

# 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

徐荣潞, 李宝富, 廉丽姝

(曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276826)

**摘要:**为了揭示中国干旱区湿度变化特征,基于 1960—2015 年西北干旱区 74 个气象站数据,利用趋势分析、Mann-Kendall 非参数检验法以及敏感性分析等方法,对相对湿度的时空变化趋势及其与气温、降水的定量关系进行了分析。结果表明:(1) 1960—2015 年,西北干旱区年均相对湿度呈不显著下降趋势,速率为  $-0.125\%/10\text{ a}$ 。(2) 除秋季相对湿度呈微弱增加趋势( $0.087\%/10\text{ a}$ ),其他季节都呈不显著降低趋势,且春季的下降速率最大( $-0.554\%/10\text{ a}$ )。(3) 空间上,北疆地区的年均相对湿度最大;其次是南疆,而河西走廊最小。但南疆相对湿度呈显著增加( $0.228\%/10\text{ a}$ ),而北疆与河西走廊呈不显著下降趋势。(4) 不同区域各季节相对湿度与降水均呈显著( $p < 0.05$ )正相关性,而相对湿度与气温主要呈显著( $p < 0.05$ )负相关关系。近几十年来,西北干旱区相对湿度呈微弱下降的态势,且具有一定的空间差异。在区域气候暖湿化背景下,若降水量增加 10%,可诱发相对湿度增加 1.22%;若气温升高 10%,可诱发相对湿度减少 0.96%。

**关键词:**相对湿度; 区域差异; 西北干旱区

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0233-07

## Quantitative Relationship Between the Spatiotemporal Change of Relative Humidity and Climatic Factors in the Arid Region of Northwest China from 1960 to 2015

XU Ronglu, LI Baofu, LIAN Lishu

(College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong 276826, China)

**Abstract:** To reveal the characteristics of humidity changes in arid regions of China, we used daily meteorological data from 74 weather stations in the arid region of northwest China (ARNC) from 1960 to 2015, and employed trend analysis, Mann-Kendall nonparametric statistical test and sensitivity analysis to analyze the temporal and spatial variation of relative humidity (RH) and its quantitative relationships with temperature and precipitation. The results showed that: (1) the mean annual RH showed a non-significant downward trend at a rate of  $-0.125\%/decade$  from 1960 to 2015; (2) RH showed a slight increasing trend ( $0.087\%/decade$ ) in autumn, a non-significant decreasing trend in winter and summer, and a large decreasing trend in spring ( $-0.554\%/decade$ ); (3) the average annual RH was largest in northern Xinjiang, second largest in southern Xinjiang, and smallest in the Hexi Corridor; however, RH increased significantly in southern Xinjiang ( $0.228\%/decade$ ,  $p < 0.05$ ), while RH showed a non-significant downward trend in northern Xinjiang and Hexi Corridor; (4) RH and precipitation in different regions of different seasons showed the significant positive correlation ( $p < 0.05$ ), while RH and temperature mainly showed the significant negative correlation ( $p < 0.05$ ). In recent decades, RH in the arid region of northwest China had declined slightly, and there were certain spatial differences. Under the background of regional climate warming and humidification, if the precipitation increases by 10%, RH will increase by 1.22%; if the temperature increases by 10%, RH will reduce by 0.96%.

**Keywords:** relative humidity; regional difference; arid region of northwest China

收稿日期:2019-12-23

修回日期:2020-01-19

资助项目:国家自然科学基金“干旱区山区特殊气候变化对出山口径流的影响——以和田河为例”(41501211)

第一作者:徐荣潞(1994—),女,山西大同人,硕士研究生,研究方向为气候变化及其影响。E-mail: xrl17861013121@163.com

通信作者:李宝富(1983—),男,山东临沂人,博士,副教授,主要从事气候变化和水文水资源研究。E-mail: lenny006@163.com

空气相对湿度是指在相同温度下实际水汽压和饱和水汽压的比值,用以表征大气中水汽的饱和程度<sup>[1]</sup>。相对湿度是调节地表水分和能量平衡的重要因素,能够反映出气温、降水等气候要素的综合影响<sup>[2]</sup>。同时,相对湿度的变化与当地的大气能见度、自然生态环境以及人类生产活动都息息相关。因此,研究典型区域相对湿度的时空变化特征,有利于加深对区域气候变化的认识,对区域可持续发展和生态环境评价等方面具有重要的理论指导意义。

