'	8.6	112.2	44.4	吐鲁番	42°56'	89°12'	14.9	14.3	39.4

为了定量评价 P 和 RH 的变化趋势, 基于其多年变化斜率, 利用统计排序进行归一化处理得到各自变化趋势的相对数值。对 P 和 RH 的增加幅度按降序进行 0~1 的赋分排序, 并将各自站点的两个变量赋分值进行相加用于定量表征两者变化趋势的反向差异度。此外, 采用 Pearson 相关系数法^[20] 分析了不同时段 P 和 RH 值与其归一化赋分值、反向差异度等指标的相关性。

3 结果与分析

3.1 不同时段 P 变化趋势

各典型气象站点 P 在不同时段的变化趋势如表 2 所示。分析表 2 可知, 全年时段 P 呈增大趋势的站点个数占总站点个数的 95%, 增幅为 0.02~4.42 mm/a; 且该时段内 60% 站点 (12 个) 的降雨量 P 呈显著性增大 ($p < 0.05$)。非雨季时段所有站点的 P 均呈增大趋势, 增幅为 0.03~0.84 mm/a, 且其在 95% 的站点呈显著性增加 ($p < 0.05$); 与全年和非雨季时段相比, 雨季时段 P 呈减少趋势的站点个数 (6 个) 显著增加, 减幅为 0.01~1.00 mm/a, 且均未达到显著性水平 ($p > 0.1$)。此外, 通过分析各站点多年平均累积降雨量与降雨变化量的回归关系, 可以发现降雨量越大的站点, 其不同时段内的降雨增加量也相对越大。

对比表 2 中的不同时段, 非雨季时段内各站点

P 的增大幅度 (0.03~0.84 mm/a) 相对稳定; 其中在固原、西宁、玉树等站点的增幅较大 (0.41~0.61 mm/a), 而在吐鲁番等站点的增幅较小 (< 0.05 mm/a)。与非雨季时段不同, 雨季和全年时段各站点 P 的增大趋势较为明显, 其中在青海—西藏一带的玛多、那曲等站点的增大趋势较为显著 (1.52~4.42 mm/a), 在新疆—甘肃一带的西北内陆干旱区站点 (吐鲁番、张掖、民勤等) 的增大幅度较小 (0.02~0.47 mm/a)。而对于宁夏—陕西—山西—河北一带的站点来说, 其降雨量变化趋势并不稳定, 雨季降雨量多为减少趋势。

3.2 不同时段 RH 变化趋势

各典型气象站点 RH 在不同时段的变化趋势如表 3 所示。由表 3 可知, 就全年时段而言, 仅有 3 个站点的 RH 呈增大趋势, 增幅为 0~0.04%/a; 而其余站点均呈减小趋势, 降幅为 0.01%/a~0.19%/a, 且 88.2% 的站点呈显著性减小 ($p < 0.05$)。与全年时段相比, 雨季时段 RH 呈增加趋势的站点个数保持相同, 但其增加幅度略有所增大, 为 0.02%/a~0.06%/a; 非雨季时段 RH 呈增加趋势的站点个数 (2 个) 有所减少, 且其增加幅度均未通过显著性检验水平 ($p > 0.1$)。总体而言, 全年、雨季和非雨季时段所选典型站点的 RH 变化趋势基本相似, 呈减小趋势的站点个数基本相同。

对比不同站点, 可以发现其 RH 的变化趋势均

较为相似,除河北承德 RH 始终呈增大趋势外,大多数站点均呈明显的减小趋势;其中在陕甘宁干旱区的榆林、银川、张掖等站点的 RH 减小幅度较为显著,而在青海—甘肃—西藏一带的站点变化趋势则缺乏一致性规律,即全年和雨季时段的西宁、酒泉站

