

doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2018.061

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

## 1966—2015年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素

陈迪桃<sup>1,2</sup>, 黄法融<sup>1,3</sup>, 李倩<sup>1,2</sup>, 李兰海<sup>1,3,4,5</sup>

- 1 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
- 2 中国科学院大学, 北京 100049;
- 3 中国科学院伊犁河流域生态系统研究站, 乌鲁木齐 830011;
- 4 中国科学院新疆资源环境科学大型仪器区域中心, 乌鲁木齐 830011;
- 5 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011

**摘要:** 利用天山地区近50年(1966—2015年)逐日气象资料, 采用Mann-Kendall趋势检验法研究了天山南北坡相对湿度(RH)的时空变化特征, 分析了天山南北坡RH对平均气温、降水量、平均风速、参考蒸散量、日照时数的敏感性, 并探讨了引起RH变化的主导因素。结果表明: (1) 整个天山地区RH变化有略微上升的趋势但不显著, 北坡RH总体呈下降趋势, 南坡RH总体呈上升趋势。(2) RH空间分布呈自北向南递减趋势, 南北坡全年及春季以下降趋势为主, 而夏、秋、冬三季均以上升趋势为主, 且南坡变化趋势的显著性高于北坡。(3) RH对风速、气温、日照时数及参考蒸散量均为负敏感, 对降水量为正敏感。北坡RH对各气象因子的敏感程度依次为日照时数>参考蒸散量>风速>气温>降水量, 南坡敏感程度依次为日照时数>风速>参考蒸散量>气温>降水量。空间分布上, 仅降水量敏感系数高值区位于北坡伊犁河谷, 其余要素敏感系数高值区均位于南坡。(4) 参考蒸散量是影响天山地区RH变化的主导因子, 整个天山地区参考蒸散发贡献率较高, 日照时数贡献率高值区集中于北坡伊犁河谷, 风速、降水量、气温贡献率高值区均集中于南坡克孜勒苏地区。

**关键词:** 天山南北坡; 相对湿度(RH); 差异; Mann-Kendall趋势检验法; 敏感性分析

### 引言

水汽是大气中最重要的成分之一, 它不仅仅是形成降水的必要条件, 也是重要的自然温室气体<sup>[1-2]</sup>和评估气候变化的重要因子。地面相对湿度(RH)是地表实际水汽压与饱和水汽压比值的百分数, 用来表示大气中水汽距离饱和的程度<sup>[3]</sup>, 是表征空气湿度的重要物理量, 与露点温度、比湿、绝对湿度等其他表征湿度的指标相比, 作为直接观测量的RH更能反映出气温、降水等要素的综合影响<sup>[4-5]</sup>

以及区域干湿变化状况。

随着人类社会的发展, 对全球气候变化及其诱因的相关研究越来越多, 目前的研究大多针对气温、降水以及极端天气, 而对于水汽的研究相对较少, 原因在于大多数人将水汽的变化归因于其自然变化。然而, 气候变化会改变全球和区域水循环, 并对气候的干湿状况产生重要影响, 从而对植被<sup>[6]</sup>、大气<sup>[7]</sup>以及工农业生产等产生影响, 对区域内社会、经济以及自然生态环境产生深刻的影响, 因此, 近年来气候的干湿变化受到学术界及有关部门的广泛

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-07-14

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA2004030202); NSFC-新疆联合基金(U1703241); 科技基础资源调查专项(2017FY100501\_5)

作者简介: 陈迪桃, 男, 硕士研究生, chenditao16@mailsucas.ac.cn; 李兰海(通信作者), 男, 研究员, lilh@ms.xjba.ac.cn

关注<sup>[8]</sup>。目前,对 RH 在全球气候变化背景下的长期变化趋势的研究较少,有研究表明中国区域 RH 季节变化由于受到东亚季风的影响,在夏季达到最大,冬季最小<sup>[9]</sup>。王遵娅等<sup>[10]</sup>与 Song 等<sup>[11]</sup>认为近半个世纪以来,中国华北、东北及西北东部地区 RH 表现出明显的下降趋势,而青藏高原与西北西部等地区则存在明显的上升趋势。此外,国外学者分别分析了美国<sup>[12]</sup>、加拿大<sup>[13]</sup>及尼日利亚<sup>[14]</sup>等地大气湿度的长期变化趋势,结果表明,虽然有少部分地区受到地形等自然条件的影响,RH 上升微弱,但总体来看,均呈现显著的上升趋势。新疆有着广阔的面积和复杂的自然条件,历来是地理研究中的重点区域。以往研究表明,新疆 RH 总体经历了“增加—减少—增加—减少”的变化,呈波动下降趋势,气候倾向率约为  $-0.45\%/10a$ <sup>[15]</sup>,其中北疆呈减少趋势,南疆呈增加趋势<sup>[16]</sup>,并且指出 RH 与阿拉尔地区的沙尘天气<sup>[17]</sup>、塔里木河下游怪柳的生长等有着密切的关系<sup>[18]</sup>。但是,大部分研究仅限于简单描述 RH 的变化趋势及与其他自然要素的相关关系,并没有进一步探讨影响 RH 变化的主导因子及其效应。

天山是新疆乃至整个西北干旱区气候和生态环境的重要天然屏障,该地区气候变化对中国西北干旱区的生态环境产生广泛而深远的影响<sup>[19-20]</sup>。因此,本文利用新疆天山南北坡 26 个站点的逐日气象数据,通过 Mann-Kendall 趋势检验法,探究天山南北坡近 50 年来 RH 时空变化特征,并运用敏感性分析法定量分析南北坡各气象因子对 RH 的敏感系数以及引起 RH 变化的主导因子,将有助于深入了解天山地区 RH 的变化规律,对该地区生态系统保护和抗旱减灾等具有指导意义。

