

# 干旱区近地表水汽特征及其对凝结水发生的响应

马 波<sup>1,2</sup>, 闫新房<sup>1,2</sup>, 李王成<sup>1,2</sup>, 张 欣<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. 干旱地区现代农业水资源高效利用教育部工程中心, 银川 750021)

**摘 要:** 为探明干旱地区近地表水汽特征及凝结水发生过程水汽动态, 选取沙漠边缘 (TD)、干旱区 (CANX) 和半干旱区 (SANX) 3 种地理条件作为研究对象, 采用流体静力学积分法计算了近地表水汽通量和水汽含量, 用叶片湿度传感器测算了地上 5 cm 处凝结水量, 分析了水汽时空特征、凝结水发生过程和无凝结水昼夜水汽动态。结果表明: 观测时段 TD、CANX 和 SANX 年均凝结水量分别为 13.35、22.68 和 32.80 mm, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。3 个测站水汽通量、水汽含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), SANX 水汽通量、水汽含量峰值在 7 月, TD 和 CANX 在 8 月, TD、CANX 和 SANX 最大月平均水汽通量分别为 21.2、19.4 和 13.9 kg/(m·s), 最大月平均水汽含量分别为 11.35、11.23 和 13.69 mm。水汽传输具有特定的风向, TD 为  $0^\circ \sim 60^\circ$  和  $150^\circ \sim 210^\circ$ 、CANX 为  $180^\circ \sim 240^\circ$ 、SANX 为  $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $120^\circ \sim 240^\circ$  和  $300^\circ \sim 359^\circ$ 。凝结水发生时, 水汽通量、水汽含量呈下降趋势, 凝结水量与水汽含量呈负相关 ( $P < 0.05$ ); 凝结水消散阶段, 水汽通量、水汽含量呈增加趋势。无凝结水发生昼夜, 水汽通量先降低后增加, 水汽含量呈增加趋势。研究结果对于揭示不同地理条件近地表水汽特征和用近地表水汽动态推断凝结水发生过程具有参考价值。

**关键词:** 干旱区; 水汽特征; 凝结水; 积分法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202508118

中图分类号: P426

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0167-10

马波, 闫新房, 李王成, 等. 干旱区近地表水汽特征及其对凝结水发生的响应[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 167-176. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202508118 <http://www.tcsae.org>

MA Bo, YAN Xinfang, LI Wangcheng, et al. Near-surface water vapor dynamics and its response to condensation events in arid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 167-176. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202508118 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

凝结水作为一种隐匿性降水是干旱地区生态及农业系统的重要水资源<sup>[1]</sup>, 为植物及小型动物提供了必要的生存水源<sup>[2]</sup>。在沙漠地区, 凝结水不仅能够提高植物种子萌芽率, 还有利于促进沙丘稳定<sup>[3]</sup>。水汽是大气中以气态形式存在的水分, 在大气中仅占 0.1%~0.3%<sup>[4]</sup>, 但在干旱和极度干旱地区, 水汽是凝结水形成的重要水分来源, 尤其近地表水汽直接影响凝结水的形成<sup>[5-6]</sup>, 然而, 不同地理条件近地表水汽特征及其对凝结水发生的响应机制需要进一步明确。

影响和控制水汽的主要因子包括地理纬度、海陆分布、地形、环流等<sup>[7]</sup>。全球范围水汽分布和传输具有显著的地域特征, 如流入北美大陆的水汽主要分为两部分, 一是来自墨西哥湾的强劲南流, 另一是来自太平洋相对分散的西流, 中心约在北纬  $50^\circ$ <sup>[8]</sup>。中国水汽含量最大值在南岭以南、北部湾附近, 次大值是两湖盆地和四川盆地, 最小值出现在青藏高原、塔里木盆地和柴达木盆地<sup>[7]</sup>。2 至 7 月呈增加趋势, 8 月至次年 1 月呈下降趋

势<sup>[7, 9]</sup>。中国西北地区水汽分为青藏高原以南、以北和西北东部约  $100^\circ \text{E}$  附近 3 个特征区, 夏季水汽含量占年均量的 46.6%。东部及天山山脉、塔里木盆地东部一带水汽含量较高, 而中部较低, 不足 10 mm<sup>[10-11]</sup>, 6—8 月是水汽净输入季节, 9—10 月是水汽净输出季节<sup>[12]</sup>。局部地区水汽特征也有所差异, 如天山山区及周边地区水汽含量有 3 个高值区, 而中天山和东天山是水汽的低值中心<sup>[8, 13]</sup>。沙漠水汽时空分布较为复杂, 塔克拉玛干沙漠腹地是水汽的低值中心, 北部、西部边缘的绿洲地带较高, 沙漠周边夏季水汽含量平均为 19.22~23.62 mm, 冬季平均为 4.03~4.86 mm, 周边及沙漠腹地 7 月水汽最大, 1 月最小<sup>[14]</sup>。

水汽动态受到内、外大气水循环的影响, 如黑河源区不同水体的内循环特征非常明显, 夏季降水主要来源于西风输送, 冬季降水除受西风控制外还受极地气团的影响<sup>[15]</sup>。祁连山大气水汽受西风带、偏南季风和东亚季风的共同影响<sup>[16]</sup>。黄土高原东部水汽输送路径分为西方、北方和南方路径<sup>[17]</sup>。巴丹吉林沙漠水汽传输具有明显的风向特征, 水汽来源主要为西风气团, 春、夏季受部分极地气团、东南季风的影响<sup>[18]</sup>。凝结水发生受风向影响, 本质在于水汽传输方向对凝结水的影响, 以色列内盖夫高地塞德-博克尔位于地中海东部, 凝结水持续时间的增加顺序为西、北、南、东<sup>[19]</sup>。

对大尺度、影响降水的水汽研究已较为系统, 而对近地表水汽时空分布特征、凝结水产生过程水汽动态、无凝结水产生夜晚水汽特征还需更加深入系统的研究。

收稿日期: 2025-08-14 修订日期: 2026-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52169010); 宁夏自然科学基金项目 (2022AAC02018); 宁夏重点研发计划项目 (2023BEG02054); 宁夏高等学校一流学科建设 (水利工程学科) 项目 (NXYLXK2021A03)

作者简介: 马波, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为旱区节水灌溉理论与技术。Email: slxboma-34@163.com

本研究目的在于探究西北干旱地区 3 种地理条件近地表水汽通量和水汽含量传输特征,明确凝结水发生过程和未有凝结水发生夜晚水汽通量和水汽含量的动态,揭示水汽动态与凝结水形成的响应关系。

## 1 研究区概况及数据获取

### 1.1 研究区

于宁夏、内蒙和甘肃三省区交界区域选取腾格里沙漠东南缘(TD, 37°32'N、105°04'E)、宁夏中部干旱带(CANX, 37°34'N、105°10'E)和宁夏中南部半干旱区(SANX, 36°33'N、106°09'E) 3 个区域进行研究。TD

测站永久沙丘和半固定沙丘区年降水量不足 120 mm, 主风向为西北风, 最大风速可达 19 m/s。土壤含水率 0.5%~3.0%, 半固定沙丘植被覆盖度为 5%~20%, 而移动沙丘植被覆盖度不足 1%。CANX 属典型的干旱区气候, 年平均相对湿度为 50%, 降水量少且年内分布不均匀, 7—9 月降水量占全年降水量的 70%, 无霜期为 155 d。年平均太阳总辐射 566.95 kJ/cm<sup>2</sup>, 天然植被以干旱草原和荒漠草原为主, 腐殖质层较薄, 土壤为典型的棕钙和灰钙土。SANX 呈东西倾斜, 年均无霜期约 140 d, 7—9 月降水量占 70%。研究区气象参数、自然要素、人类活动及气候条件见表 1、表 2。

表 1 研究区关键气象参数  
Table 1 Key climatic parameters of the study area

| 测站<br>Station                             | 海拔<br>Elevation/m | $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | $T_{\min}/^{\circ}\text{C}$ | MAT/ $^{\circ}\text{C}$ | MAP/mm | E/mm  | 干旱指数<br>Drought index | $t_s/\text{h}$ | $V_{aw}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------|-------|-----------------------|----------------|---------------------------------------|
| 腾格里沙漠边缘<br>The edge of Tengger desert(TD) | 1 260             | 38.1                        | -25.1                       | 9.6                     | 186.2  | 3 200 | 17.2                  | 3 264.0        | 2.90 <sup>[20]</sup>                  |
| 宁夏中部干旱带<br>Central arid of Ningxia(CANX)  | 1 740             | 41.4                        | -29.6                       | 6.8                     | 203.0  | 2 400 | 11.8                  | 2 700.0        | 2.49~2.95 <sup>[21]</sup>             |
| 宁夏半干旱区<br>Semi-arid of Ningxia(SANX)      | 1 456             | 39.9                        | -24.3                       | 7.5                     | 350.0  | 1 300 | 3.7                   | 2 322.3        | 1.20                                  |

注:  $T_{\max}$  为最高气温,  $T_{\min}$  为最低气温, MAT 为平均气温, MAP 为多年平均降水量, E 为年水面蒸发量,  $t_s$  为年总日照时数,  $V_{aw}$  为平均风速。

Note:  $T_{\max}$  means maximum temperature;  $T_{\min}$  means minimum temperature; MAT means annual temperature; MAP means annual precipitation; E means annual total evaporation;  $t_s$  means annual total sunshine time;  $V_{aw}$  means average wind speed.

