

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.03.008

# 基于卫星观测安徽淮北地区 水汽分布特征研究

曹亚楠, 袁野\*, 郑小艺, 高金兰

(安徽省人工影响天气办公室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 为合理评估水汽资源, 利用大气红外探测器 (AIRS) 和先进微波探测器 (AMSU) 联合反演的2006–2015年AIRS L2标准反演产品 AIRX2RET V006, 研究了安徽淮北地区水汽分布和变化特征, 重点分析了该地区整层大气可降水量和若干层累积水汽月均值、季均值的年际变化, 以及水汽和温度的关系。研究发现: 从2006年到2015年这10年间, 淮北地区月平均整层大气可降水量呈现逐年减小的趋势。1000~850、850~500和500~100 hPa层累积水汽和整层大气可降水量四季分布一致, 呈现夏季>秋季>春季>冬季。四季整层大气可降水量与三层累积水汽年际变化也呈现出较高的一致性, 表现为夏季逐年变化相对较大, 呈线性减小趋势; 秋季次之, 除500~100 hPa层外, 在2006至2011年期间呈现逐年线性增大趋势; 春、冬两季年际变化相对较小, 且无明显的线性关系。

**关键词:** 水汽; 卫星观测; 淮北地区

中图分类号: P407; P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)03-269-010

## Water vapour distribution characteristics of Huaibei area in Anhui Province based on satellite observation

CAO Yanan, YUAN Ye\*, ZHENG Xiaoyi, GAO Jinlan

(Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to reasonably evaluate water vapor resources, the distribution and variation characteristics of water vapour in Huaibei region of Anhui Province, China, from 2006 to 2015 were studied using AIRS Level 2 Standard Physical Retrieval V006 data, a joint inversion product from atmospheric infrared detectors (AIRS) and advanced microwave detectors (AMSU). Interannual variations of monthly and seasonal average characteristics of total precipitable water vapour and integrated water vapour of different layers (viz. 1000-850, 850-500 and 500-100 hPa) were mainly analyzed, as well as the relationship between temperature and water vapour. The results show that monthly average of total precipitation water vapour over the Huaibei area shows a decreasing trend year by year from 2006 to 2015. The seasonal distributions of the layer integrated water vapour in 1000-850, 850-500 and 500-100 hPa are consistent with that of total precipitable water vapour, showing the trend of summer > autumn > spring >

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC1510303), 安徽省重点研究与开发计划项目 (1704f0804055)

作者简介: 曹亚楠 (1986-), 女, 安徽淮南人, 博士, 高级工程师, 主要从事卫星遥感云水资源方面的研究。E-mail: cyn@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-01-12; 修改日期: 2022-03-07

\*通信作者。E-mail: 137620229@qq.com

winter. The interannual variations of the layer integrated water vapour in 1000-850, 850-500 and 500-100 hPa are also consistent with that of the total precipitable water vapour. And the largest annual variation appears in summer with a linear decreasing trend, followed by autumn with a increasing linearly year by year from 2006 to 2011 except for 500-100 hPa layer. The interannual variation of spring and winter is relatively small, and there is no significant linear relationship.

**Key words:** water vapour; satellite observation; Huaibei area

## 0 引言

空中水汽作为降水的物质基础,其含量的变化影响降水强度、持续时间及降水频次等降水特征<sup>[1,2]</sup>,对降水和干旱的产生有着深远的影响。淮河流域是我国重要的粮食生产基地,地处我国南北气候过渡带,冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨,旱涝转变急剧,其降水由北向南递增。尤其是安徽省淮北地区,干旱基本呈现北重南轻的纬向空间分布特征,发生频率自南向北递增,且呈季节性变化特征。近年来,随着经济的快速发展,空气质量面临的问题形势严峻,通过降水的湿沉降改善空气质量是当前人工影响天气(人影)工作的重点之一。所以,研究淮北地区上空水汽分布特征,认识其变化规律,将促进人工影响天气部门科学合理的开发空中云水资源,进一步有效均衡该地区降水和干旱等问题。