## 1 研究区概况

本文选取天山南北坡为研究区域。天山是世界上距离海洋最远的山脉,更是南北疆气候的分水岭,被称为干旱区的“湿岛”<sup>[21]</sup>。天山北坡属于半湿

润半干旱气候,山区年平均气温约为  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $450\sim 800\text{ mm}$ ,年蒸发潜力为  $1000\sim 1400\text{ mm}$ ,远高于降水量<sup>[22]</sup>,由于西风环流带来的大西洋水汽的进入,降水量明显高于南坡。南坡及其以南为典型的干旱区,全年降水稀少,夏半年降水量占全年总降水量的 80% 以上。并且,南坡基带向南延伸至与塔里木盆地相连,气温受沙漠影响大,且阳坡太阳辐射强,气温略高于北坡。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据

本文根据空间位置及资料代表性,选取天山地区数据序列较为完整的 26 个气象站点,其中北坡 10 个,南坡 16 个(图 1)。气象资料来源于中国气象数据共享网<sup>①</sup> 1966—2015 年逐日气象数据集,包括平均气温、相对湿度、平均风速、日照时数、降水量等。由于所选站点实测盘蒸发数据存在大量缺测,因此用 Penman-Monteith 公式计算参考蒸散替代,二者相关系数高达 0.98 左右。采用气象学标准进行季节划分,即春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月至次年 2 月。

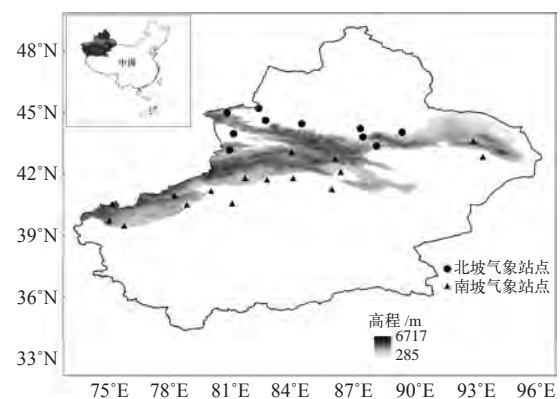


图 1 天山南北坡气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the north and south slopes of the Tianshan Mountains

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 法<sup>[23-24]</sup>是一种非参数统计检验

① <http://data.cma.cn/>.

方法, 不要求变量具有正态分布特征, 因此被广泛应用于气象水文领域<sup>[25-26]</sup>, 用以定量反映时间序列上的变化趋势。通过计算标准正态检验统计量  $Z_s$  判断时间序列线性变化趋势及其显著性水平。若  $Z_s$  值为正, 表示序列呈上升趋势; 若  $Z_s$  值为负, 表示序列呈下降趋势。当  $|Z_s| > 1.96$  时, 表示序列趋势通过 0.05 显著性水平检验; 当  $|Z_s| > 2.576$  时, 表示序列趋势通过 0.01 显著性水平检验。

### 2.2.2 相对贡献率

由于各气象因子与 RH 的量纲、范围表现不一, 先对其进行标准化, 然后运用多元线性回归法分析各气象因子对 RH 变化的相对贡献率<sup>[27-28]</sup>。方法如下:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k, \quad (1)$$

$$\eta_i = \frac{|b_i|}{|b_1| + |b_2| + |b_3| + \dots + |b_k|} \quad (2)$$

式中,  $\hat{y}$  为因变量标准化值;  $x_i$ 、 $b_i$  分别为自变量标准化值及对应的回归系数;  $\eta_i$  为  $x_i$  变化对  $\hat{y}$  变化的相对贡献率; 其中  $i=1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为自变量个数。

### 2.2.3 敏感性分析

本文采用 Zheng 等<sup>[29]</sup> 提出的方法分析 1966—2015 年新疆地区 RH 对气温、降水、参考蒸散量、风速、日照时数的敏感系数。计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\bar{F}}{\overline{RH}} \cdot \frac{\sum(F_i - \bar{F}) \cdot (RH_i - \overline{RH})}{\sum(F_i - \bar{F})^2} \quad (3)$$

式中,  $F_i$  为某一气象要素序列的第  $i$  个值;  $RH_i$  为 RH 序列的第  $i$  个值;  $\bar{F}$  和  $\overline{RH}$  分别为气象要素与 RH 的多年平均值;  $\varepsilon$  为该气象要素的敏感性系数,  $\varepsilon$  为正表明 RH 随着该气象要素的增加而增加, 为负则表明 RH 随着气象要素的增加而减小, 敏感系数的绝对值越大, 敏感性越强。

## 3 结果分析

### 3.1 RH 的时空变化特征

#### 3.1.1 RH 空间分布特征

从图 2 中可以看出, 近 50 年来, 天山地区

多年平均 RH 区域差异明显, 空间分布基本呈现自北向南递减的趋势。天山北坡 RH 变化范围大致为 57% ~ 69%, 天山南坡变化范围大致为 43% ~ 55%。不同季节平均 RH 的空间分布与年平均 RH 空间分布基本一致, 呈现北高南低的格局, 其中伊犁河谷为整个天山地区的最高值区。

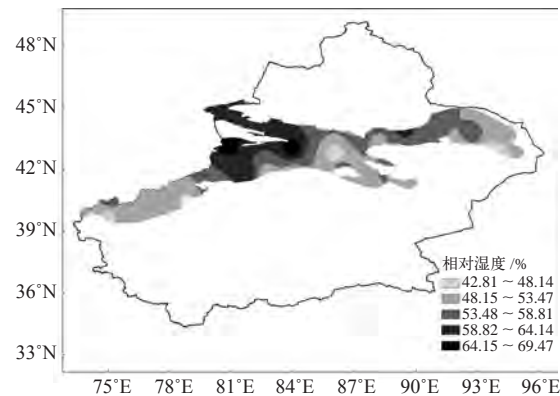


图 2 天山地区年平均相对湿度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual relative humidity in the north and south slopes of the Tianshan Mountains