近年来,国内外一些学者开展了有关空气相对湿度的变化趋势以及时空差异等方面的研究工作,并取得了一定成果<sup>[3]</sup>。国外研究表明,不同区域的相对湿度存在明显的时空差异性<sup>[4]</sup>;全球范围内相对湿度的最高值分布在赤道地区,最低值主要处于南北纬 30°附近的亚热带干燥地区。Akinbode 等<sup>[5]</sup>分析表明 1980—2001 年尼日利亚相对湿度呈显著下降趋势;Vincent 等<sup>[6]</sup>发现加拿大西部和南部地区显著变暖,而相对湿度表现为下降趋势。此外,Song 等<sup>[7]</sup>指出 1961—2010 年我国东部绝大多数地区相对湿度呈显著下降趋势。卢爱刚<sup>[8]</sup>研究发现中国相对湿度在秦岭—淮河一线以北减小态势变化明显,而秦淮以南无明显变化。在影响因素方面,Vicente 等<sup>[9]</sup>发现西班牙地区的降水和气温是影响相对湿度变化的主要因素。Wang 等<sup>[10]</sup>指出中国 1961—1990 年相对湿度的季节变化在夏季最大,冬季最小,主要受到东亚季风的影响。诸多学者对天山南北坡<sup>[11]</sup>、武威<sup>[12]</sup>、青藏高原<sup>[13]</sup>、西南地区<sup>[14]</sup>等地方的相对湿度变化状况进行了分析,但对于西北干旱区整体相对湿度时空变化特征的研究尚待加强。近 50 a 来,作为对全球变化响应的敏感区<sup>[15]</sup>,我国西北干旱区气温持续升高,蒸发和降水明显增加<sup>[16]</sup>。在此背景下,西北干旱区相对湿度变化趋势及其与气温、降水的定量关系还需进一步研究和认识。

因此,本文基于多种统计方法,对西北干旱区 1960—2015 年相对湿度时空变化特征进行分析,重点探讨相对湿度与气候要素的关系。同时,利用敏感性分析定量揭示气温和降水对相对湿度的影响程度,并且预估未来不同气候变化情景下,相对湿度的变化状况。其研究目的在于理解全球气候变化下的生态脆弱区干旱化问题,加强对西北干旱区气候变化的认识,为协调区域社会经济与生态环境发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

中国西北干旱区地理位置介于 73°—106°E,

35°—50°N,该区主要有天山、昆仑山、阿尔金山、阿尔泰山及祁连山等高大山脉,包围着塔里木盆地、准格尔盆地和河西走廊,总面积为 235.2 km<sup>2</sup>,约占全国国土面积的 24.5%<sup>[17]</sup>。该区深居内陆,常年受大陆气团控制,属于典型的温带大陆性气候,干燥少雨,自然条件恶劣,植被稀疏,生态系统极为脆弱。

### 1.2 数据来源

本文所用的数据均来源于中国气象数据中心,选取研究区内时间序列完整、连续性较好的 74 个气象站的 1960—2015 年逐月气象数据,并采用算术平均值<sup>[18]</sup>对个别站点的缺失时段数据进行插补,其分布范围基本可以覆盖整个西北干旱地区(图 1)。对于季节的划分方法是:冬季取上年 12 月—本年 2 月,春季取 3—5 月,夏季取 6—8 月,秋季为 9—11 月。

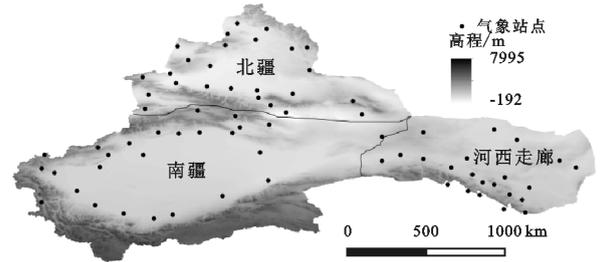


图 1 西北干旱区 74 个气象站点分布

### 1.3 研究方法

运用 Mann-Kendall 非参数统计检验法,对西北干旱区的相对湿度序列进行趋势显著性分析。该方法利用线性拟合得出趋势方程,定量分析序列在某一时间段内的趋势特征,从而反映该序列是上升趋势还是下降趋势<sup>[19]</sup>,常用于气候时间序列的变化趋势的显著性检验<sup>[20]</sup>。对于时间序列  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,构造一秩序列<sup>[17]</sup>:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

这里,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (4)$$

式中: $x_i$  和  $x_j$  为连续的数据值; $n$  为数据集合的长度;对于样本大于 10 的集合,检验统计量  $S$  接近于正态分布。 $\text{var}(S)$  为统计量  $S$  的方差; $t$  为“结”的宽度; $\sum$  为所有“结”的总合。

为确定某一季平均相对湿度变化对年均相对湿度变化所做的贡献率,计算了季节贡献率<sup>[17]</sup>。公式如下:

$$I_s = \frac{|\overline{U_{S_1}} - \overline{U_{S_2}}|}{\sum |\overline{U_{S_1}} - \overline{U_{S_2}}|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $I_s$  为相对湿度变化的季节贡献率; $\overline{U_{S_1}}$ 、 $\overline{U_{S_2}}$  分别为每个季节在 1960—1987 年、1988—2015 年的平均相对湿度。通过研究发现,相对湿度变化的突变点在 1987 年。因此将研究时段分为 1960—1987 年、1988—2015 年,从而分析各季节相对湿度的贡献率。

为定量探讨相对湿度和气温、降水量等气象要素的关联性,采用统计拟合方法建立多元线性回归方程,并进行相关关系统计显著性检验。

采用 Zheng 等<sup>[21]</sup> 提出的敏感性计算方法,分析西北干旱区相对湿度对气候要素变化的敏感性。该方法能定量、简便地评价气候变化对相对湿度的影响程度。计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{\overline{X}}{Q} \cdot \frac{\sum (X_i - \overline{X})(Q_i - \overline{Q})}{\sum (X_i - \overline{X})^2} \quad (6)$$