点 RH 呈增大趋势、那曲站点 RH 呈减小趋势,而非雨季时段则正好相反。

3.3 P 与 RH 变化趋势的非一致性

不同时段各典型气象站点 P 和 RH 变化趋势的一致性如表 4 所示。

表 2 各典型气象站点在不同时段 P 变化趋势

站点	全年		雨季		非雨季		站点	全年		雨季		非雨季	
	$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p	$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p	$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p		$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p	$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p	$\Delta P /$ (mm·a ⁻¹)	p
榆林($n = 68$)	1.49	$p < 0.05$	1.06	$p > 0.10$	0.44	$p < 0.05$	和田($n = 65$)	0.45	$p < 0.05$	0.24	$p > 0.10$	0.19	$p < 0.05$
太原($n = 68$)	0.06	$p > 0.10$	-0.29	$p > 0.10$	0.37	$p < 0.05$	张掖($n = 68$)	0.37	$p > 0.10$	0.17	$p > 0.10$	0.21	$p < 0.05$
哈尔滨($n = 68$)	0.67	$p > 0.10$	-0.15	$p > 0.10$	0.84	$p < 0.05$	喀什($n = 68$)	0.87	$p < 0.05$	2.21	$p < 0.05$	0.41	$p < 0.05$
承德($n = 68$)	-0.54	$p > 0.10$	-1.00	$p > 0.10$	0.48	$p < 0.05$	玉树($n = 66$)	2.73	$p < 0.05$	0.36	$p < 0.05$	0.51	$p < 0.05$
酒泉($n = 68$)	0.56	$p < 0.05$	0.28	$p > 0.10$	0.27	$p < 0.05$	格尔木($n = 63$)	0.45	$p < 0.05$	3.96	$p < 0.05$	0.10	$p < 0.05$
阿克苏($n = 65$)	0.83	$p < 0.05$	0.53	$p < 0.05$	0.29	$p < 0.05$	那曲($n = 64$)	4.42	$p < 0.05$	1.52	$p < 0.05$	0.46	$p < 0.05$
固原($n = 62$)	0.32	$p > 0.10$	-0.31	$p > 0.10$	0.61	$p < 0.05$	西宁($n = 65$)	1.96	$p < 0.05$	0.01	$p < 0.05$	0.41	$p < 0.05$
靖远($n = 68$)	0.13	$p > 0.10$	-0.10	$p > 0.10$	0.21	$p < 0.05$	银川($n = 68$)	0.17	$p > 0.10$	0.24	$p > 0.10$	0.15	$p < 0.05$
玛多($n = 66$)	3.91	$p < 0.05$	3.40	$p < 0.05$	0.48	$p < 0.05$	呼和浩特($n = 68$)	0.45	$p < 0.05$	-0.01	$p > 0.10$	0.19	$p < 0.05$
民勤($n = 66$)	0.45	$p < 0.05$	0.30	$p > 0.10$	0.15	$p < 0.05$	吐鲁番($n = 67$)	0.02	$p > 0.10$	0.47	$p > 0.10$	0.03	$p > 0.10$