前期,水汽的研究主要基于无线电探空、地面观测及美国气象环境预报中心(NCEP)等资料的分析。随着卫星遥感技术的发展,卫星遥感弥补了探空和地面观测时空分辨率不足的问题。其具有覆盖范围广、信息量大、时空分辨率高、数据真实可靠等优势,越来越多地被应用于水汽的研究<sup>[3-5]</sup>。大气红外探测仪(AIRS)在红外波段光谱分辨率高,对大气各高度层温度和湿度信息分辨精度较高,因而被用来评估天气预报及研究水循环和能量循环<sup>[6]</sup>。前期已有多位学者利用AIRS观测资料对水汽进行了研究:如Randel和Park<sup>[7]</sup>利用AIRS观测的对流层顶温度、气压、水汽混合比等变量对对流层水汽的变化进行了研究;占瑞芬和李建平<sup>[8]</sup>利用AIRS大气产品资料对青藏高原地区上对流层水汽特征进行了研究,检验青藏高原地区AIRS资料质量并揭示其上对流层水汽特征;张雪芹等<sup>[9]</sup>利用AIRS二级产品的水汽数据分析研究了2003—2011年中亚地区上对流层水汽的时空变化和异常特征;张祥成等<sup>[10]</sup>利用AIRS L2标准反演产品分析了青海省空中垂直积分水汽含量时空分布及变化规律;利用AIRS和先进微波探测器(AMSU)产品对印度若干城市的整层累积水汽以及若干层水汽逐年变化及显著性进行了研究<sup>[5]</sup>。可见,AIRS水汽产品具有较好的可靠性,越来越多的被用于水汽的研究。

采用AIRS和AMSU联合反演的AIRS L2标准反演水汽产品AIRX2RET V006资料,对淮北地区上空2006—2015年这十年间整层大气可降水量、若干层(1000~850、850~500、500~100 hPa)累积水汽月均值、季均值的年际变化进行了研究,并对水汽和温度的关系进行了研究。研究结果有助于认识淮北地区上空水汽分布规律,为淮北地区上空水汽资源评估提供参考。

## 1 数据选取和处理

分析数据来源于美国宇航局戈达德地球科学数据信息和服务中心发布的AIRS及AMSU联合反演的AIRS L2标准反演水汽产品AIRX2RET V006资料(2006—2015年)。AIRS共有2378个红外通道,覆盖了

3.74~15.4 μm 的光谱区间, 观测波段分别为 3.74~4.61、6.20~8.22、8.8~15.4 μm, 三个波段通道具有高光谱分辨率, 分别为 0.55、1.2、2.0 cm<sup>-1</sup>。AIRS 采用多通道、高分辨率的光栅分光红外探测技术, 可探测高精度的全球水汽、温度、甲烷、臭氧廓线以及整层大气可降水量等参量。AIRS 和 AMSU 联合反演 L2 标准产品, 每天有 240 景, 每景有 6 min 探测区域资料, 对应 AMSU-A 资料的 45 × 30 = 1350 个反演产品信息。AIRS L2 标准反演产品提供 28 个标准大气压层: 1100、1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、15、10、7、5、3、2、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1 hPa, 其中水汽廓线选取前 15 层 (1100~50 hPa)。在研究中考考虑气象预报分析中常用层, 对 1000~850、850~500 以及 500~100 hPa 层累积水汽研究水汽的垂直分布进行分析, 其累积水汽 ( $W_L$ , 单位: kg/m<sup>2</sup>) 利用不同层水汽质量混合比进行计算<sup>[5]</sup>, 计算公式为

$$W_L = \frac{1}{g} \left[ \sum_i v_i (p_i - p_{i-1}) \right] \times 0.1, \tag{1}$$

式中  $v_i$  是水汽质量混合比 (单位: g/kg),  $p_i$  和  $p_{i-1}$  是第  $i$  层和  $i-1$  层大气压,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  为重力加速度。图 1 为 AIRS.2006.01.01.055.L2.RetStd.v6.0.7.0.G13134230442.hdf 文件中整层大气可降水量和计算所得不同层 (1000~850、850~500、500~100 hPa) 的累积水汽分布。