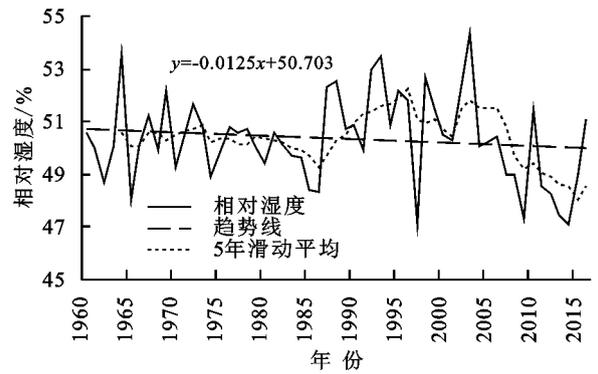
式中: $\epsilon$  为敏感性系数; $Q_i$  为相对湿度值; $X_i$  为气象要素值; $\overline{Q}$  和  $\overline{X}$  分别为相对湿度和气象要素的多年平均值。敏感性系数越大,表明某气象要素对相对湿度变化的影响程度越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 时间变化特征

**2.1.1 年际变化** 1960—2015 年,中国西北干旱区的年均相对湿度为 50.33%,线性变化速率为  $-0.125\%/10$  a,经 Mann-Kendall 检验,下降趋势未通过  $p < 0.05$  的显著性检验。在不同时间段,相对湿度变化存在明显差异。20 世纪 60 年代(50.43%)—80 年代(49.46%)中期,年均相对湿度变化不大(图 2),波动中略有下降。1986—1996 年,相对湿度呈明显增加趋势( $1.76\%/10$  a),平均相对湿度达 51.47%;而 90 年代末以来,年相对湿度的波动幅度较大,且呈明显下降趋势( $-2.041\%/10$  a)。其中,1997 年、2009 年、2014 年的相对湿度均低于 47.5%;2003 年出现了 50 多年来的相对湿度最大值,为 54.38%。

**2.1.2 季节变化** 冬季平均相对湿度最大,为 59.47%,其次是秋季(52.98%),而夏季和春季的相对湿度较小,分别为 46.44%,42.30%。通过计算季节贡献率可知,夏季平均相对湿度变化对年变化的贡献率最大,为 35.16%;其次是秋季和春季,分别为 26.17%,21.09%;而冬季的贡献率仅为 17.58%。可见夏季变化是引起相对湿度年变化的重要原因。



**图 2 1960—2015 年西北干旱区相对湿度年均变化趋势** 从变化速率来看(图 3),春季相对湿度降低趋势最明显,线性速率为  $-0.554\%/10$  a,但未通过显著性检验( $p < 0.05$ )。20 世纪 60 年代相对湿度波动较大,且呈增加趋势,在 1964 年相对湿度出现了 50 多年的最大值,为 50.20%。70 年代呈平稳下降趋势。80 年代—90 年代中期,相对湿度主要呈增加趋势。而进入 21 世纪后,春季相对湿度开始明显减少,2014 年出现了最小值,为 35.68%。

夏季,相对湿度的变化波动较大,速率为  $-0.014\%/10$  a,未达到显著性水平( $p < 0.05$ )。60—80 年代中期,夏季相对湿度变化波动不明显;1985—1995 年呈增加趋势,其中在 1993 年出现最大值,为 52.22%。1995—2010 年,相对湿度明显下降,并在 2009 年出现了最小值(40.85%);而 2010 年以后,相对湿度又呈增加态势。

秋季,相对湿度变幅较小,呈微弱增加态势( $0.087\%/10$  a)。60—70 年代中期为下降趋势。1975—2000 年,相对湿度在波动变化中略增。在进入 21 世纪后,秋季相对湿度主要呈减少趋势,并在 2012 年出现最小值(47.20%)。

冬季,相对湿度平均值明显高于其他季节,总体上在波动中略有减少( $-0.03\%/10$  a)。80 年代中期以后相对湿度变化波动较大,1997 年出现最小值(53.04%)。2005 年以后,呈明显下降趋势。

### 2.2 空间变化特征

**2.2.1 年变化** 1960—2015 年,西北干旱区有 60.8% 的气象站点相对湿度减少,且 22.9% 的站点达到  $p < 0.05$  的显著性检验(图 4)。其中,北疆地区的多年平均相对湿度最大,为 56.33%;其次为南疆(47.87%),而河西走廊的平均相对湿度最小,为 45.95%。从空间上看,相对湿度呈现由东向西、由南向北逐渐增大的分布特点。

在变化速率方面,各区域相对湿度具有一定的差异。其中,南疆相对湿度整体呈显著( $p < 0.05$ )增加趋势,线性速率为  $0.228\%/10$  a,比如库车( $2.356\%/10$  a)增加趋势最为明显,通过了  $p < 0.001$  的极显著