表 2 研究区自然要素、人类活动及气候变化  
Table 2 Natural elements, human activities and climate change of study area

| 测站<br>Station | 水文<br>Hydrology       | 气候变化<br>Climate change     | 地形<br>Terrain                  | 地貌<br>Physiognomy                       | 土壤<br>Soil                      | 植被<br>Vegetation                                     | 人类活动<br>Human activities                       | 大气环流<br>Atmospheric circulation                           |
|---------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| TD            | 无地表水资源, 地下水位 50~80 m。 | 温带干旱荒漠区, 大陆性气候。            | 西北高, 东南低。                      | 格状与新月形沙丘链 <sup>[22]</sup> 。             | 流沙、原生灰钙土、风成沙土 <sup>[22]</sup> 。 | 沙漠边缘人工绿化乔木、灌木搭配, 野生黑沙蒿、花棒、茵陈蒿和小画眉草 <sup>[22]</sup> 。 | 人工与自然结合的荒漠生态系统沙漠向绿洲过渡带。                        | 属东亚季风区, 水汽受亚洲夏季风、西风环流和高原季风等多个大气环流系统综合影响 <sup>[23]</sup> 。 |
| CANX          | 黄河支流清水河、地下水位 120 m。   | 干旱带气候条件。                   | 南高北低, 东高西低 <sup>[24]</sup> 。   | 峡谷带状, 东西走向为平原, 南北均为山丘 <sup>[24]</sup> 。 | 沙壤土、典型棕钙土与灰钙土 <sup>[24]</sup> 。 | 农牧业植被及野生猪毛草、白茎盐生草等荒漠植被 <sup>[24]</sup> 。             | 农牧交错区, 农业以旱作为主, 辅以少量扬黄灌溉和井灌区 <sup>[24]</sup> 。 |                                                           |
| SANX          | 黄河支流清水河、地下水位 40 m。    | 大陆性气候, 自南向北由半湿润气候向半干旱气候过渡。 | 自南向北呈阶梯式逐渐下降 <sup>[25]</sup> 。 | 地貌多样, 山地、丘陵及平原等 <sup>[25]</sup> 。       | 沙壤土、黑垆土为主, 局部为灰钙土。              | 长芒草、早熟禾、铁杆蒿、百里香、大针茅、风毛菊、阿尔泰狗娃花、赖草等。                  | 农牧交错区。                                         |                                                           |

### 1.2 研究期降水状况

研究阶段 3 个测站月降水量如图 1。该阶段, TD 年平均降水量 102 mm, 92.7% 发生在 4—9 月。

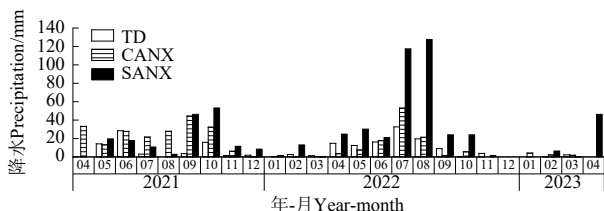


图 1 研究区连续 24 个月降水量

Fig.1 Precipitation amount for 24 consecutive months in study area

2021、2022 年 7—9 月降水分别占全年降水量 29.2% 和 54.2%。CANX 年平均降水量为 240.7 mm, 83.6% 发生在 4—9 月, 7—9 月降水占年降水量 40%~77.6%。2021、2022 年 7—9 月降水分别占年降水量 42.4% 和 68.1%。SANX 降水量较大, 年平均降水量

为 304.1 mm, 2021 年降水量为 385 mm、2022 年为 223.2 mm。

### 1.3 数据获取方法

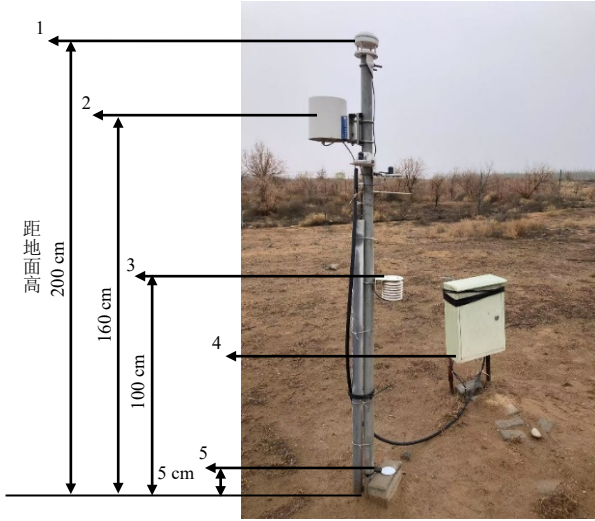
#### 1.3.1 地面数据获取

在各测站安装气象参数和凝结水测算传感器。气象参数包括空气温度 ( $T_a$ )、相对湿度 (RH)、大气压 ( $p$ )、降水 ( $P_m$ )、风速 ( $V_s$ )、风向 ( $D_w$ )。凝结水观测采用叶片湿度传感器。各传感器安装位置如图 2, 传感器名称、获取参数及精度见表 3, 数据记录时间间隔为 30 min。

#### 1.3.2 探空数据

探空数据提供了不同高度的气象参数, 被用来计算对流层水汽通量和水汽含量。获取探空数据的主要途径包括 NCEP/NCAR 再分析数据和怀俄明大学工程学院大气科学系提供的公开探空数据。距离本研究区 3 个测站最近的探空站为银川站 (探空站标识: ZLIC, 探空站号: 53 614)。基于获取途径考虑, 本研究采用怀俄明大学工

程学院大气科学系网站的探空数据 (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml>)。



1. 风向、风速仪 Wind direction and speed 2. 雨量桶 Rain gauge 3. 温湿度和大气压 Air temperature, relative humidity and barometric pressure 4. 数据采集 Data logging 5. 叶片湿度传感器 Leaf wetness sensor

图 2 数据获取传感器安装位置

Fig.2 Installation sites of sensors to obtain data

表 3 传感器及其特性

Table 3 The sensors and its properties

| 序号<br>Serial number | 名称<br>Name | 获取参数<br>Parameters | 精度<br>Accuracy                                               |
|---------------------|------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                   | ATMOS 22   | 风速、风向              | $\pm 0.01 \text{ m/s}$ 、 $\pm 1^\circ$                       |
| 2                   | ECRN-100   | 降水量                | 0.2 mm                                                       |
| 3                   | ATMOS14    | 空气温度、相对湿度、大气压      | $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.05 \text{ kPa}$ |
| 4                   | ZL6        | 数据采集器              | 可接 6 个传感器                                                    |
| 5                   | PHYTOS 31  | 凝结水量               | $\pm 0.02 \text{ mm}$                                        |

## 2 计算方法

### 2.1 近地表水汽通量和水汽含量计算方法

利用探空数据采用流体静力学积分法计算水汽通量和水汽含量。

水汽通量分为纬向分量和经向分量<sup>[26]</sup>:

$$\bar{Q}_\lambda = 100 \frac{1}{g} \int_{p_{100}}^{p_s} \bar{q} u dp \quad (1)$$

$$\bar{Q}_\phi = 100 \frac{1}{g} \int_{p_{100}}^{p_s} \bar{q} v dp \quad (2)$$

式中  $\bar{Q}_\lambda$  和  $\bar{Q}_\phi$  分别为地表至 100 m 高度处纬向和经向的总水平平均水汽通量垂直积分,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $q$  为比湿,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $u$  和  $v$  分别为纬向和径向风速,  $\text{m/s}$ ;  $p_s$  为地表大气压,  $\text{Pa}$ ;  $p_{100}$  为地表以上 100 m 高度处大气压,  $\text{Pa}$ ;  $p$  为大气压,  $\text{Pa}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ 。