注: n 为各站点降雨量 P 的统计年份数; ΔP 为 P 的年均变化量; p 为各站点 P 的显著性水平。

表 3 各典型气象站点在不同时段 RH 变化趋势

站点	全年		雨季		非雨季		站点	全年		雨季		非雨季	
	$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p	$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p	$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p		$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p	$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p	$\Delta RH /$ (%·a ⁻¹)	p
榆林($n = 68$)	-0.14	$p < 0.05$	-0.09	$p < 0.05$	-0.21	$p < 0.05$	和田($n = 65$)	-0.07	$p < 0.05$	-0.07	$p < 0.05$	-0.08	$p > 0.10$
太原($n = 68$)	-0.09	$p < 0.05$	-0.06	$p < 0.05$	-0.11	$p < 0.05$	张掖($n = 68$)	-0.10	$p < 0.05$	-0.10	$p < 0.05$	-0.09	$p < 0.05$
哈尔滨($n = 68$)	-0.07	$p < 0.05$	-0.07	$p < 0.05$	-0.07	$p > 0.10$	喀什($n = 68$)	-0.06	$p > 0.10$	-0.04	$p > 0.10$	-0.08	$p > 0.10$
承德($n = 68$)	0.04	$p > 0.10$	0.06	$p > 0.10$	0.04	$p > 0.10$	玉树($n = 66$)	-0.06	$p < 0.05$	-0.06	$p < 0.05$	-0.08	$p < 0.05$
酒泉($n = 68$)	0.00	$p > 0.10$	0.03	$p > 0.10$	-0.03	$p > 0.10$	格尔木($n = 63$)	-0.04	$p < 0.05$	-0.01	$p > 0.10$	-0.08	$p < 0.05$
阿克苏($n = 65$)	-0.06	$p < 0.05$	-0.08	$p < 0.05$	-0.03	$p > 0.10$	那曲($n = 64$)	-0.01	$p > 0.10$	-0.03	$p > 0.10$	0.02	$p > 0.10$
固原($n = 62$)	-0.09	$p < 0.05$	-0.12	$p < 0.05$	-0.04	$p > 0.10$	西宁($n = 65$)	0.01	$p > 0.10$	0.02	$p > 0.10$	-0.01	$p > 0.10$
靖远($n = 68$)	-0.05	$p < 0.05$	-0.06	$p < 0.05$	-0.04	$p > 0.10$	银川($n = 68$)	-0.19	$p < 0.05$	-0.17	$p < 0.05$	-0.20	$p < 0.05$
玛多($n = 66$)	-0.08	$p < 0.05$	-0.04	$p > 0.10$	-0.15	$p < 0.05$	呼和浩特($n = 68$)	-0.07	$p < 0.05$	-0.07	$p < 0.05$	-0.08	$p > 0.10$
民勤($n = 66$)	-0.05	$p < 0.05$	-0.04	$p > 0.10$	-0.06	$p > 0.10$	吐鲁番($n = 67$)	-0.10	$p < 0.05$	-0.08	$p < 0.05$	-0.10	$p < 0.05$

注: n 为各站点相对湿度 RH 的统计年份数; ΔRH 为 RH 的年均变化量; p 为各站点 RH 的显著性水平。

由表 4 可见, P 和 RH 呈非一致性规律较多的站点发生在全年和非雨季时段,而呈一致性规律较多的站点主要发生在雨季时段。具体表现为: P 和 RH 在全年和非雨季时段呈非一致性规律的站点个数高达 18 个,占总站点个数的 90%;而二者在雨季时段呈非一致性规律的站点个数为 13 个,较全年和非雨季时段减少了 27.8%。

结合各站点 P 和 RH 在不同时段的变化趋势,可以看出,对于 P 和 RH 呈非一致性规律的大多数站点来说,其共同的特征是 P 呈增加趋势、 RH 呈降低趋势;而对于 P 和 RH 呈一致性规律的站点来说,其 P 和 RH 大多呈增加趋势,且 P 的增加量远大于 RH 。

表 4 各典型气象站点 P 和 RH 在不同时段变化趋势的非一致性

站点	全年时段	雨季时段	非雨季	站点	全年时段	雨季时段	非雨季
榆林	/	/	/	和田	/	/	/
太原	/	*	/	张掖	/	/	/
哈尔滨	/	*	/	喀什	/	/	/
承德	/	/	*	玉树	/	/	/
酒泉	*	*	/	格尔木	/	/	/
阿克苏	/	/	/	那曲	/	/	*
固原	/	*	/	西宁	*	*	/
靖远	/	*	/	银川	/	/	/
玛多	/	/	/	呼和浩特	/	*	/
民勤	/	/	/	吐鲁番	/	/	/