性水平检验。北疆与河西走廊相对湿度都呈不显著下降趋势,线性速率分别为 $-0.238\%/10\text{ a}$ ,

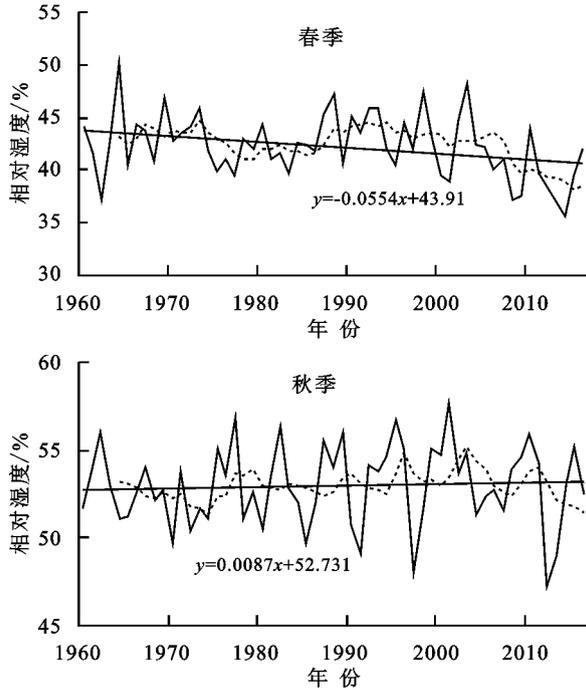


图3 1960—2015年西北干旱区相对湿度各季节变化趋势

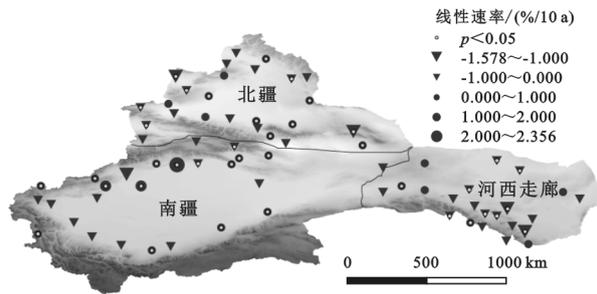


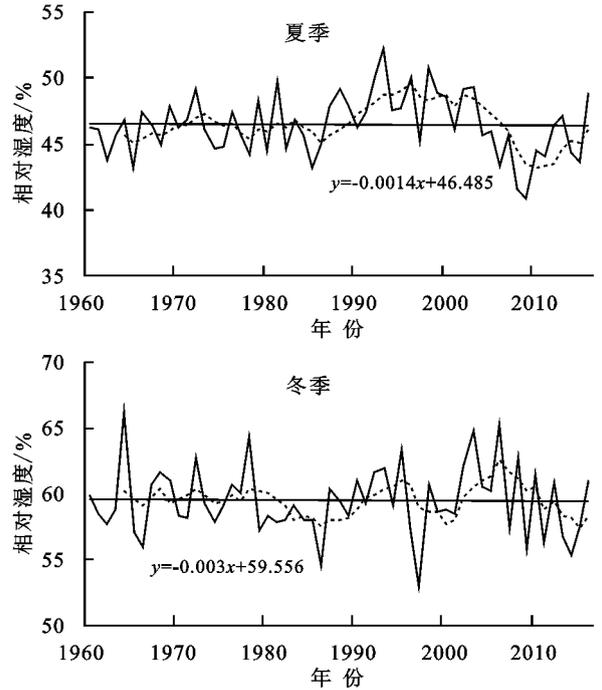
图4 1960—2015年西北干旱区相对湿度空间变化

2.2.2 季节变化 春季,西北干旱区有78.4%的气象站相对湿度减少,28.4%的站点达到 $p < 0.05$ 的显著性检验(图5);而仅有9.5%的站点呈显著( $p < 0.05$ )增加趋势。在空间上各区域相对湿度都呈降低趋势。其中,河西走廊的降低速率最明显,为 $-0.726\%/10\text{ a}$ ;其次是北疆地区和南疆地区,降低速率分别为 $-0.6\%/10\text{ a}$ , $-0.317\%/10\text{ a}$ 。另外,各区域平均相对湿度变化趋势均未达到显著性水平。

夏季,研究区有54.1%的气象站点相对湿度减少,12.2%的站点达 $p < 0.05$ 的显著性检验;而24.3%站点呈显著( $p < 0.05$ )增加趋势。其中,河西走廊的相对湿度主要呈减少趋势,速率为 $-0.339\%/10\text{ a}$ ;北疆地区为 $-0.056\%/10\text{ a}$ 。而南疆地区大部分呈现出显著( $p < 0.05$ )增加趋势,速率为 $0.341\%/10\text{ a}$ 。

秋季,研究区有48.6%气象站点相对湿度增加,且28.4%的站点达到 $p < 0.05$ 的显著性检验;而14.9%的站点呈显著( $p < 0.05$ )下降趋势。南疆地区的相对湿

$-0.349\%/10\text{ a}$ ,只有巴里坤( $-1.578\%/10\text{ a}$ )和阿拉善右旗( $-1.203\%/10\text{ a}$ )变化极显著( $p < 0.001$ )。



度呈显著( $p < 0.01$ )增加趋势,速率为 $0.523\%/10\text{ a}$ ;而北疆地区和河西走廊仍呈不显著降低趋势,速率分别是 $-0.087\%/10\text{ a}$ 和 $-0.146\%/10\text{ a}$ 。