天山南北坡 RH 具有明显的季节变化特征, 北坡多年月平均 RH 从 8 月开始呈递增趋势, 至 12 月达到最大值 77%; 12 月至次年 5 月逐渐减小, 5 月达到最小值 46%; 5 月至 8 月呈波动变化态势。南坡多年月平均 RH 从 4 月起逐渐增大, 至 12 月达到最大值 67%; 12 月至次年 4 月逐渐减小, 4 月达到最小值 39%。从季节上看, 整个天山地区 RH 值均在冬季最高, 春、夏季节最低。

#### 3.1.2 RH 年际变化特征

天山北坡 (图 3a) 多年平均 RH 为 60%, 最小值为 55%, 出现在 2012 年; 最大值为 64%, 出现在 1987 年。根据 5 年滑动平均结果, 研究时段内 RH 存在 4 个明显的波峰和 3 个明显的波谷; 此外, 相对于 1966—1985 年, 1985—2002 年 RH 略有上升, 2002 年后再次下降。

南坡 (图 3b) 多年平均 RH 为 52%, 最小值为 48%, 出现在 2009 年; 最大值为 57%, 出现在 2003 年。由 5 年滑动平均的结果来看, 该区域相对湿度存在 3 个明显的峰值及 2 个明显的谷值。其中, 1966—1985 年间呈先上升后下降的趋势, 1985—2003 年呈现双峰值波动变化, 总体略高于

1985 年前平均水平, 2003 年达到峰值后再次下降。

就整个天山地区而言(图 3c), RH 总体变化趋势并不明显, 但滑动平均的结果表明, 1966—1985 年与 2006—2015 年间 RH 明显小于 1985—2006 年。根据  $F$  检验结果, 无论南坡、北坡还是整个天山地区, RH 的线性变化趋势均未通过显著性检验, 表明 RH 无明显线性变化趋势。

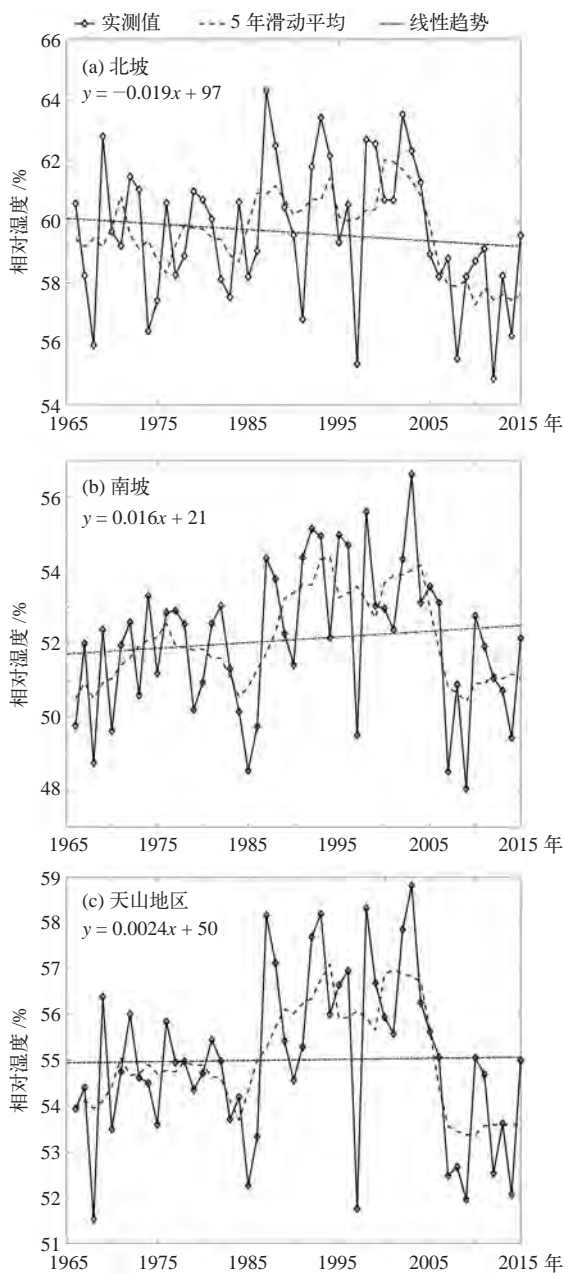


图 3 1966—2015 年天山南北坡相对湿度年际变化趋势  
Fig. 3 Trends of annual relative humidity in the north and south slopes of the Tianshan Mountains during 1966–2015. (a) North slope, (b) South slope, (c) the Tianshan Mountains

### 3.1.3 RH 变化趋势的空间分布

由 Mann-Kendall 趋势检验的结果(图 4)可知, 北坡春季 RH 以下降趋势为主, 仅阿拉山口呈不显著上升趋势; 夏、秋、冬三季均以上升趋势为主, 三季呈显著上升(含极显著)的站点共 4 个, 呈显著下降共 3 个; 全年 RH 下降趋势占主导, 各有 2 个站点呈极显著下降( $\alpha=0.01$ )与显著上升( $\alpha=0.05$ )。此外, 昭苏、精和、乌苏 3 个站点年尺度和季节尺度 RH 变化均不显著。