总水汽含量  $W$  是对比湿  $q$  进行垂直积分<sup>[27]</sup>:

$$W = 100 \frac{1}{g} \int_{p_{100}}^{p_s} q dp \quad (3)$$

比湿的计算方法<sup>[28]</sup>:

$$q = \frac{622 \times 10^2 e}{p - (0.378e)} \quad (4)$$

$$e = 100 e_s \left( \frac{\text{RH}}{100} \right) \quad (5)$$

式中  $W$  为总水汽含量,  $\text{mm}$ ;  $e$  为水汽压,  $\text{Pa}$ ;  $\text{RH}$  为相对湿度, %;  $e_s$  为饱和水汽压<sup>[29]</sup>, 计算方法如式 (6)。

$$e_s = 611.2 \times \exp[(17.67T_a)/(T_a + 243.5)] \quad (6)$$

式中  $T_a$  为空气温度,  $^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 关键参数的确定

地面气象资料通过现有观测条件获得, 但地上 100 m 范围内气象资料的关键参数必须通过理论计算获得。这些关键参数包括空气温度、相对湿度、风速和大气压。

#### 2.2.1 空气温度

地表以上气温由大气温度垂直递减率确定, 大气温度垂直递减率由式 (7) 多元线性回归分析得到<sup>[30]</sup>。

$$T_h = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 \quad (7)$$

式中  $T_h$  为计算高度空气温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $X_1$  和  $X_2$  为测点经度和纬度,  $(^\circ)$ ;  $X_3$  为测点海拔高度,  $\text{m}$ ;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  是回归系数,  $a_3$  也是温度直减率。同一位置忽略经度和纬度因素, 仅考虑海拔高度, 式 (7) 可简化为式 (8):

$$T_h = a_3 \cdot H + T_0 \quad (8)$$

式中  $H$  为海拔高程,  $\text{m}$ ;  $T_0$  为地表观测位置空气温度,  $^\circ\text{C}$ ; 银川站的  $a_3$  为  $-0.006$ 。

#### 2.2.2 空气相对湿度

与温度、气压和风速不同, 大气对流低空层相对湿度和高度的关系较为复杂, 没有确定的规律。对银川探空站探空数据分析发现, 从最低观测位置 (1 112 m) 到第二次数据采集高程 (1 400~1 600 m), 相对湿度并没有表现出绝对的增大或减小规律。研究以每个月的双日 (格林纳德时间 00 点和格林纳德时间 12 点) 探空数据为参考。地面以上 100 m 对应海拔 1 212 m, 根据相对湿度变化斜率采用插值法计算该位置相对湿度。将 1 112~1 212 m 范围内每个月相对湿度平均值作为计算研究区测点以上 100 m 范围相对湿度的比例依据, 进行计算。

#### 2.2.3 风速

风速随高度变化采用式 (9) 计算<sup>[31]</sup>。

$$v_h = \frac{\lg h - \lg z_0}{\lg h_0 - \lg z_0} v_0 = k_0 v_0 \quad (9)$$

式中  $v_h$  为计算高度  $h$  点的风速,  $\text{m/s}$ ;  $h$  为计算点高度,  $\text{m}$ ;  $h_0$  为参考点高度,  $\text{m}$ ;  $z_0$  为地表粗糙度;  $v_0$  为参考高度  $h_0$  观测的风速,  $\text{m}$ 。

#### 2.2.4 大气压

根据探空数据采用回归方法建立海拔高度与大气压关系。为提高计算精度, 进行两次回归计算, 第一次回归涉及观测值 (图 3a), 第二次回归旨在减小误差 (图 3b)。

地表以上 100 m 位置与地表大气压关系如下:

$$p_h = 0.998 9 p_s - 902.97 \quad (10)$$

式中  $p_h$  为地表以上 100 m 高处大气压,  $\text{Pa}$ ;  $p_s$  为地表观测点大气压,  $\text{Pa}$ 。

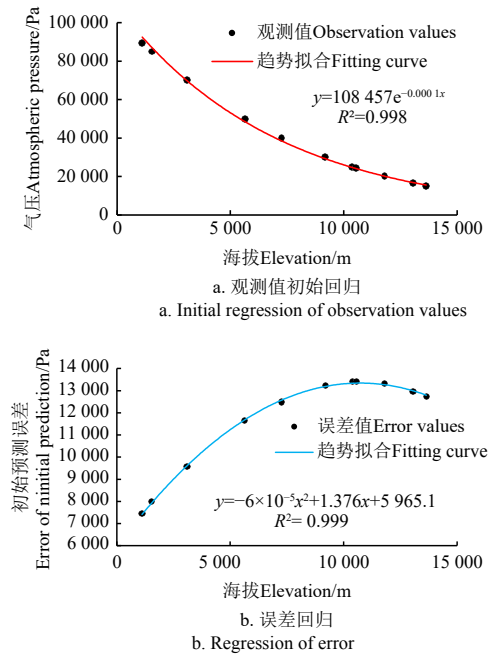


图3 大气压计算模型回归

Fig.3 Regresses of atmospheric pressure calculation models

### 2.3 大气凝结水量计算

介质叶片湿度传感器是一种被广泛用来测量凝结水量的设备,具有较高的精度,本研究使用高分辨率和免校准的介质叶片湿度传感器 PHYTOS31 计算凝结水量。如文献 [32],先用高精度注射器向叶片湿度传感器定量滴水,获取过程电压值,构建传感器微电压 (mV) 与其表面水层厚度之间回归关系,结果如式 (11) [24]。

$$W_e = 0.0032e^{0.0054x} \quad (11)$$

式中  $W_e$  为叶片湿度传感器表面凝结水厚度, mm;  $x$  为叶片湿度传感器电压值, mV (临界值为 447 mV)。

表4 各测点不同季节水汽、凝结水及气象参数

Table 4 Water vapor, condensation and meteorological parameters of each observation station

| 测站 Station | 季节 Season | $Q/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ | $W_c/\text{mm}$ | $T_a/^\circ\text{C}$ | RH            | $V_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $p/\text{kPa}$ |
|------------|-----------|---------------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------------|---------------|--------------------------------------|----------------|
| TD         | 春         | 3.20±1.04Ac                                             | 1.83±0.41Ac   | 0.00±0.00Ac     | -0.68±6.85Ab         | 0.45±0.12Aa   | 1.61±0.24Aa                          | 87.77±0.29Aab  |
|            | 夏         | 10.27±3.33Ab                                            | 6.12±2.32Ab   | 4.48±0.39Aab    | 18.84±3.08Aa         | 0.36±0.06Aa   | 1.90±0.49Aa                          | 87.23±0.30Abc  |
|            | 秋         | 17.98±3.63Aa                                            | 10.37±1.36Aa  | 7.49±0.81Ba     | 23.08±3.08Aa         | 0.54±0.09Aa   | 1.59±0.16Ba                          | 87.02±0.30Ac   |
|            | 冬         | 3.98±2.26Abc                                            | 2.68±1.53Abc  | 1.38±0.52Abc    | 1.50±6.26Ab          | 0.49±0.05Aa   | 1.51±0.105Aa                         | 88.23±0.14Aa   |
| CANX       | 春         | 3.62±0.99Ac                                             | 2.07±0.47Ac   | 0.72±0.30Ab     | 0.30±5.58Ab          | 0.39±0.02Bb   | 1.85±0.26Abc                         | 83.18±0.18Cab  |
|            | 夏         | 10.54±2.76Ab                                            | 5.73±2.04Ab   | 4.98±0.62Ab     | 15.82±4.75Aa         | 0.47±0.10Aab  | 2.39±0.16Aa                          | 82.90±0.19Cb   |
|            | 秋         | 16.96±1.73Aa                                            | 10.16±1.07Aa  | 13.87±1.89ABa   | 20.38±2.74Aa         | 0.57±0.05Aa   | 2.08±0.12Aab                         | 82.81±0.23Cb   |
|            | 冬         | 5.19±2.55Ac                                             | 3.08±1.52Abc  | 3.11±0.90Ab     | 1.76±5.38Ab          | 0.52±0.02Aba  | 1.63±0.19Ac                          | 83.58±0.03Ca   |
| SANX       | 春         | 3.45±1.38Ab                                             | 2.57±0.60Ac   | 0.32±0.09Ab     | 0.47±5.56Ab          | 0.58±0.12Aab  | 1.22±0.29Ab                          | 85.69±0.19Bab  |
|            | 夏         | 10.27±1.19Aa                                            | 7.12±1.84Ab   | 3.20±0.63Ab     | 16.63±4.03Aa         | 0.48±0.03Ab   | 1.71±0.23Aa                          | 85.28±0.24Bb   |
|            | 秋         | 11.23±2.78Aa                                            | 11.63±1.61Aa  | 21.67±2.13Aa    | 20.81±3.44Aa         | 0.68±0.06Aa   | 0.86±0.09Cb                          | 85.22±0.30Bb   |
|            | 冬         | 3.78±1.63Ab                                             | 3.54±1.75Ac   | 10.86±3.06Aab   | 1.08±5.25Ab          | 0.64±0.08ABab | 1.06±0.11Bb                          | 86.19±0.09Ba   |