冬季,研究区有54.1%的气象站点的相对湿度增加,20.3%的站点达到 $p < 0.05$ 的显著性检验;而仅有13.5%站点下降趋势显著( $p < 0.05$ )。在空间上,各区域变化状况与夏季和秋季相似,仍然南疆地区为不显著增加趋势( $0.318\%/10\text{ a}$ ),在北疆地区和河西走廊为不显著降低趋势,变化速率分别为 $-0.186\%/10\text{ a}$ , $-0.182\%/10\text{ a}$ 。

以上结果表明,北疆地区和河西走廊各季节相对湿度都呈不显著下降趋势,且春季的减少速率最大。而南疆除春季外,其他季节都呈增加态势,特别是夏、秋季节,通过了显著性水平检验( $p < 0.05$ )。

### 2.3 相对湿度变化与气候要素的定性关系

近50多年来,西北干旱区降水量与相对湿度呈正相关,而气温、风速与相对湿度呈负相关,线性关系如下:

$$y = 54.526 + 0.046x_1 - 0.911x_2 - 0.022x_3 \quad (7)$$

式中: $y$ 为相对湿度; $x_1$ 为降水量; $x_2$ 为气温; $x_3$ 为风速。

回归方程的线性拟合相关系数 $R = 0.837$ ,且通过了 $\alpha = 0.01$ 的F检验,表明回归效果显著。在对影响因子的回归系数进行t检验时发现,降水量、气温的回归系数通过了t检验,而风速未通过,这表明降水和气温是影响相对湿度变化的主要因素。

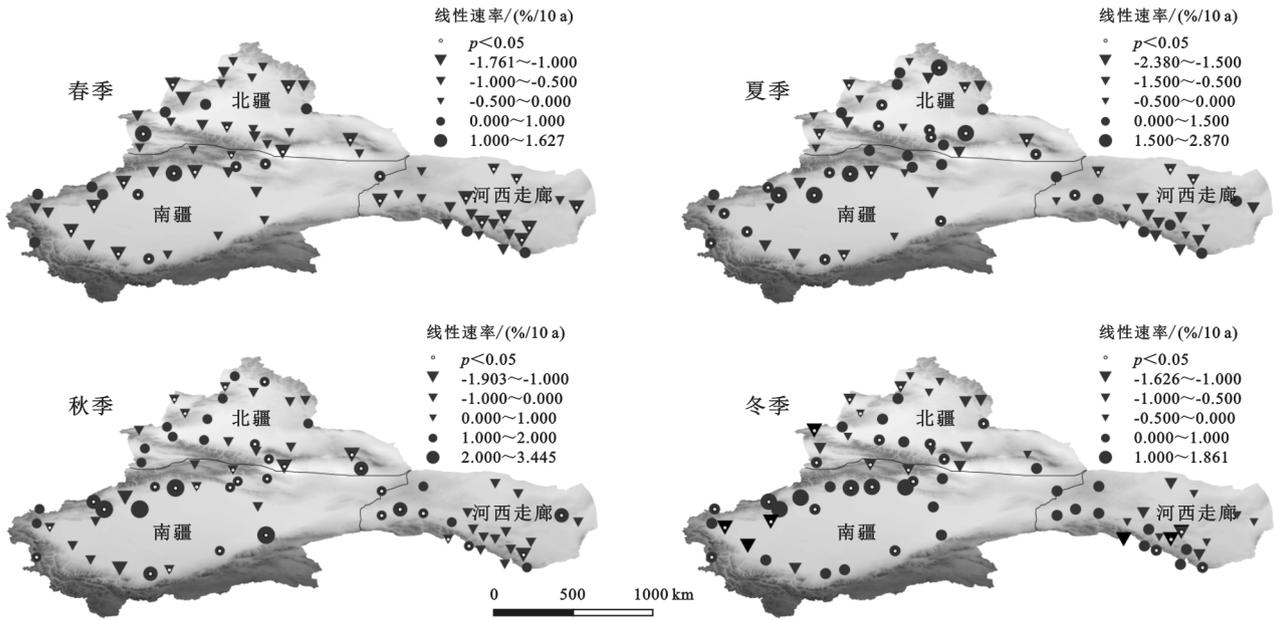


图 5 1960—2015 年各季节相对湿度空间变化

近 50 多年来,相对湿度经历了平缓期(1960—1986 年)、上升期(1987—1996 年)和下降期(1997—2015 年);而降水和气温经历了平缓期(1960—1986 年)和上升期(1987—2015 年)。在降水和气温的相互影响下,年均相

对湿度呈微弱下降趋势。值得注意的是,2000 年以来,由于西北干旱区的降水量增幅下降,且有将近 1/2 站点的降水量表现为减少态势,而气温持续升高,导致全区相对湿度显著降低(-2.771%/10 a)(图 6)。