南坡春季 RH 以下降趋势为主, 仅库车站呈显著上升; 夏、秋、冬三季 RH 均以上升趋势为主, 3 个季节 RH 呈显著上升的站点共有 15 个, 呈显著下降的站点有 9 个; 全年 RH 以显著上升趋势占主导, 7 个站点表现为显著上升, 3 个站点表现为显著下降。此外, 乌恰与库尔勒年尺度和季节尺度 RH 变化均不显著。结果表明, 南坡呈显著变化趋势的站点明显多于北坡, 这可能是受南坡复杂自然条件的影响。

## 3.2 RH 的影响因素分析

### 3.2.1 RH 对气象因子的敏感性分析

由表 1 可知, 整个天山 RH 变化对风速、气温、日照时数和参考蒸散量的敏感系数均为负值, 说明在其他气象因子不变的条件下, 上述气象因子的升高将抑制 RH 增加, 而 RH 对降水量的敏感系数为正值, 表明 RH 会随着降水量的增加而升高。

通过对比敏感系数的绝对值可知, 北坡 RH 变化对各气象因子的敏感程度由高到低依次为日照时数、参考蒸散量、平均风速、平均气温及降水量。不同季节 RH 变化对气象因子的敏感性略有差异。春、秋、冬三季 RH 变化均对日照时数最为敏感, 夏季对平均气温最为敏感。

就天山南坡而言, RH 变化对日照时数的敏感程度最高, 其次是风速、参考蒸散量与气温, 对降水量的敏感程度最低。对于不同季节而言, 春、夏季 RH 对参考蒸散量最为敏感, 秋、冬季则对日照时数最为敏感。

如图 5 所示, RH 对参考蒸散量和日照时数的敏感系数为负值, 而对降水量的敏感系数为正值,

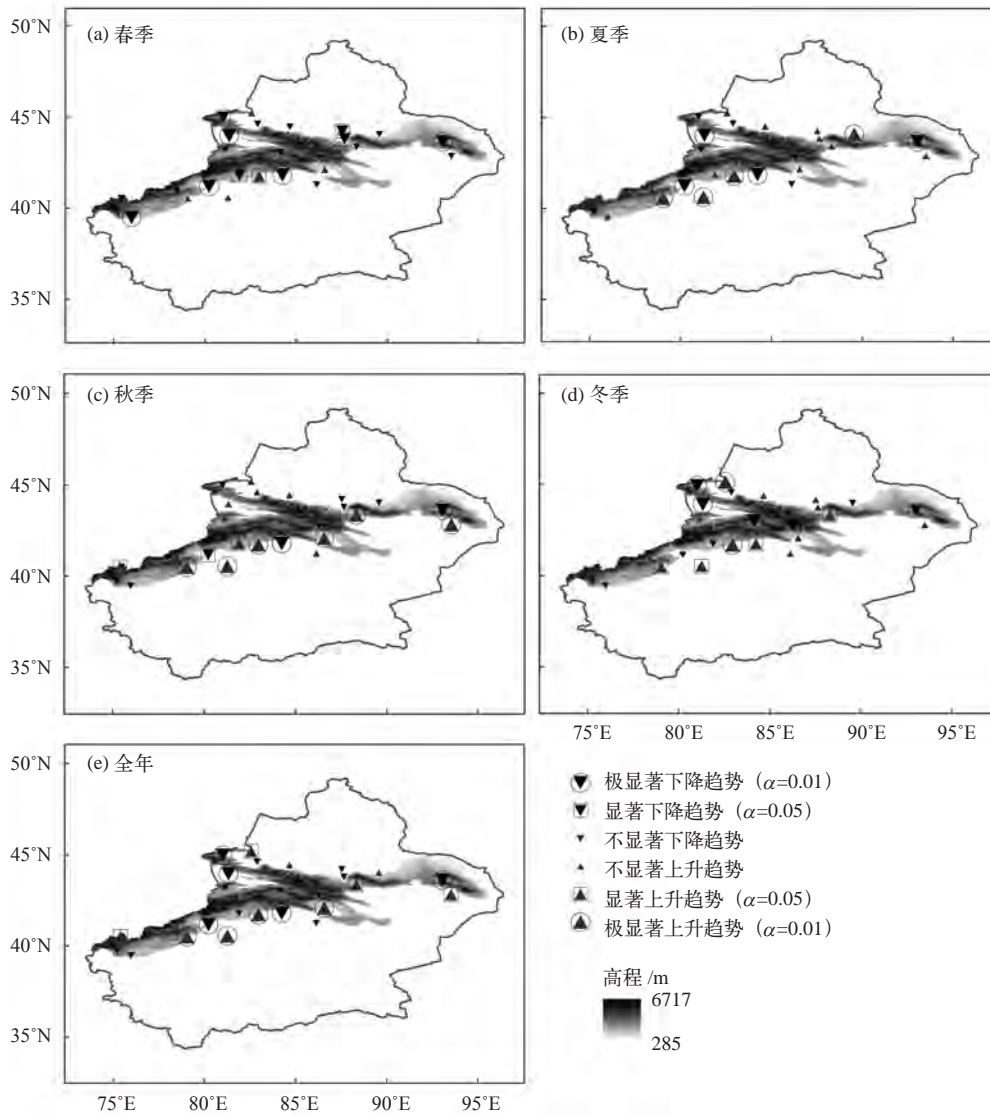


图 4 1966—2015 年天山南北坡四季和年平均相对湿度变化趋势的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of variation trend of relative humidity in the Tianshan Mountains during 1966–2015.