注:  $Q$  为水汽通量、 $W$  为水汽含量、 $W_c$  为凝结水量、 $T_a$  为空气温度、RH 为相对湿度、 $V_s$  为风速、 $p$  为大气压, 不同大写字母代表不同测点同一季节之间在 0.05 水平上差异显著, 不同小写字母代表同一测点不同季节之间在 0.05 水平上差异显著, 下同。

Note:  $Q$  means water vapor flux,  $W$  means water vapor content,  $W_c$  means condensation amount,  $T_a$  atmospheric temperature, RH means relative humidity,  $V_s$  means wind speed,  $p$  means barometric pressure, different capital letters indicate significant differences among same season of the different observation stations at the 0.05 level, different lowercase letters indicate significant differences among same observation stations in the different seasons at the 0.05 level, same below.

水汽通量、水汽含量、凝结水量及各气象要素年内各月分布如图 4。TD 和 CANX 测站水汽通量、水汽含量 8 月最高, SANX 测站 7 月最高。尽管在 7 月或 8 月气温在一年中达到最大, 但这不影响近地表大气中的水汽量, 同时, 随水汽量的增大, 凝结水量也在增加, 各测点 9 月凝结水量在一年中均达到最大。与降水分布相

## 3 结果与分析

### 3.1 水汽、凝结水及关键气象要素年内特征

从表 4 看出, 同一季节 3 个测站水汽通量、水汽含量和空气温度无显著差异 ( $P>0.05$ ), 各测站秋季凝结水量、风速和大气压差异显著 ( $P<0.05$ ), 冬季相对湿度差异显著 ( $P<0.05$ )。TD、CANX 和 SANX 年凝结水量分别为 13.35、22.68 和 32.80 mm, SANX 秋季凝结水量最大, 为 21.67 mm, TD 秋季凝结水量最小, 为 7.49 mm。CANX 秋季风速最大, 为 2.08 m/s, SANX 风速最小, 为 0.86 m/s。同一季节 3 个测站气压差异显著 ( $P<0.05$ ), CANX 海拔高程最大 (表 1), 气压最低, 秋季仅为 82.81 kPa。冬季 SANX 相对湿度最大, 比该站最大季节小 0.10。

如表 5, 随干旱程度加剧, 凝结水量与水汽通量、水汽含量相关性在增强。TD 和 CANX 测站水汽通量与凝结水量的相关系数均高于 0.800, 水汽含量与凝结水量的相关系数最小接近 0.750, 而 SANX 测站水汽通量、水汽含量与凝结水量相关系数较小, 分别为 0.361 和 0.634。气温与水汽通量、水汽含量呈正相关, 相关系数均高于 0.900。相对湿度有利于增加水汽通量、水汽含量和凝结水量, 但风速减小时, 相对湿度与水汽通量、水汽含量相关系数有所减小, SANX 测站相对湿度与水汽通量相关系数仅为 0.053。不同测站风速对水汽含量和凝结水量的影响有所不同, TD 和 SANX 测站风速与凝结水量的相关系数分别为 -0.039 和 -0.553, 而 CANX 测站风速与水汽含量和凝结水量相关系数分别为 0.411 和 0.310, 这是因为 3 个测站 CANX 海拔最高, 气压最小, 年平均气压仅 83.12 kPa。水汽通量、水汽含量和凝结水量与大气压呈负相关, 随着大气压增加, 水汽通量、水汽含量和凝结水量会有所减小。

比, 水汽通量、水汽含量和凝结水量年内分布更为稳定, 3 个测站降水年内和年际间的分布均表现出多变的特征 (图 1)。

### 3.2 水汽通量时空特征

各测站月水汽通量如表 6, 3 个测站水汽通量均表现出显著的季节和风向特征 ( $P<0.05$ )。

表 5 水汽及气象因素相关性

Table 5 The correlation of water vapor and meteorological factors

| 测站 Station | 指标 Index | $Q$    | $W$    | $W_e$  | $T_a$  | RH     | $V_s$  |
|------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TD         | $W$      | 0.991  |        |        |        |        |        |
|            | $W_e$    | 0.849  | 0.873  |        |        |        |        |
|            | $T_a$    | 0.905  | 0.907  | 0.808  |        |        |        |
|            | RH       | 0.218  | 0.264  | 0.413  | -0.088 |        |        |
|            | $V_s$    | 0.034  | -0.041 | -0.039 | 0.259  | -0.687 |        |
|            | $p$      | -0.847 | -0.836 | -0.637 | -0.898 | 0.151  | -0.160 |
|            |          |        |        |        |        |        |        |
| CANX       | $W$      | 0.987  |        |        |        |        |        |
|            | $W_e$    | 0.818  | 0.749  |        |        |        |        |
|            | $T_a$    | 0.915  | 0.909  | 0.622  |        |        |        |
|            | RH       | 0.524  | 0.477  | 0.769  | 0.297  |        |        |
|            | $V_s$    | 0.480  | 0.411  | 0.310  | 0.662  | 0.084  |        |
|            | $p$      | -0.715 | -0.733 | -0.318 | -0.830 | 0.089  | -0.690 |
|            |          |        |        |        |        |        |        |
| SANX       | $W$      | 0.921  |        |        |        |        |        |
|            | $W_e$    | 0.361  | 0.634  |        |        |        |        |
|            | $T_a$    | 0.973  | 0.937  | 0.483  |        |        |        |
|            | RH       | 0.053  | 0.365  | 0.849  | 0.134  |        |        |
|            | $V_s$    | 0.169  | -0.199 | -0.553 | 0.124  | -0.742 |        |
|            | $p$      | -0.882 | -0.781 | -0.112 | -0.866 | 0.306  | -0.235 |
|            |          |        |        |        |        |        |        |

1、2 月相对湿度较低，水汽通量较小，TD、CANX 和 SANX 分别为 1.9~3.2、2.3~3.9 和 2.4~2.6 kg/(m·s)，对应的水汽传输风向 TD 为 0°~90°、150°~210°，CANX 为 60°~90°、240°~300°，SANX 为 120°~210°、330°~359°。CANX 风速较大引起水汽通量较高。3 月上旬水汽通量有所增加，TD、CANX 和 SANX 月平均水汽通量分别为 4.5、4.7 和 5.4 kg/(m·s)，由于 SANX 相对湿度较高，故水汽通量较大，但传输方向与 2 月相近。4—6 月随着相对湿度增加水汽通量继续增大，TD、CANX 和 SANX 月均值范围分别为 7.4~14.9、8.6~14.5 和 9.0~11.8 kg/(m·s)，水汽传输的主要风向 TD 为 0°~90°和 150°~210°、CANX 为 30°~120°和 270°~300°、SANX 为 120°~240°和 300°~359°。7—8 月 3 个测站水汽通量达到最大，TD、CANX 和 SANX 水汽通量最大分别为 21.2、19.4 和 13.9 kg/(m·s)，对应的水汽传输主要风向 TD 为 0°~60°和 150°~210°、CANX 为 180°~240°、SANX 为 0°~30°、120°~240°