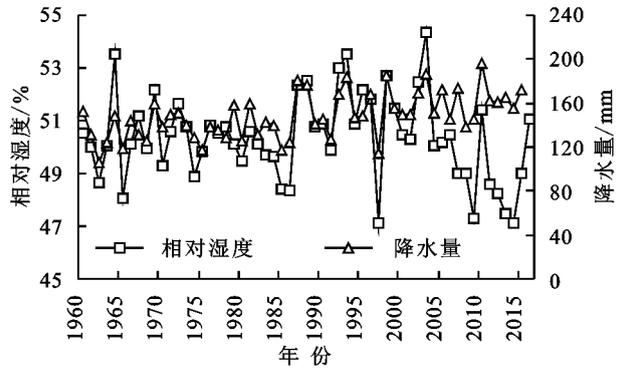
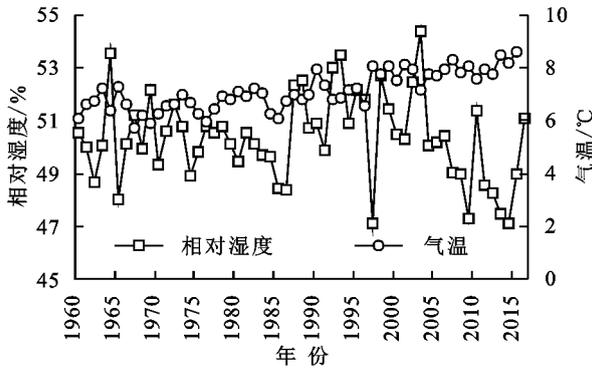


图 6 1960—2015 年相对湿度与气温、降水量的关系

在西北干旱区,受地形分割作用导致区域气候具有明显的差异性。1960—2015 年,北疆、南疆与河西走廊的降水变化速率分别为 9.143 mm/10 a, 6.28 mm/10 a, 4.31 mm/10 a, 均通过了  $p < 0.05$  的显著性检验;而气温变化速率分别为 0.366℃/10 a, 0.258℃/10 a, 0.345℃/10 a ( $p < 0.001$ ),表明 50 多年来,西北干旱区的降水和气温变化显著。

疆的冬季和河西走廊的秋季未通过显著性检验;而南疆的秋季,相对湿度与气温则呈不显著正相关关系。可见,相对湿度与降水的相关性高于气温。

### 2.4 相对湿度与气候要素的定量关系

从相关系数来看(表 1),除北疆地区的冬季相对湿度与降水的相关性通过了  $p < 0.05$  的显著性水平检验,其他地区各季相关系数都介于 0.7~0.85,且均达到  $p < 0.01$  的显著性水平,表明二者之间的相关性较高。同时,相对湿度与气温的相关系数存在明显的区域和季节差异。各区域的春、夏季以及南疆、河西走廊地区的冬季相关系数都通过了  $p < 0.01$  的显著性水平;北

通过计算得出,西北干旱区年相对湿度对降水量、气温的敏感系数分别为 0.122, -0.096,这表明若降水量增加 10%,可诱发相对湿度增加 1.22%;若气温升高 10%,可诱发相对湿度减少 0.96%;因此,在气温上升 10%(与多年平均值相比,增加 0.71℃)的情景下,降水增加的阈值为 7.87%(增加 11.67 mm),使得相对湿度恰好可以保持不变。另外,不同季节中各气温与降水对相对湿度的影响程度也不同。各季节相对湿度对降水量的敏感系数分别为 0.208, 0.229, 0.129, 0.042;而相对湿度对气温的敏感系数分别为 -0.312,

-0.6, 0.014, 0.074。这显示出在春、夏、冬季相对湿度对气温的敏感性均强于降水。特别是夏季, 气温和降水相对湿度变化的影响程度是最大的; 若降水量增加 10%, 可使相对湿度增加 2.29%; 若气温上升 10%, 可使相对湿度降低 6%。

表 1 西北干旱区各季节相对湿度与降水、气温的相关系数

区域	季节	相对湿度与降水	相对湿度与气温
北疆	春	0.731**	-0.625**
	夏	0.792**	-0.509**
	秋	0.722**	-0.311*
	东	0.310*	-0.133
南疆	春	0.728**	-0.433**
	夏	0.796**	-0.429**
	秋	0.709**	0.218
	东	0.738**	-0.407**
河西走廊	春	0.722**	-0.348**
	夏	0.717**	-0.525**
	秋	0.820**	-0.022
	东	0.567**	-0.465**

注: \* 表示通过  $p < 0.05$  的显著性水平检验; \*\* 表示通过  $p < 0.01$  的显著性水平检验。

目前, 我国西北干旱区处于气温升高、降水增加的“暖湿化”趋势。自 1987 年以来, 相对湿度增加了 0.18%。其中, 实际气温上升了 7.57%, 引起相对湿度减少率为 0.71%; 实际降水量增加率为 7.26%, 引起相对湿度增加了 0.88%。

同时, 基于相对湿度对气候要素的敏感性, 可以预估未来不同的气候变化情景下, 相对湿度的变化状况。如果气温分别升高 0.5, 1.0, 1.5, 2.0℃, 降水至少需要各增加 8.18, 16.36, 24.55, 32.72 mm, 相对湿度才能基本不变。同理, 如果降水保持稳定, 气温分别升高 0.5, 1.0, 1.5, 2.0℃, 将会导致相对湿度分别降低 0.34%, 0.67%, 1.01%, 1.35%。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