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual scale

表 1 天山南北坡不同季节气象因子敏感系数

Table 1 Seasonal sensitivity coefficient of meteorological variables in the Tianshan Mountains

气象因子	春季	夏季	秋季	冬季	全年
平均风速	-0.04/-0.17	0.12/-0.18	-0.02/-0.18	-0.01/-0.15	-0.19/-0.32
平均气温	-0.20/-0.15	-0.94/-0.69	-0.15/-0.08	-0.05/0.13	-0.10/-0.09
日照时数	-0.52/-0.24	-0.41/-0.25	-0.42/-0.30	-0.10/-0.19	-0.47/-0.39
降水量	0.04/0.03	0.08/0.06	0.03/0.01	0.01/0.01	0.02/0.01
参考蒸散发	-0.46/-0.32	-0.88/-0.90	-0.29/-0.17	-0.04/0.19	-0.29/-0.24

注：表中数字分别对应为“北坡/南坡”的敏感系数。

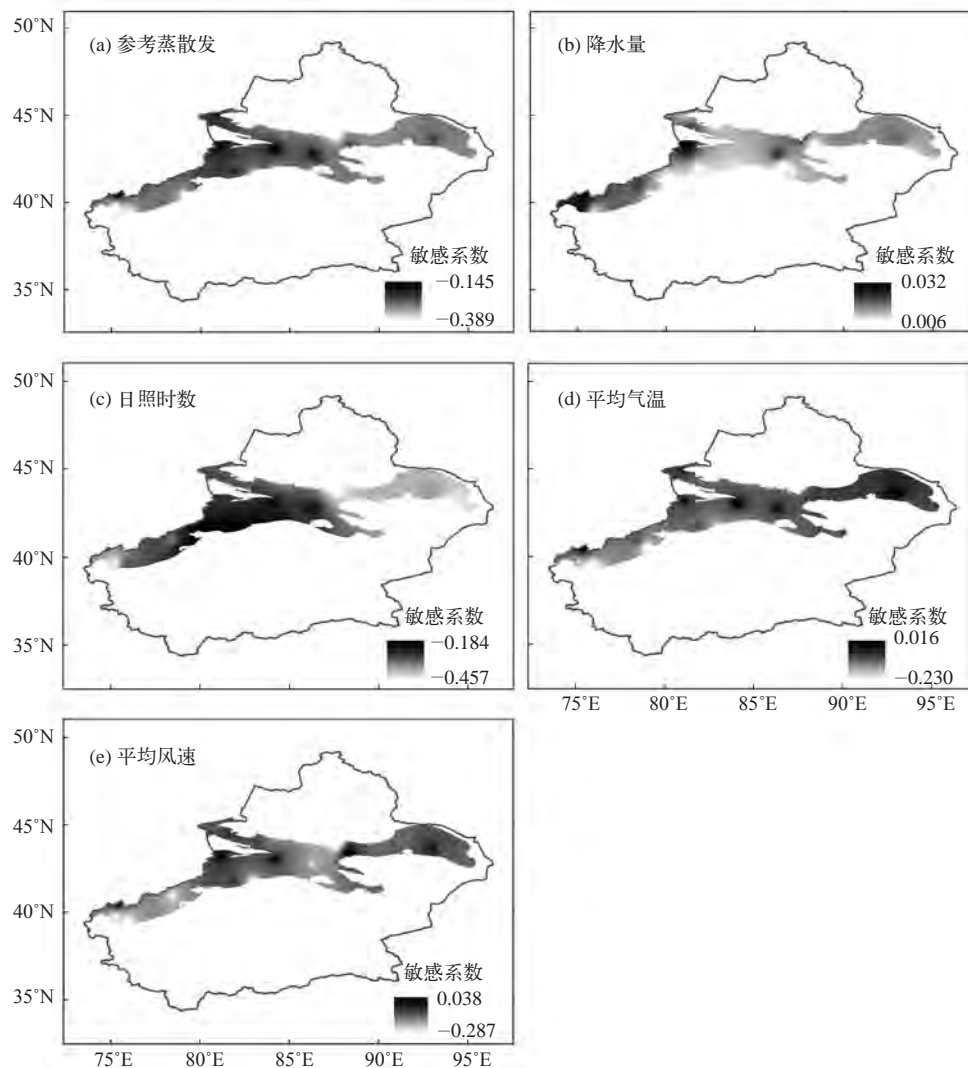


图 5 天山南北坡各气象因子敏感系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of sensitivity coefficients for (a) reference evapotranspiration, (b) precipitation, (c) sunshine duration, (d) average temperature and (e) average wind speed in the Tianshan Mountains

对气温与风速的敏感系数则有正有负。日照时数敏感系数的绝对值高值区位于天山东部, 参考蒸散量与平均气温敏感系数绝对值高值区都位于天山西南, 降水敏感系数高值区位于北坡的伊犁河谷, 平均风速敏感系数绝对值高值区位于巴音郭楞和克孜勒苏地区。空间分布上, 北坡 RH 变化对降水的敏感程度大于南坡, 而南坡 RH 变化对平均气温、参考蒸散量、平均风速以及日照时数的敏感程度均高于北坡, 说明南坡自然条件更为复杂, 影响湿度的因素多而杂。

### 3.2.2 RH 变化的主导因子

自然条件下, 气象因子与 RH 之间既相互联系

又相互制约, 相对贡献率可定量分析各气象因子对 RH 的影响, RH 变化的主导因子即相对贡献率最大的气象因子。分析表明, 北坡参考蒸散量为 RH 变化的主导因子, 贡献率达 46.30%, 与敏感性分析结果相似; 其次是日照时数 (21.60%)、平均气温 (16.05%)、降水量 (15.48%)、平均风速 (0.58%), 可见受复杂地形及其他因素的影响, 风速的变化对北坡 RH 的作用并不大。对于南坡, 贡献率最大的仍为参考蒸散量, 达 32.16%; 其次为平均风速 (28.09%)、降水量 (22.20%)、日照时数 (12.13%)、平均气温 (5.42%)。相对于北坡而言, 南坡地形更为开阔平坦, 风速的增加会导致水汽大范围扩散,