表 6 各测站风向及水汽月平均值

Table 6 Monthly value of wind direction and water vapor

| 月 Month | TD              |                                                    |               | CANX            |                                                    |               | SANX            |                                                    |               |
|---------|-----------------|----------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------------------------------------------|---------------|-----------------|----------------------------------------------------|---------------|
|         | $D_w(^{\circ})$ | $Q(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ | $D_w(^{\circ})$ | $Q(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ | $D_w(^{\circ})$ | $Q(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ |
| 01      | 78.76Ib         | 1.9HIb                                             | 1.30Ic        | 199.99Ba        | 2.3Ha                                              | 1.45Ib        | 196.30BCDa      | 2.4IJb                                             | 2.00Ja        |
| 02      | 88.98Hc         | 3.2Hb                                              | 1.90Ic        | 179.93CDb       | 3.9HIa                                             | 2.15Ib        | 190.48CDa       | 2.6Ib                                              | 2.30Ja        |
| 03      | 96.43Gc         | 4.5Fb                                              | 2.30Gc        | 184.25Cb        | 4.7Ga                                              | 2.60Hb        | 197.92BCa       | 5.4Ga                                              | 3.40Ha        |
| 04      | 123.32Dc        | 7.4Db                                              | 3.85Fc        | 176.19Db        | 8.6Ea                                              | 4.05Eb        | 202.62Ba        | 9.0Ca                                              | 5.00Ea        |
| 05      | 103.27Fb        | 8.5Ec                                              | 5.20Ec        | 193.72Ba        | 8.6Ea                                              | 4.55Eb        | 196.00CDa       | 10.0Db                                             | 6.90Ga        |
| 06      | 130.33BCc       | 14.9Cb                                             | 9.30Dc        | 173.77Db        | 14.5Da                                             | 8.60Db        | 210.70Aa        | 11.8Bb                                             | 9.50Da        |
| 07      | 134.95ABc       | 19.9Ba                                             | 11.30Bc       | 155.26Eb        | 15.6Cb                                             | 10.57Bb       | 177.61Ea        | 13.9Ac                                             | 13.69Ba       |
| 08      | 126.68CDb       | 21.2Aa                                             | 11.35Ac       | 155.49Ea        | 19.4Ab                                             | 11.23Ab       | 160.44Fa        | 12.4ABc                                            | 11.70Aa       |
| 09      | 141.16Ac        | 12.9Cb                                             | 8.45Cc        | 222.72Aa        | 15.9Ba                                             | 8.70Cb        | 174.38Eb        | 7.4Ec                                              | 9.70Ca        |
| 10      | 115.41Ec        | 7.2Ea                                              | 4.80Eb        | 196.33Ba        | 8.6Fa                                              | 5.10Fc        | 174.81Eb        | 5.8Fb                                              | 5.95Fa        |
| 11      | 68.66Jc         | 2.8Gb                                              | 2.00Gc        | 174.03Db        | 4.7Fa                                              | 2.70Ga        | 190.56Da        | 3.8Hb                                              | 3.25Ib        |
| 12      | 76.19Ic         | 2.0Ib                                              | 1.25Jb        | 221.09Aa        | 2.4Ia                                              | 1.45Ja        | 190.61Db        | 1.8Jc                                              | 1.60Ka        |

注： $D_w$  为风向，不同大写字母代表同一测点不同月之间在 0.05 水平上差异显著，不同小写字母代表不同测点同一月之间在 0.05 水平上差异显著。  
Note:  $D_w$  means wind direction, different capital letters indicate significant differences among the different month in the same observation stations at the 0.05 level, different lowercase letters indicate significant differences among same month of the different observation stations at the 0.05 level.

3.3 水汽含量空间分布特征

如表 6，3 个测站水汽含量具有明显的时空特征，同一测点不同月份、不同测站同一月份均表现出显著差异 ( $P<0.05$ )。1—3 月、10—12 月水汽输送的主要风向 TD 为 0°~90°和 150°~210°、CANX 为 30°~120°和

和 300°~359°。9 月水汽通量开始下降，TD、CANX 和 SANX 分别为 12.9、15.9 和 7.4 kg/(m·s)，水汽传输方向较为发散。10 月、11 月水汽通量显著降低，TD、CANX 和 SANX 水汽通量有所降低，最小分别为 2.8、4.7 和 3.8 kg/(m·s)，传输风向区间变小，表现出一定的收敛性。12 月，水汽通量更小，TD、CANX 和 SANX 水汽通量分别为 2.0、2.4 和 1.8 kg/(m·s)。

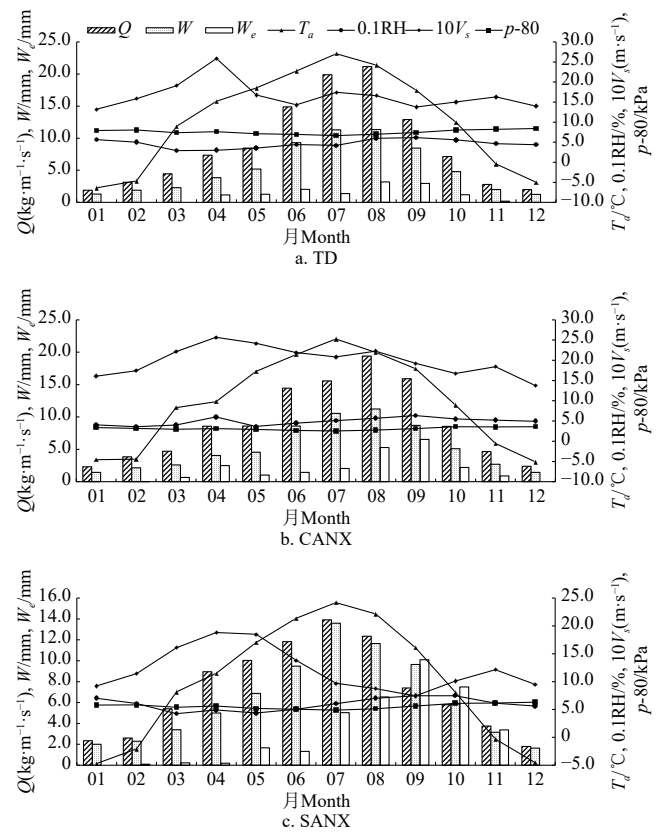


图 4 月凝结水总量、平均水汽及气象参数

Fig.4 The monthly total condensation amount, monthly mean water vapor flux, water vapor content, meteorological parameters

150°~300°。6—9 月 SANX 水汽含量分布较为发散，风向范围为 0°~30°、120°~240°和 330°~359°，SANX 水汽通量、含量和降水表现出同步变化特征。1 月、12 月水汽含量较低，TD、CANX 和 SANX 月平均值分别为 1.25、1.45 和 1.60 mm。4 月开始水汽含量增加，月平均

水汽含量为 3.85~5.00 mm, TD 最低, 为 3.85 mm, SANX 最高。7 月和 8 月为水汽含量最大时段, SANX 区 2 年观测的最大值均为 7 月, 较为稳定, 平均值为 13.69 mm, 主要风向区间为 120°~240°, 而 TD 和 CANX 峰值 2021 年在 7 月, 2022 年在 8 月。9 月水汽含量减小, 月平均值为 8.70 mm。冬季由于受到西北风影响, 即使在水汽含量较高的 SANX 测站, 月平均为 1.60~3.25 mm。

3.4 凝结水发生过程水汽动态

分别选取 3 个测站一次凝结水发生过程 (TD: 2022 年 9 月 20—21 日, CANX: 2022 年 8 月 29—30 日, SANX: 2022 年 9 月 11—12 日) 进行分析。从表 7 可以看出, 即使 3 个测点水汽通量无显著差异条件下 ( $P<0.05$ ), 凝结水量、水汽含量仍然具有差异显著 ( $P<0.05$ )。相关分析发现 (表 7), 凝结水发生

过程凝结水量与水汽通量、水汽含量均显著负相关 ( $P<0.05$ ), 而水汽通量与水汽含量显著正相关 ( $P<0.05$ )。

3 个测站一次完整的凝结水形成和消散过程如图 5。凝结水发生前水汽通量呈下降趋势, 直至凝结水量达到峰值, 随后水汽通量开始增大。水汽含量在凝结水发生前呈现相对稳定的状态, 随着凝结水产生, 水汽含量迅速下降, 凝结水停止发生后, 水汽含量转变为增加趋势。凝结水发生过程, 虽然沙漠边缘 (图 5, TD) 水汽通量和水汽含量降低量均大于干旱带 (图 5, CANX), 但 TD 测站凝结水峰值小于 CANX, 分别为 0.160 mm 和 0.457 mm。半干旱区 (图 5, SANX) 水汽通量和水汽含量降低量最大, 产生的凝结水量也最大, 为 0.514 mm。水汽通量、水汽含量的变化与凝结水量的关系很好的诠释了不同地理条件形成凝结水的难易程度。

表 7 凝结水发生过程水汽通量、水汽含量及其相关性

Table 7 Water vapor flux, water vapor content and the correlation during the process of condensation

| 测站 Station | $W_e/\text{mm}$ | $Q/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ | 相关系数 The coefficient of correlation |               |             |
|------------|-----------------|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------|
|            |                 |                                                     |               | $W_e\times Q$                       | $W_e\times W$ | $Q\times W$ |
| TD         | 0.039±0.042b    | 4.67±3.221a                                         | 7.12±0.951c   | -0.571*                             | -0.652*       | 0.909*      |
| CANX       | 0.173±0.170a    | 5.23±4.916a                                         | 8.18±0.877b   | -0.546*                             | -0.751*       | 0.772*      |
| SANX       | 0.189±0.181a    | 5.31±4.486a                                         | 9.56±1.321a   | -0.475*                             | -0.722*       | 0.849*      |

注: 不同小写字母代表不同测点之间在 0.05 水平上差异显著。\*表示 0.05 显著性水平。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among observation stations at the 0.05 level. \*,  $P<0.05$ .