注:/表示 P 与 RH 呈非一致性;*表示 P 与 RH 呈一致性。

进一步分析发现,不同时段内 P 和 RH 呈非一致性变化的站点主要集中在阿克苏、和田、喀什、玛多、民勤、张掖、玉树、银川等新疆—青海—甘肃地区;而 P 和 RH 呈非一致规律不稳定的地区主要发生在那曲、太原、承德等西藏—山西—河北—甘肃地区。

此外,通过分析 P 、 RH 与其变化量 (ΔP 、 ΔRH) 以及反向差异度 ($\Delta RH + \Delta P$) 的线性回归关系(表5)可以得出,各时段 P 与 RH 、 ΔT 均呈显著的正相关关系 ($p < 0.01$),且其相关系数 (R^2) 在雨季更大,分别为 0.74 和 0.68;而 RH 仅在雨季与 T 、 ΔT 呈显著的正相关关系 ($p < 0.05$),相关系数分别为 0.28 和 0.30。

对于 ΔP 赋分值来说,其在全年和雨季时段内与 T 呈显著的正相关关系 ($p < 0.01$),而在非雨季时段与气温增量 ΔT 呈显著的正相关关系 ($p < 0.05$)。对于 ΔRH 赋分值而言,其在各时段内与各气象因子及其变量的相关性均未达到显著性水平 ($p > 0.1$)。对于 ($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度来说,其在全年和雨季时段内与 T 、 ΔP 赋分值以及 ΔRH 赋分值呈显著的正相关关系,且其与 T 和 ΔRH 赋分值的相关系数在雨季更大。而在非雨季时段, ($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度与气温增量 ΔT 、 ΔP 赋分值以及 ΔRH 赋分值呈显著的正相关关系。

表5 不同时段 P 、 RH 与其归一化赋分值、反向差异度的相关系数

时段	变量	相关系数 (R^2)						
		P	RH	T	ΔT	ΔP 赋分值	ΔRH 赋分值	($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度
全年	P	1.00	0.52**	0.21*	0.69**	0.05	0.02	0.06
	RH		1.00	0.08	0.19	0.02	0.02	0.00
	T			1.00	0.09	0.64**	0.04	0.50**
	ΔT				1.00	0.02	0.01	0.02
	ΔP 赋分值					1.00	0.02	0.63**
	ΔRH 赋分值						1.00	0.51**
	($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度							1.00
雨季	P	1.00	0.74**	0.26*	0.68**	0.02	0.01	0.02
	RH		1.00	0.28*	0.30*	0.05	0.01	0.00
	T			1.00	0.07	0.52**	0.13	0.51**
	ΔT				1.00	0.00	0.00	0.00
	ΔP 赋分值					1.00	0.02	0.59**
	ΔRH 赋分值						1.00	0.56**
	($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度							1.00
非雨季	P	1.00	0.22*	0.05	0.49**	0.58**	0.02	0.16
	RH		1.00	0.00	0.00	0.16	0.02	0.02
	T			1.00	0.02	0.12	0.03	0.01
	ΔT				1.00	0.24*	0.05	0.21*
	ΔP 赋分值					1.00	0.03	0.57**
	ΔRH 赋分值						1.00	0.61**
	($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度							1.00

注: P 、 RH 和 T 分别为平均降雨量 (mm)、平均相对湿度 (%) 和平均气温 (°C); ΔT 为气温变化量 (°C); ΔP 和 ΔRH 赋分值分别为按照归一化方法对降雨量和相对湿度变化量的赋分值,其值范围为 [0,1]; ($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度指的是 ΔP 与 ΔRH 赋分值之和,其值范围为 [0,2]; * 指显著性 $p < 0.05$, ** 指显著性 $p < 0.01$ 。

4 讨论

降雨和相对湿度作为最重要的气象因子,是最

常用的评价空气长期干湿状况的指标^[21-25]。国内外相关学者已经基于 P 和 RH 开展了一些研究工作^[26-31],已有研究发现长江流域^[32] 和淮河流域^[33]