并且由于水汽输送量明显少于北坡,所以降水量对南坡 RH 变化的贡献率明显较大。

天山地区四季参考蒸散量对 RH 变化的贡献率均为最大(表 2),这表明在天山,全年参考蒸散量均为 RH 变化的主导因子。除参考蒸散发外,北坡春、夏、冬三季气温对 RH 的贡献率最大,秋季则是日照时数;南坡春、夏两季气温对 RH 贡献率最大,秋季最大的为平均风速,冬季则为降水量。此外,降水对南坡四季 RH 变化的贡献率均明显高于北坡,是影响南坡 RH 变化的重要因子。

空间分布上,除天山西南外,整个区域内参考蒸散量对 RH 变化的贡献率均较大;在天山西南侧,平均气温、平均风速与降水量贡献率较高,表明该地受这 3 种要素的影响略高于参考蒸散量。如图 6 所示,日照时数作为主导因子影响 RH 变化的主要区域集中在北坡伊犁河谷地区;平均风速作为主导因子影响 RH 变化的区域集中于南坡,尤其是克孜勒苏地区;降水量贡献率高值区集中在伊犁河谷与克孜勒苏地区;气温贡献率高值区分布于巴音布鲁克草原与克孜勒苏一带。

#### 4 结论与讨论

利用天山南北坡 26 个气象站 1966—2015 年的逐日气象资料,对该地区 RH 的时空变化特征进行了分析,并探讨了引起 RH 变化的主要影响因素。主要结论如下。

(1)近 50 年来天山地区年 RH 变化趋势不显著。天山北坡多年平均 RH 为 60%,呈下降趋势;南坡

多年平均 RH 为 52%,呈上升趋势。

(2)天山地区 RH 空间分布整体呈现自北向南递减趋势,即北坡 RH 高于南坡;南北坡全年及春季 RH 均以下降趋势为主,夏、秋、冬三季则以上升趋势为主,由于南坡自然条件复杂,北坡 RH 变化趋势的显著性明显低于南坡。

(3)天山地区 RH 对风速、气温、日照时数和参考蒸散量均为负敏感,对降水量为正敏感。北坡年 RH 对各气象因子的敏感程度依次为日照时数 > 参考蒸散量 > 风速 > 气温 > 降水量;春、秋、冬三季 RH 变化对日照时数最为敏感,夏季对气温最为敏感。南坡 RH 对各气象因子的敏感程度依次为日照时数 > 风速 > 参考蒸散量 > 气温 > 降水量;春、夏季 RH 对参考蒸散量敏感程度最高,秋、冬季则对日照时数敏感程度最高。空间分布上,仅降水量敏感系数高值区位于北坡伊犁河谷,其余要素敏感系数高值区均位于南坡。

(4)参考蒸散量是影响天山地区年尺度和季节尺度 RH 变化的主导因子。除参考蒸散发外,北坡春、夏、冬三季气温对 RH 的贡献率最大,秋季则是日照时数;南坡春、夏两季气温对 RH 贡献率最大,秋季为风速,冬季为降水量。空间分布上,日照时数贡献率高值区集中于北坡伊犁河谷地区,风速、降水量、气温贡献率高值区均集中于南坡克孜勒苏地区。

相比于气温或降水等单一要素,RH 对气候变化更加敏感,更能准确客观地描述区域内气候变化特征<sup>[4-5]</sup>,研究 RH 可为应对气候变化提供参考。但由于新疆复杂的地形地貌及自然气候条件,对新

表 2 天山南北坡不同季节 RH 变化气象因子相对贡献率

Table 2 Seasonal relative contributions by meteorological variables to relative humidity change in the Tianshan Mountains

气象因子	春季	夏季	秋季	冬季	全年
平均风速	6.84/2.65	13.22/2.90	3.28/19.90	0.71/0.24	0.58/28.09
平均气温	23.11/31.98	14.55/10.69	0.58/12.11	15.76/7.14	16.05/5.42
日照时数	2.78/3.57	7.62/8.10	16.80/14.29	4.74/3.70	21.60/12.13
降水量	4.46/10.38	5.97/6.71	10.40/13.68	4.20/8.48	15.48/22.20
参考蒸散发	62.81/51.42	58.64/71.61	68.94/40.02	74.58/80.44	46.30/32.16