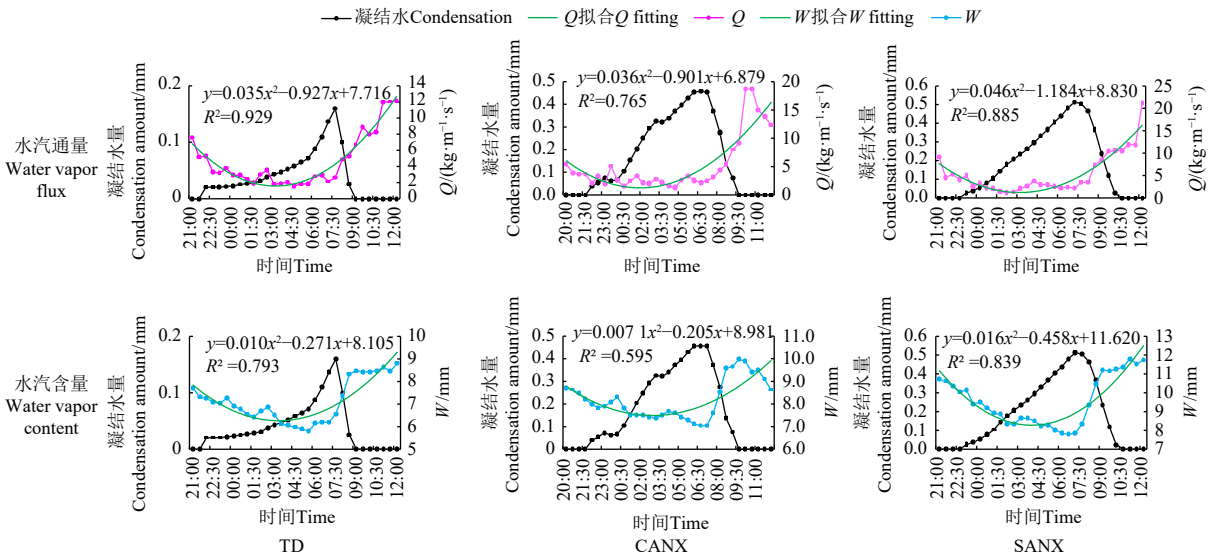


图 5 凝结水产生和消散过程水汽含量和水汽通量变化

Fig.5 Variation of water vapor flux and water vapor content during condensation formation and evaporation

3.5 无凝结水发生昼夜过程水汽动态

对 3 个测站一次无凝结水发生昼夜交替过程 (TD: 2021 年 7 月 7 日, CANX: 2021 年 7 月 10 日, SANX: 2022 年 7 月 9 日) 进行分析。自然条件下气温露点差超过 3.0 °C 时较难产生凝结水<sup>[24,32]</sup>, 从表 8 看出, 即使气温

露点差最小的 CANX 测点也达到 8.45 °C, 故该条件下 3 个测站无凝结水发生。这个过程, 3 个测站水汽通量、水汽含量差异显著 ( $P<0.05$ ), CANX 水汽通量最大, 而 SANX 水汽含量最大, 这是由于 CANX 风速最大引起水汽通量增加。

表 8 无凝结水发生昼夜交替过程水汽及气象参数

Table 8 Water vapor and meteorological parameters during the process of day and night without condensation

| 测站 Station | $Q/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $W/\text{mm}$ | RH           | $T_d/^\circ\text{C}$ | $T_f/^\circ\text{C}$ | $(T_d-T_f)/^\circ\text{C}$ | $V_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------------|-----------------------------------------------------|---------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| TD         | 5.16±2.688c                                         | 8.628±1.125c  | 0.474±0.201b | 22.4±6.72b           | 8.78±2.079b          | 13.59±8.53a                | 0.646±0.433b                       |
| CANX       | 11.02±7.07a                                         | 12.680±1.257b | 0.609±0.124a | 23.8±4.02ab          | 15.32±0.574a         | 8.45±4.139b                | 2.288±0.935a                       |
| SANX       | 8.37±4.057b                                         | 13.855±1.300a | 0.568±0.130a | 25.3±3.17a           | 15.60±1.542a         | 9.72±4.557b                | 0.632±0.383b                       |

注:  $T_f$  为露点温度, 不同小写字母代表不同测点之间在 0.05 水平上差异显著。

Note:  $T_f$  means dewpoint temperature, different lowercase letters indicate significant differences among observation stations at the 0.05 level.

水汽通量受到风速的影响,当水汽通量增加时,水汽含量就会有所减小,故从表 9 可以看出,无凝结水发生的昼夜交替过程水汽通量与水汽含量呈负相关,同时,由于风速引起水汽传输,也会造成相对湿度有所减小,所以风速与水汽通量和相对湿度呈负相关。

如图 6,水汽通量呈下降趋势,而水汽含量保持稳定(TD、SANX)或增加(CANX)。整个过程水汽通量、水汽含量标准差也反映了这一规律,3 个测站水汽通量标准差超过均值 48.5%,而水汽含量最大标准差为均值的 13.0%,表现出较为平稳的变化过程。

对比凝结水发生和未有凝结水发生昼夜交替过程发现,凝结水发生过程,TD、CANX 和 SANX 水汽通量分别下降 6.0、4.1 和 7.8 kg/(m·s),水汽含量分别下降 1.9、1.7 和 2.8 mm,而未有凝结水发生昼夜,TD、CANX 和 SANX 水汽通量下降 8.9、20.2 和 13.4 kg/(m·s),水汽含量分别上升了 3.0、1.0 和 2.7 mm。

表 9 无凝结水昼夜水汽及气象参数相关性

Table 9 Correlation of water vapor and meteorological parameters of day and night without condensation

| 测站 Station | 指标 Index    | $Q$     | $W$     | RH      | $T_a$   | $T_l$   | $T_a - T_l$ |
|------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| TD         | $W$         | -0.762* |         |         |         |         |             |
|            | RH          | -0.805* | 0.857*  |         |         |         |             |
|            | $T_a$       | 0.818*  | -0.837* | -0.985* |         |         |             |
|            | $T_l$       | -0.759* | 0.998*  | 0.850*  | -0.836* |         |             |
|            | $T_a - T_l$ | 0.829*  | -0.903* | -0.982* | 0.991*  | -0.902* |             |
|            | $V_s$       | 0.976*  | -0.858* | -0.836* | 0.851*  | -0.863* | 0.881*      |
| CANX       | $W$         | -0.086  |         |         |         |         |             |
|            | RH          | -0.306  | 0.848*  |         |         |         |             |
|            | $T_a$       | 0.344   | -0.798* | -0.993* |         |         |             |
|            | $T_l$       | 0.293   | 0.427*  | 0.203   | -0.146  |         |             |
|            | $T_a - T_l$ | 0.293   | -0.833* | -0.992* | 0.991*  | -0.280  |             |
|            | $V_s$       | 0.738*  | 0.066   | -0.061  | 0.102 4 | 0.491*  | 0.031       |
| SANX       | $W$         | -0.667* |         |         |         |         |             |
|            | RH          | -0.738* | 0.919*  |         |         |         |             |
|            | $T_a$       | 0.783*  | -0.846* | -0.981* |         |         |             |
|            | $T_l$       | -0.683* | 0.999*  | 0.922*  | -0.855* |         |             |
|            | $T_a - T_l$ | 0.775*  | -0.926* | -0.994* | 0.985*  | -0.933* |             |
|            | $V_s$       | 0.982*  | -0.779* | -0.820* | 0.850*  | -0.795* | 0.860*      |