受全球气候变化的影响, 近几十年来西北地区呈暖湿化的趋势, 但变化幅度存在季节与区域的明显差异。气温和降水的显著变化, 必然引起空气湿度的响应和调整。因此, 本文研究了西北干旱区空气湿度的时空变化特征及其与气温、降水的定量关系。

研究显示, 西北干旱区相对湿度总体呈微弱下降态势。自 20 世纪 80 年代中期以来, 相对湿度变化幅度较大。特别是进入 21 世纪, 相对湿度显著减少。

Li<sup>[22]</sup>、Wang<sup>[23]</sup> 等认为西北干旱区气温和降水在 1987 年发生过“突变型”升高, 但 21 世纪以来增加趋势减弱。Yao 等<sup>[24]</sup> 利用多尺度干旱指数对干旱区进行评估, 发现自 1997 年后转为干燥趋势。可见, 气温、降水是影响相对湿度变化的重要因素。随着气温逐渐升高, 空气中可容纳的水汽含量增加。但在 2000 年之后, 降水量增幅下降, 导致空气中实际存在的水汽含量也逐渐减少, 最终造成 2000 年以来相对湿度明显减少的现象。另外, 在本文研究中, 冬季相对湿度最大, 主要是由于该时期气温较低, 饱和水汽压较小, 且多雨雪天气。而春季气温回升, 但降水稀少, 风速较大, 整体气候条件干燥, 相对湿度为全年最低。

通过研究发现, 北疆平均相对湿度较大, 而南疆与河西走廊相对湿度较小。但南疆的相对湿度呈显著增加趋势, 北疆和河西走廊呈不显著下降趋势。本研究和张雪芹等<sup>[25]</sup> 发现, 北疆地区升温幅度最大, 其次是河西走廊, 而南疆升温相对较慢。可见, 由于南疆气温的升高速率相对较低, 而降水增加速率高于河西走廊, 使得空气相对湿度呈微弱增加态势; 而北疆和河西走廊地区, 在气温显著上升、降水增加的共同作用下, 相对湿度呈微弱下降趋势。张彦龙等<sup>[26]</sup> 研究表示北疆地区湿度较高, 但南疆有局部湿润化的趋势。这与本文的研究结果相一致。另外, 各区域的相对湿度变化差异还可能与大气环流、局地自然条件(地形、潜在蒸散发等)和人类活动等因素有关<sup>[27]</sup>。

基于西北干旱区气候变化的客观事实, 以下几个现象值得关注: (1) 虽然西北干旱区冬季气温上升速率最快<sup>[28]</sup>, 但是冬季的相对湿度增加速率并不大; 而植被生长发育期的春、夏季相对湿度降低幅度较大, 可能会造成植被退化、土壤水分流失增加, 从而加剧沙漠化程度<sup>[29]</sup>。(2) 受复杂地形及其他气候因素的影响, 北疆降水增加速率明显高于南疆和河西走廊, 但是相对湿度却呈减少态势。(3) 近年来, 干旱区降水增加趋势有所降低, 而气温却持续升高<sup>[30]</sup>, 地表及大气水汽蒸发加强, 这些变化增加了生态干旱的风险<sup>[24]</sup>, 从而加剧了区域水资源短缺, 降低农业资源的有效利用<sup>[31]</sup>。以上事实一方面表明在全球气候变化的背景下, 西北干旱区的相对湿度具有进一步下降的趋势; 另一方面, 相对湿度的时空变化差异, 可能对干旱区生态系统稳定和农业长远发展产生潜在的不利影响。

### 3.2 结论

(1) 1960—2015 年, 西北干旱区平均相对湿度值为 50.34%, 整体呈不显著下降趋势, 速率为 -0.125%/10 a

的。其中在1960—1985年相对湿度呈微弱下降态势;而后经历了10年上升期,在1995年以后,相对湿度在波动中有较大幅度的降低。

(2) 西北干旱区相对湿度变化存在明显的季节差异。除秋季的相对湿度变化速率呈微弱上升,其他季节速率都呈不显著下降趋势,且春季的下降速率最大(-0.554%/10 a)。相对湿度季节变化对年变化的贡献率大小依次为:夏季>秋季>春季>冬季。

(3) 西北干旱区不同区域的相对湿度变化具有一定的空间差异。北疆和河西走廊各季节相对湿度都呈不显著下降趋势。而南疆除春季外,其他季节都呈增加态势,特别是夏、秋季节,通过了显著性水平检验( $p < 0.05$ )。

(4) 相对湿度变化与降水和气温的相关性也存在明显的时空差异。不同区域各季节相对湿度与降水均呈显著( $p < 0.05$ )正相关性,而北疆的冬季和南疆、河西走廊的秋季相对湿度与气温相关性不显著。

(5) 敏感性分析结果表明,若降水量增加10%,可诱发相对湿度增加1.22%;若气温升高10%,可诱发相对湿度减少0.96%。因此,在西北干旱区气候暖湿化背景下,若气温增加10%,降水增加的阈值为7.87%,相对湿度恰好可以保持不变。

#### 参考文献:

[1] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.

[2] Gaffen D J, Ross R J. Climatology and trends of US surface humidity and temperature [J]. *Journal of Climate*, 1999,12(3):811-828.