注:表中数字分别对应为“北坡/南坡”的相对贡献率。

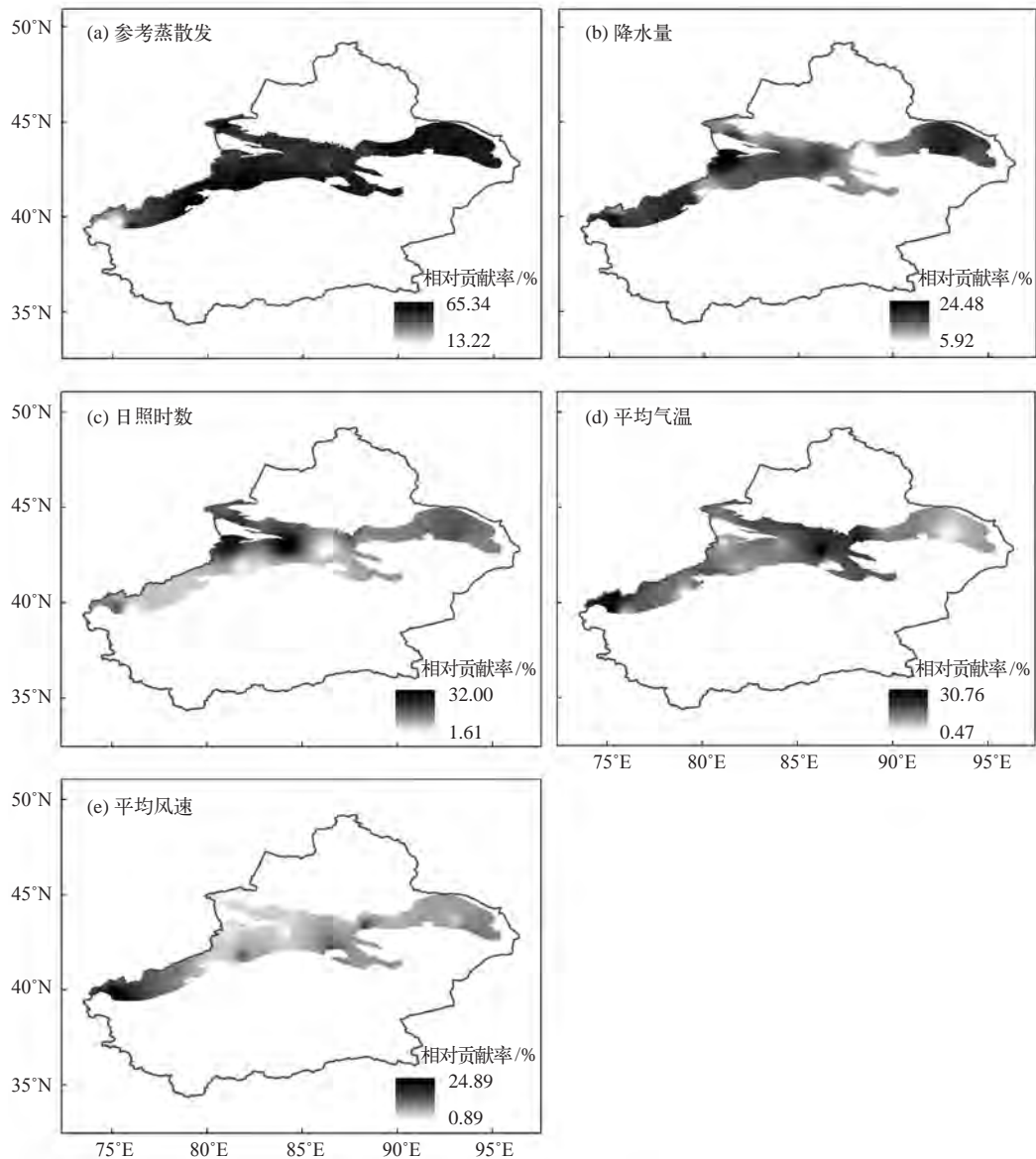


图 6 天山南北坡各气象因子相对贡献率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of relative contributions for (a) reference evapotranspiration, (b) precipitation, (c) sunshine duration, (d) average temperature, and (e) average wind speed in the Tianshan Mountains

疆境内水汽的相关研究严重缺乏。姜大膀等<sup>[30]</sup>、普宗朝等<sup>[31]</sup>、Wang 等<sup>[32]</sup>以及张彦龙等<sup>[33]</sup>利用干燥度指数(AI)、帕尔默干旱指数(PDSI)以及标准化降水蒸散指数(SPEI)等分析新疆境内大气干湿变化程度,结果均表明北疆比南疆更湿润,新疆有局部湿润化的趋势,与本文研究结果一致。由于天山地处干旱区,气候条件复杂,蒸发量远大于降水量,导致区域内潜在蒸散发成为了影响RH变化的主要因子,且为负效应。

邢楠等<sup>[34]</sup>研究表明,新疆干旱年1970、1985、1997年等37°N以南为上升气流,以北为下降气流,而湿润年1969、1987、2002年等环流方向相反。从图3可以看出,1987年为天山地区明显的干、湿期分界点。赵兵科等<sup>[35]</sup>研究表明,新疆由干期到湿期,对流层中低层极涡与蒙古高压脊明显增强,高层乌拉尔山高压脊显著增强;与此同时,增强的西南风带来了阿拉伯海的水汽,加上西风急流同步增强,并在强垂直上升气流的辅助



下,促进了降水的形成,增加了空气湿度。1982、1987、1998年等均发生了强厄尔尼诺现象<sup>[36]</sup>,结合图3,这些年份也是RH高值年,表明厄尔尼诺现象对天山地区RH有明显的增长作用。此外,西风环流、南亚高压及西太平洋副热带高压等大气环流的变化对气温<sup>[37-38]</sup>、降水<sup>[39-41]</sup>及水汽<sup>[39]</sup>等要素的变化具有重要作用,而上述要素对RH变化有着重要的影响,在多种环流的综合影响下,包含天山在内的整个西北干旱半干旱区均呈现湿润化趋势<sup>[42-43]</sup>。而且,区域下垫面性质的差异与人类活动等因素亦会影响RH的变化,但这些因素目前尚无法定量分析,因此文中所做的影响因素分析仍然存在一定的不确定性,将在以后的工作中进行更深入的研究。■