\*表示 0.05 显著性水平。\*,  $P < 0.05$ 。

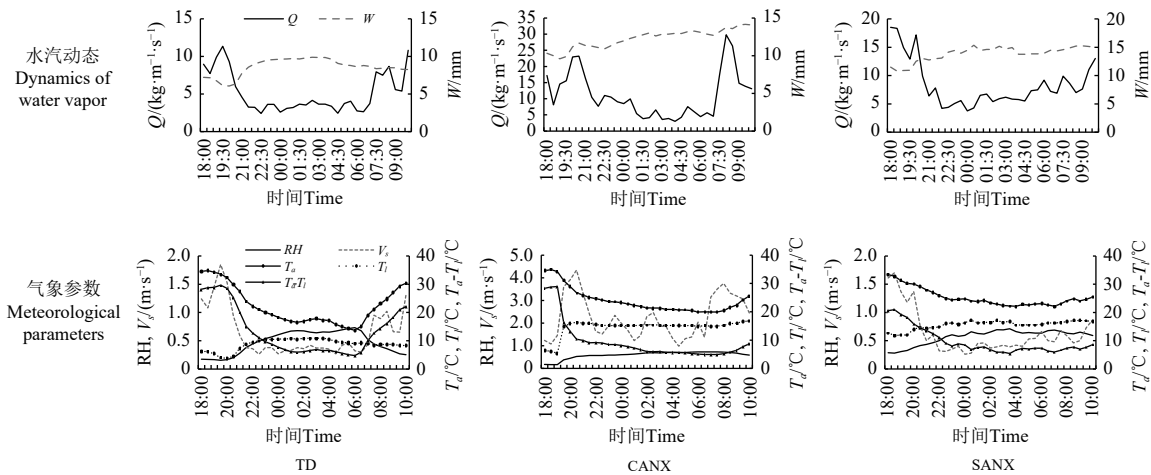


图 6 无凝结水发生昼夜水汽动态及气象参数

Fig.6 The dynamics of water vapor and meteorological parameters of no condensation day and night

## 4 讨论

### 4.1 干旱地区近地表水汽时空分布关键影响因素

近地表水汽是凝结水的重要水分来源,尽管研究认为近地表水汽影响凝结水的形成及凝结水量<sup>[11]</sup>,但有关近地表水汽分布特征及凝结水发生过程近地表水汽动态的相关论述还需要更加明确。近地表水汽具有其特殊的分布特征,既受到其所处地理位置大气环流影响,也与其周围人类水事活动有关<sup>[8]</sup>。本研究所选 3 个测站既属东亚季风区,水汽受亚洲夏季风、西风环流和高原季风等多个大气环流系统的综合影响<sup>[23]</sup>,又分别处于不同地理条件,包括沙漠边缘、干旱区和半干旱区。随干旱程度加剧,凝结水量与水汽通量、水汽含量相关性在增强,相关系数也在增大。

与中国西北地区水汽含量时间分布相似,研究区水汽主要集中在夏、秋季节<sup>[11-12]</sup>,这是因为夏季和秋季,由于季风增强了暖湿气流输送、农业灌溉处于高峰期引起地区蒸散量增加<sup>[33]</sup>。尽管研究区 7 月、8 月温度在一年中最高,但这个时期水汽量也最大,这也成为大气水利用的重要依据。由于水汽受季风和风向影响<sup>[27]</sup>,可以

推断,研究区主要水汽来源有两种方式,一种是黄河灌区蒸散,另一种是东亚季风输送水汽。黄河灌区分别位于 TD 的东北部、CANX 的西部和东北部、SANX 的北部,表现出周围地区蒸散对大气水分的贡献特征<sup>[34]</sup>。

水汽的空间分布受地理位置的影响<sup>[4]</sup>,如 TD 近地表水汽除受引黄灌区人类水事活动的影响外,还受东亚季风环流的影响,夏、秋季节水汽含量分布更为发散,冬、春季节分布收敛,与杨青等<sup>[14]</sup>研究结果相一致。CANX 受南北山脉遮挡影响,水汽呈东西向传输特征。

与水汽通量相比,水汽含量的分布更加发散,这是由于水汽在大气中的分布特征与传输特征有所不同,传输特征更具风向性,而分布的风向特征相对较弱。

### 4.2 近地表水汽动态对凝结水发生的响应

水汽通量、水汽含量和凝结水量之间的关系体现为相互耦合,构成一个有机整体,用水汽通量和水汽含量的变化来揭示凝结水形成过程更加直接、直观和易于理解。

由于近地表水汽发生相变,一部分水汽从气态转变为液态,故水汽通量、水汽含量均有所减小,存在负相

关关系,这与水汽含量较大更容易发生凝结水并不矛盾。水汽通量的降低为凝结水产生提供了有利的空气动力条件和水源<sup>[35-36]</sup>。凝结水的形成致使水汽从气态转换为液态,导致水汽含量的减少,很好的诠释了大气水传输过程的质量守恒原理<sup>[37]</sup>,同时也揭示了近地表水文过程水的相变<sup>[38]</sup>。对于两种条件下水汽通量、水汽含量动态的解释符合物质守恒原理。

## 5 结 论

采用流体静力积分法计算了3种地理条件近地表水汽通量和水汽含量,同时用叶片湿度传感器测算了凝结水量。分析了不同地理条件近地表水汽时空特征及其对凝结水发生的响应,主要结论包括:

1) 3种地理条件水汽通量、水汽含量表现出显著的季节差异( $P<0.05$ ),干旱地区较之半干旱的地区峰值时间滞后1个月。沙漠边缘水汽通量最大,半干旱区水汽含量最高。

2) 随干旱程度加剧,凝结水量与水汽通量、水汽含量相关性在增强,沙漠边缘(TD)凝结水量与水汽通量、水汽含量相关系数均高于0.800,半干旱区(SANX)凝结水量与水汽通量的相关系数仅为0.361,干旱带(CANX)居中。

3) 水汽通量、水汽含量表现出显著的风向特征和地区差异性( $P<0.05$ ),腾格里沙漠边缘(TD)水汽通量、水汽含量增强主要风向为东北风和南风,宁夏中部干旱带(CANX)主要风向为西南风,宁夏半干旱区(SANX)风向多变,包括东北、南风以及偏北风。

4) 一次凝结水形成过程水汽通量、水汽含量均有所减小。半干旱区产生的凝结水水量最大,同时水汽通量和水汽含量减小量也最大,沙漠边缘水汽通量和水汽含量减小量大于中部干旱带,但产生凝结水量最小。

5) 无凝结水发生昼夜,3种地理条件水汽通量均有所降低,而水汽含量有所增加。

## 【参 考 文 献】

- [1] 冉彬, 张在勇, 杨京博, 等. 毛乌素沙地沙蒿凝结水形成规律及其对水均衡的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 111-119.  
RAN Bin, ZHANG Zaiyong, YANG Jingbo, et al. Dew formation characteristics of *Artemisia ordosica* and its influence on water balance in the Mu Us Sandy Land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 111-119. (in Chinese with English abstract)
- [2] PAN Y X, WANG X P, ZHANG Y F, et al. Dew formation characteristics at annual and daily scale in xerophyte shrub plantations at southeast margin of Tengger desert, Northern China[J]. Ecohydrology, 2018, 11(5): e1968.
- [3] ZHUANG Y L, ZHAO W Z. Dew formation and its variation in Haloxylon ammodendron plantations at the edge of a desert oasis, northwestern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 541-550.
- [4] ZHOU Y, WANG X Z, XU C. Comprehensive evaluation of the precipitable water vapor products of Fengyun satellites via GNSS data over mainland China[J]. Atmospheric Research, 2024, 300: 107235.
- [5] 李胜龙, 肖波, 孙福海. 黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 111-119.  
LI Shenglong, XIAO Bo, SUN Fuhai. Characteristics of water vapor sorption and condensation in biocrusts covered surface soil in arid and semiarid areas of the Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 111-119. (in Chinese with English abstract)
- [6] 贾志峰, 陈丹姿, 王智, 等. 关中平原土壤凝结水量及水汽来源特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 369-376.  
JIA Zhifeng, CHEN Danzi, WANG Zhi, et al. Characteristics and source of soil condensation water in Guanzhong Plain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 369-376. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邹进上, 刘惠兰. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J]. 地理学报, 1981, (4): 377-391.  
ZHOU Jinshang, LIU Huilan. The basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1981, (4): 377-391. (in Chinese with English abstract)
- [8] BENTON G S, ESTOQUE M A. Water-vapor transfer over the north American continent[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1954, 11: 462-477.
- [9] 陆渝蓉, 高国栋. 我国大气中平均水汽含量与水分平衡的特征[J]. 气象学报, 1984, (3): 301-310.  
LU Yurong, GAO Guodong. The water vapour content and the water budget in the atmosphere over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1984, (3): 301-310. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438.  
WANG Keli, JIANG Hao, ZHAO Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 301-310. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王凯, 孙美平, 巩宁刚. 西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 290-297.  
WANG Kai, SUN Meiping, GONG Ninggang. Spatial and temporal distribution and transportation of the water vapor in the northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 290-297. (in Chinese with English abstract)
- [12] 崔玉琴. 西北内陆上空水汽输送及其源地[J]. 水利学报, 1994, (9): 79-87, 93.  
CUI Yuqin. The transport of vapour and its sources in Northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (9): 79-87, 93. (in Chinese with English abstract)