的 P 和 RH 均呈不同程度的增大趋势,气候呈“暖湿化”趋势,而在中国干旱区的研究结果则倾向于气候呈“暖干化”特征。例如,贾格等^[34] 研究发现内蒙古吉力吐地区的 P 和 RH 呈逐年下降趋势,气候呈“暖干化”特征。本研究中,不同时段内 P 在绝大部分站点呈现增大趋势,表明大多数干旱区呈“湿润化”趋势,与上述大多数文献的研究结果较为相似。但 RH 多呈现减小趋势,空气干燥程度增加又表明中国干旱区呈“干旱化”趋势。上述结果意味着我国干旱区正在经历一个降雨量微弱增加、空气变得更干燥的时期。这也似乎表明未来气候变化背景下干旱区可利用水量、可蒸发水量以及大气蒸发能力将协同增加,干旱区降水—蒸发过程呈加剧趋势,且雨季和非雨季的对比结果表明这一问题在雨季时段表现的更为突出。

此外,本研究结果表明, T 、 ΔP 以及 ΔRH 赋分值与全年和雨季时段 ($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度具有显著的相关性,而 ΔT 、 ΔP 以及 ΔRH 赋分值与非雨季时段 ($\Delta RH + \Delta P$) 反向差异度呈显著正相关关系。鉴于全年和雨季 ΔP 赋分值与 T 以及非雨季 ΔP 赋分值与气温增量 ΔT 呈显著相关, ΔRH 受其他因子的影响很小,因此可以推断,气温 T (全年和雨季) 及其增量 ΔT (非雨季) 可能是导致 P 与 RH 呈非一致性规律的关键影响因子。另外,与全年和非雨季时段相比,雨季时段 P 呈增大趋势的站点个数在减少(减幅为 25% ~ 30%)、增加幅度在降低;既然气温主导了全年(尤其是雨季)降雨量的变化趋势,这就意味着升温将加剧雨季的降雨和蒸散发过程而影响全年的降雨—蒸散发格局,且这一现象将覆盖越来越多的干旱区站点。

本文主要基于中国北方干旱区 20 个典型气象站点 1951—2018 年的气象资料,研究了 P 和 RH 在不同时段的变化趋势及其非一致性规律。研究结果显示,不同时段 P 在大多数站点呈增加趋势,而 RH 呈减小趋势;且与全年和非雨季相比,雨季时段 P 和 RH 的一致性更为明显。这些结果表明了未来全球变暖背景下气温的升高将增加降雨量和蒸发蒸腾量,可在一定程度上缓解农业缺水、促进生物系统的恢复。然而,干旱区 P 的时空分布不均匀(主要集中在雨季)以及 RH 减小导致的空气变干又将会加剧区域间干旱化的发展趋势,甚至打破全球生态系统的平衡。因此,未来需结合全国甚至全球更多干旱区站点,研究不同气象因子综合影响下 P 和 RH 的非一致性及其对评价气候干湿变化状况的影响,研究结

果对于应对未来气候变化背景下的农业用水危机以及指导农业生态系统平衡具有重要的现实意义。

5 结 论

(1) 不同时段 P 在所选的大部分气象站点呈增加趋势,与全年和非雨季时段相比,雨季时段 P 呈增加趋势的站点个数分别减少了 25% 和 30%。

(2) 所选各气象站点在不同时段的 RH 几乎均呈减小趋势,且呈减小趋势的站点个数在不同时段基本相同。

(3) 与雨季时段相比,全年和非雨季时段 P 和 RH 的非一致性的站点个数增加了 25%。

(4) 气温 T (全年和雨季) 及其增量 ΔT (非雨季) 是干旱区站点 P 与 RH 呈非一致性的关键因子。

(5) 气候变暖背景下,气温的升高将加剧干旱区的降雨—蒸散发过程,且这一现象在雨季表现的更为突出。

参考文献:

- [1] 廉陆鹞. 中国降水特征变化及其对气候变暖的响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [2] 张文君, 谭桂容. 全球变暖形势下中国陆表水分的变化[J]. 大气科学学报, 2012, 35(5): 550—563.
- [3] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1908—1919.
- [4] 李 玥. 全球半干旱气候变化的观测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [5] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961—2015 年中国气候干湿状况的时空分异[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(11): 1339—1348.
- [6] 郭 梦, 张奇莹, 钱 会, 等. 基于 SPEI 干旱指数的陕西省干旱时空分布特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 127—132+138.
- [7] 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.
- [8] 徐 栋. 全球变暖背景下亚非干旱区降水变化及其与水汽输送的关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [9] 杨 佳, 郝桂珍, 张 婧, 等. 1960—2016 年冀西北地区降水时空变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 117—123+133.
- [10] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429—2439.
- [11] 陈 洁, 刘玉洁, 潘 韬, 等. 1961—2010 年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2440—2453.

- [12] 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.
- [13] 徐荣璐, 李宝富, 廉丽妹. 1960 - 2015 年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 233 - 239 + 246.
- [14] 裴玉芳, 张启发, 祁栋林, 等. 1961 - 2015 年海东市相对湿度时空变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2017(8): 224 - 226.
- [15] 卢爱刚, 熊友才. 全球气候变化背景下近五十年中国湿度区域变化趋势[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 141 - 143.
- [16] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42 - 47.
- [17] 李东, 杨兆萍, 时卉, 等. 乌鲁木齐市旅游气候与旅游气候舒适度分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 404 - 409.
- [18] 郑然, 李栋梁. 1971 - 2011 年青藏高原干旱气候区界线的年代际变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1106 - 1115.
- [19] 于延胜, 陈兴伟. R/S 和 Mann - Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 41 - 44.
- [20] 陈巧菊, 刘敏, 黄国庆, 等. 龙卷风参数趋势性和相关性特征分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 111 - 121.
- [21] 谢欣汝, 游庆龙, 林厚博. 近 10 年青藏高原中东部地表相对湿度减少成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 642 - 650.
- [22] 刘畅. 1961 - 2015 年中国陆地干湿变化特征及成因分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [23] 马悦, 周顺武, 丁锋, 等. 中国东部地区冬夏季相对湿度变化特征[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(4): 1 - 7.
- [24] 陈迪桃, 黄法融, 李倩, 等. 1966 - 2015 年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 20 - 30.
- [25] LIU Xiaomang, ZHANG Dan, LUO Yuzhou, et al. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(1): 307 - 316.
- [26] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1955 - 2012 年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 269 - 277.
- [27] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104 - 116.
- [28] MUCHEYE T, TEBKEW M, G/MARIAM Y, et al. Long-term dynamics of woodland vegetation with response of climate variability in the lowlands of north western part of Ethiopia[J]. Environment Development and Sustainability, 2021, 23(1): 123 - 132.
- [29] RUZMAIKIN A, AUMANN H H, MANNING E M. Relative humidity in the troposphere with AIRS[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(7): 2516 - 2533.
- [30] VINCENT L A, VAN WIJNGAARDEN W A, HOPKINSON R. Surface temperature and humidity trends in Canada for 1953 - 2005[J]. Journal of Climate, 2007, 20(20): 5100 - 5113.
- [31] WANG Julian, GAFFEN D J. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China[J]. Journal of Climate, 2001, 14(13): 2833 - 2845.
- [32] 曾波, 王钦. 我国南方地区 50 a 冬季降水和相对湿度特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 828 - 839.
- [33] 曹永强, 徐丹, 曹阳. 淮河流域地表干湿变化的时空分布特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1031 - 1043.
- [34] 贾恪, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙地王巴嘎嘎湖泊的演变与水文气象因子关联度分析[J]. 中国农村水利水电, 2014(12): 1 - 4 + 8.