#### 参考文献

- [1] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (21): 5686-5699
- [2] Dessler A E, Zhang Z, Yang P. Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (20): 293-310
- [3] 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
- [4] 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 (D6): 620-631
- [5] Gaffen D J, Ross R J. Climatology and trends of US surface humidity and temperature [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12 (3): 811-828
- [6] Bauer H, Ache P, Lautner S, *et al.* The stomatal response to reduced relative humidity requires guard cell-autonomous ABA synthesis [J]. *Current Biology*, 2013, 23 (1): 53-57
- [7] Liu X, Cheng Y, Zhang Y, *et al.* Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (7): 1525-1536
- [8] 秦大河,陈宜瑜,李学勇. 中国气候与环境演变: 上卷[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [9] Wang J X L, 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
- [10] 王遵娅,丁一汇,何金海,等. 近50年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 2004 (2): 228-236
- [11] 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
- [12] Surratt G, Aronowicz J, Shine W, *et al.* Change in aqueous tear evaporation with change in relative humidity [J]. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 2004, 45 (13): 92
- [13] 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
- [14] Eludoyin O M. Air temperature and relative humidity areal distribution over Nigeria [J]. *Ife Research Publications in Geography*, 2016, 10 (1): 134-145
- [15] Han S, Tang Q, Xu D, *et al.* Observed near-surface atmospheric moisture content changes affected by irrigation development in Xinjiang, Northwest China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130 (1-2): 511-521
- [16] 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
- [17] 牛建龙,王家强,彭杰,等. 新疆阿拉尔地区近31年沙尘天气变化特征及影响因素 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30 (6): 102-107
- [18] 付爱红,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河下游怪柳茎水势变化与影响因子研究 [J]. *干旱区地理*, 2007 (1): 108-114
- [19] 普宗朝,张山清,李景林,等. 近36年新疆天山山区气候暖湿变化及其特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2008 (3): 409-415
- [20] 普宗朝,张山清. 气候变化对新疆天山山区自然植被净第一性生产力的影响 [J]. *草业科学*, 2009, 26 (2): 11-18
- [21] 张明军,李瑞雪,贾文雄,等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化 [J]. *地理学报*, 2009, 64 (7): 798-806
- [22] 李艳忠,罗格平,周德成,等. 天山北坡高山林线分布的生态地理特征 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32 (1): 122-131
- [23] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945 (13): 245-259
- [24] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. London: Griffin, 1975
- [25] 刘昌明,郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析 [J]. *自然资源学报*, 2003 (2): 129-135
- [26] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. *Journal of hydrology*, 2008, 349 (3): 350-363
- [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] 张嘉琪,任志远. 1977—2010年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势 [J]. *资源科学*, 2014, 36 (10): 2103-2112
- [29] Zheng H, Zhang L, Zhu 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
- [30] 姜大膀,苏明峰,魏荣庆,等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 [J]. *大气科学*, 2009, 33 (1): 90-98
- [31] 普宗朝,张山清,王胜兰,等. 近48年新疆干湿气候时空变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31 (6): 1563-1572
- [32] Wang H, Pan Y, Chen Y N. Comparison of three drought indices and their evolutionary characteristics in the arid region of northwestern China [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2017, 18 (3): 132-139

- [33] 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
- [34] 邢楠, 周海, 尚可政, 等. 青藏高原上空经向环流与新疆干旱的关系 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24 (12): 121-127
- [35] 赵兵科, 蔡承侠, 杨莲梅, 等. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征 [J]. 冰川冻土, 2006 (3): 434-442
- [36] 袁中友. 厄尔尼诺和拉尼娜事件与广东省干旱关系探讨 [D]. 广东: 华南师范大学, 2004
- [37] 袁薇, 邹立尧, 孙建奇. 1961—2005 年新疆地区夏季气温的时空变化特征及其与大气环流的关系 [J]. 冰川冻土, 2009, 31 (5): 801-807
- [38] 元慧慧, 滕军, 李杰, 等. 南疆夏季高温干旱时空变化特征及环流异常形势分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24 (12): 73-79
- [39] Zhao Y, Wang M Z, Huang A N, *et al.* Relationships between the West Asian subtropical westerly jet and summer precipitation in northern Xinjiang [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 116 (3-4): 403-411
- [40] Li B, Chen Y, Chen Z, *et al.* Why does precipitation in Northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010? [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 275-284
- [41] Wei W, Zhang R, Wen M, *et al.* Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over Central Asia and North China: roles of the Indian Monsoon and the South Asian High [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30 (2): 537-552
- [42] 李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性 [J]. 冰川冻土, 2008 (1): 28-34
- [43] 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

## Spatial variation of humidity and its influencing factors in the north and south slopes of the Tianshan Mountains, China during 1966–2015

CHEN Di-Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Fa-Rong<sup>1,3</sup>, LI Qian<sup>1,2</sup>, LI Lan-Hai<sup>1,3,4,5</sup>

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Ili Station for Watershed Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4 Xinjiang Regional Center of Resources and Environmental Science Instrument, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 5 Research Center for Ecology and Environment in Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

**Abstract:** Daily meteorological data during 1966–2015 were used to analyze the spatio-temporal distribution characteristics of relative humidity (RH) in the north and south slopes of the Tianshan Mountains by using Mann-Kendall trend test. In addition, sensitivity coefficient and relative contribution were calculated to assess the impact of temperature, precipitation, reference evapotranspiration, wind speed and sunshine duration on RH. The results revealed that RH in the north slope exhibited fluctuating downward trend, but in the south slope it showed the opposite trend. Furthermore, the RH showed a rising gradient from south to north slope. As for seasonal RH, an upward trend was found in summer, autumn and winter, but a downward trend was observed in spring in the entire Tianshan Mountains. Sensitivity analysis indicated that RH was negatively related to temperature, reference evapotranspiration, wind speed and sunshine duration, but positively related to precipitation. Moreover, RH was the most sensitive to sunshine duration, reference evapotranspiration and wind speed, but precipitation was most insensitive, whether in north or south slope. Spatially, the high value area of sensitivity coefficient of precipitation was located in the Ili Valley, while others were located in the south slope. Contribution analysis suggested that the impact of reference evapotranspiration on RH was much larger than other factors. The high contribution area of sunshine duration was distributed in the Ili Valley (north slope), but that of wind speed, precipitation and temperature in Kizilsu (south slope).

**Keywords:** North and south slopes of the Tianshan Mountains; Relative humidity (RH); Differences; Mann-Kendall trend test; Sensitivity analysis