- [13] 姚俊强, 杨青, 黄俊利, 等. 天山山区及周边地区水汽含量的计算与特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 567-573. YAO Junqiang, YANG Qing, HUANG Junli, et al. Computation and analysis of water vapor content in the Tianshan Mountains and peripheral regions, China[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 567-573. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨青, 魏文寿, 李军. 塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空变化[J]. 科学通报, 2008, 53(Z2): 62-68.
- [15] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. 科学通报, 2011, 56(1): 58-70.
- [16] 张良, 张强, 冯建英, 等. 祁连山地区大气水循环研究 (I): 空中水汽输送年际变化分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1079-1091. ZHANG Liang, ZHANG Qiang, FENG Jianying, et al. A study of atmospheric water cycle over the Qilian Mountains (I): Variation of annual water vapor transport[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1079-1091. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周思捷, 孙从建, 陈伟, 等. 黄土高原东部夏半年降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1745-1761. ZHOU Sijie, SUN Congjian, CHEN Wei, et al. Precipitation isotope characteristics and water vapor sources in summer in eastern Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1745-1761. (in Chinese with English abstract)
- [18] 曹乐, 申建梅, 聂振龙, 等. 巴丹吉林沙漠降水稳定同位素特征与水汽再循环[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2973-2983. CAO Le, SHEN Jianmei, NIE Zhenlong, et al. Stable isotopic characteristics of precipitation and moisture recycling in Badain Jaran Desert[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2973-2983. (in Chinese with English abstract)
- [19] KIDROM G J. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1/4): 66-74.
- [20] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 257-266.
- [21] 李媛, 谢应忠, 王亚娟. 宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4680-4688. LI Yuan, XIE Yingzhong, WANG Yajuan. Dynamic change and influencing factors of potential evapotranspiration in the middle arid region of Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4680-4688. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨述睿, 杨甜, 张璐, 等. 腾格里沙漠东南缘半固定沙丘土壤水分影响因素[J]. 中国沙漠, 2025, 45(5): 328-337. YANG Shurui, YANG Tian, ZHANG Lu, et al. Moisture influencing factors on semi-fixed sand dunes in southeast edge of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(5): 328-337. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张强, 王元, 张萍. 论西北地区空中云水资源特征与云降水转化机制[J]. 地球科学进展, 2025, 40(5): 473-486. ZHANG Qiang, WANG Yuan, ZHANG Ping. Cloud water resources and precipitation conversion in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2025, 40(5): 473-486. (in Chinese with English abstract)
- [24] 马波, 田军仓, 何进宇, 等. 宁夏中部干旱带露水形成机制及其对表层土壤水分的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 955-966. MA Bo, TIAN Juncang, HE Jinyu, et al. The mechanisms of dew formation and its influence on surface soil water content in the Central Ningxia arid belt[J]. Water Science Advance. 2022, 33(6): 955-966. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁金梅. 宁夏中南部草地生态安全评价研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022: 18-20. DING Jinmei. Research on Grassland Ecological Security Evaluation in Central and Southern Ningxia Hui Autonomous Region[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022: 18-20. (in Chinese with English abstract)
- [26] RASMUSSEN E M. Diurnal variations in the summer water vapor transport over North America[J]. Water Resources Research, 1966, 2, 469-477.
- [27] 俞静雯, 李清泉, 丁一汇, 等. 气候变暖背景下青藏高原夏季水汽的长期变化趋势分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(5): 942-954.
- [28] WANG M, FANG X, HU S, et al. Variation characteristics of water vapor distribution during 2000–2008 over Hefei (31.9N, 117.2E) observed by L625 Lidar[J]. Atmospheric Research, 2015, (164/165):1-8.
- [29] BOLTON D. The computation of equivalent potential temperature[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1046-1053.
- [30] LI X, WANG L, CHEN D, et al. Near-surface air temperature lapse rates in the mainland China during 1962–2011[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118: 7505-7515.
- [31] JUSTUS C G, MIKHAIL A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics[J]. Geophysical Research Letters, 1976, 3(5): 261-264.
- [32] 王浩, 贾志峰, 王智. 陕北黄土丘陵区露水量及影响因子[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3703-3710. WANG Hao, JIA Zhifeng, WANG Zhi. Dew amount and its inducing factors in the loess hilly region of Northern Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3703-3710. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘秀花, 田书林, 马延东, 等. 毛乌素沙地包气带气态水同位素特征及其运移规律[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 112-120. LIU Xiuhua, TIAN Shulin, MA Yandong, et al. Isotopic characteristics and migration of water vapor in the vadose zone of Mu Us Sandy Land[J]. Transactions of the Chinese Society

- of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(4): 112-120. (in Chinese with English abstract)
- [34] WORDEN J, NOONE D, BOWMAN K. Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle[J]. *Nature*, 2007, 445: 528-532.
- [35] HE S Y, RICHARDS K. The role of dew in the monsoon season assessed via stable isotopes in an alpine meadow in Northern Tibet[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 101-109.
- [36] ZHUANG Y L, ZHAO W Z, LUO L H, et al. Dew formation characteristics in the gravel desert ecosystem and its ecological roles on Reaumuria soongorica[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126932.
- [37] 顾弘道, 钱正安. 数值模式的质量守恒方程中水汽源汇项作用的讨论[J]. *科学通报*, 1990, 35(22): 1721-1724.
- [38] 李修仓, 姜彤, 吴萍. 水分再循环计算模型的研究进展及其展望[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(10): 1029-1040.
- LI Xiucang, JIANG Tong, WU Ping. Progress and prospect of the moisture recycling models[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(10): 1029-1040. (in Chinese with English abstract)

## Near-surface water vapor dynamics and its response to condensation events in arid regions

MA Bo<sup>1,2</sup>, YAN Xinfang<sup>1,2</sup>, LI Wangcheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Near-surface water vapor condensation is one of the most crucial steps to fully utilize atmospheric water sources in ecological agriculture. It is often required to clarify the dynamic relationship between near-surface water vapor and condensation. This study aims to investigate near-surface water vapor dynamics and their response to condensation events in arid regions. Three geographical conditions of northwest China were selected to capture the meteorological parameters, including the southeast margin of the Tengger Desert (TD), the arid belt of the center in Ningxia Hui Autonomous Region (CANX), and the semi-arid region in Ningxia Hui Autonomous Region (SANX). The hydrostatic integration was employed to calculate water vapor flux and content within a 100 m range above ground at each observation point, based on the evolution patterns of meteorological factors with height at the Yinchuan radiosonde station. The leaf wetness sensor of PHYTOS31 was used to calculate the condensation water amount at 5 cm above ground. A correlation analysis was performed on the water vapor, condensation water, and meteorological parameters. The results indicate that there were significant differences in annual total condensation water at TD, CANX, and SANX sites ( $P < 0.05$ ), with annual averages of 13.35, 22.68, and 32.80 mm, respectively, during the observation period. Spatiotemporal variations in water vapor flux and content were significant ( $P < 0.05$ ) at all three stations, thus peaking in summer and declining in winter. Minimum monthly water vapor flux at TD, CANX, and SANX were 1.9, 2.3, and 1.8 kg/(m·s), respectively, while minimum monthly water vapor content was 1.30, 1.45, and 1.60 mm, respectively. Peak water vapor flux and content occurred in July at SANX, and in August at TD and CANX. Water vapor flux was markedly higher at the southeast margin of the Tengger Desert and arid region than that in the semi-arid regions, with 21.2, 19.4, and 13.9 kg/(m·s) for the maximum TD, CANX, and SANX, respectively. The monthly average water vapor content was highest at the SANX site (13.69 mm), while those were 11.35 and 11.23 mm, respectively, at the TD and CANX sites. The primary wind direction ranges influencing water vapor flux and content at the three stations were: TD with 0°–60° and 150°–210°, CANX with 180°–240°, and SANX with 0°–30°, 120°–240°, and 300°–359°. In terms of a single condensation event, both water vapor flux and content decreased during the condensation accumulation phase, whereas there was an increase when the condensation dissipated. Condensation content showed a significant negative correlation with water vapor content ( $P < 0.05$ ). The correlation coefficients for TD, CANX, and SANX were  $-0.652$ ,  $-0.751$ , and  $-0.722$ , respectively. Water vapor flux first decreased and then increased during the diurnal cycle without condensation, due to the absence of water vapor phase change. While water vapor content shared an increasing trend. Water vapor flux and content exhibited a significant negative correlation ( $P < 0.05$ ) during the process. These findings can also provide valuable insights to characterize near-surface water vapor dynamics under diverse geographical conditions.

**Keywords:** arid regions; characteristics of water vapor; condensation water; integral method