[3] Lu E, Takle E S. Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010,115(6):620-631.

[4] Alexander R, Hartmut H A, Evan M M. Relative humidity in the troposphere with AIRS[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014,71(7):2516-2533.

[5] Akinbode O M, Eludoyin A O, Fashae O A. Temperature and relative humidity distributions in a medium-size administrative town in southwest Nigeria[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008,87(1):95-105.

[6] 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.

[7] Song Y, Liu Y, Ding Y. A study of surface humidity

changes in china during the recent 50 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012,26(5):541-553.

[8] 卢爱刚.全球变暖对中国区域相对湿度变化的影响[J]. *生态环境学报*,2013,22(8):1378-1380.

[9] Vicente-Serrano S M, Azorin-Molina C, Sánchez-Lorenzo A, et al. Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms[J]. *Climate Dynamics*, 2014,42(9/10):2655-2674.

[10] Wang J X, 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.

[11] 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):562-572.

[12] 刘明春,杨晓玲,殷玉春,等.武威市相对湿度气候特征及预报[J]. *干旱区研究*,2012,29(4):654-659.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 丁一汇,王守荣.中国西北地区气候与生态环境概论[M].北京:气象出版社,2001.

[16] Peng D, Zhou T. Why was the arid and semiarid Northwest China getting wetter in the recent decades[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(17):9060-9075.

[17] Li B F, Chen Y N, Chen Z S, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010[J]. *Atmospheric Research*, 2016,167:275-284.

[18] 原立峰,张增信,刘星飞,等.鄱阳湖流域近49年降雨序列一致性检验与分析[J]. *安徽农业科学*,2013,41(2):732-735.

[19] 李奇虎,马庆勋.1960—2010年西北干旱区极端降水特征研究[J]. *地理科学*,2014,34(9):1134-1138.

[20] 田晓磊,李宝富,李学伟,等.1970—2012年华北平原大气可降水量时空变化及其影响因素[J]. *聊城大学学报:自然科学版*,2019,32(3):81-88.

[21] Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):641-648.

[22] Li B F, Chen Y N, Shi X, et al. Temperature and precipitation changes in different environments in the region of northwest China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013,112(3/4):589-595.

- able water resource management: A case study in Palakkad District of Humid Tropical Kerala, India[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1211-1219.
- [11] 姜亮亮, 包安明, 刘海隆, 等. 玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 143-149, 351.
- [12] 段晋芳, 郭青霞, 解鸿志. 基于 GIS 的山西永定河植被生态需水管理系统的研建[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 254-258.
- [13] 王丽霞, 任朝霞, 任志远, 等. 基于生态功能分区的陕北延河流域旱地系统生态需水测评[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 156-161.
- [14] 王丽霞, 钟旭珍, 刘招, 等. 关中—天水经济区生态环境功能分区研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(7): 843-848.
- [15] 夏楚瑜. 基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [16] 李玉山. 黄土高原土壤水分循环与农田生产力[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2015.
- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [18] 杨培岭. 土壤与水资源学基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [19] 杨志峰, 崔保山. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 薛天翼, 白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 240-246.
- [22] 张娟. 基于 RS-GIS 的关中—天水区多尺度植被—土壤复合系统的生态需水测评[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [23] 任金铜, 莫世江, 陈群利, 等. 草海湿地区域土地利用/覆被变化与预测研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 385-392.
- [24] 艾丽娅, 王少军, 张志. 1977—2017 年锡林郭勒盟中部草原植被覆盖时空演变及预测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 1-9.
- [25] Li X W, Dong Y Y, Zhao L, et al. Study on NDVI changes in Weihe Watershed based on CA-Markov model[J]. Geological Journal, 2018, 53(S2): 435-441.
- [26] 钟旭珍. 基于 GIS 的关中—天水经济区水土资源多情景配置方案模拟[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [27] 易霞. 强震山区景观格局脆弱性时空动态与驱动力定量研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

(上接第 239 页)

- [23] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the region, northwest of China, during 1960—2010 [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [24] Yao J Q, Zhao Y, Chen Y N, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 444-452.
- [25] 张雪芹, 孙杨, 毛炜峰, 等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 592-599.
- [26] 张彦龙, 刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 658-671.
- [27] Li Z, Chen Y, Yang J, et al. Potential evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the arid region of Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1025-1031.
- [28] Chen Y N, Deng H J, Li B F, et al. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China[J]. Quaternary International, 2014, 336: 35-43.
- [29] 刘加珍, 李卫红, 陈永金, 等. 孔雀河下游衰退河岸林的沙漠化分析[J]. 聊城大学学报: 自然科学版, 2018(1): 65-71, 103.
- [30] Qin Y H, Li B F, Chen Z S, et al. Spatio-temporal variations of nonlinear trends of precipitation over an arid region of northwest China according to the extreme-pointsymmetric mode decomposition method[J]. International Journal of Climatology, 2017, 38(5): 2239-2249.
- [31] Zhang J Y, Chen Y N, Li Z. Assessment of efficiency and potentiality of agricultural resources in Central Asia[J]. Journal Geographical Sciences, 2018, 28(9): 1329-1340.