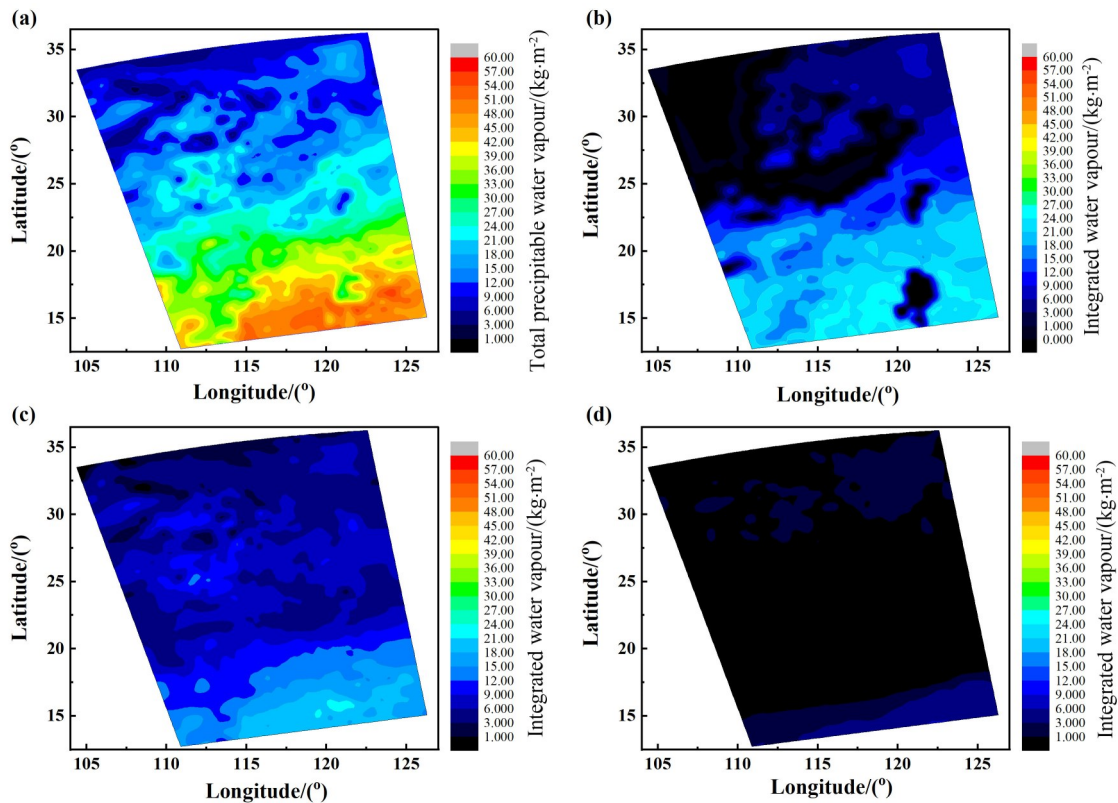


图 1 整层大气可降水量 (a) 及 1000~850 hPa (b)、850~500 hPa (c)、500~100 hPa (d) 层累积水汽

Fig. 1 Total precipitable water vapour (a), 1000-850 hPa (b), 850-500 hPa (c) and 500-100 hPa (d) layer integrated water vapour

AIRS L2 标准反演产品 AIRX2RET 中提供质量控制 0、1 和 2, 分别表示数据质量最好、好以及不建议使用。剔除野点以及质控为 2 的数据资料, 采用质控为 0 和 1 的数据资料进行研究。研究区域地理范围是北纬 32.5° N~35° N、东经 114.5° E~118.5° E, 主体位于安徽省淮北地区。按照气象中对季节的一般划分, 取春

季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月—次年2月)统计分析整层大气可降水量及不同层水汽含量季节变化特征。由于卫星轨道特性决定了某些时刻扫描点不能完全覆盖研究区域,存在一定空缺,故在分析月份和季节变化时取月均值和季均值进行研究。此外,为了分析四季整层大气可降水量和不同层累积水汽均值逐年变化,采用最小二乘法对其与时间进行一元线性回归( $Y = A + BX$ ,其中回归系数 $B$ 表示随时间的变化速率, $X$ 为时间)以保证误差最小。采用标准偏差(SD)描述整层大气可降水量和不同层累积水汽月均值逐年变化特征。在研究月平均整层大气可降水量逐年变化时,采用奇异谱分析方法<sup>[11]</sup>对该地区大气可降水量的变化规律进行研究。

## 2 整层大气可降水量时间分布特征

### 2.1 月均值年际变化

水汽作为影响全球能量收支和水循环的重要因素之一<sup>[12]</sup>,水汽含量和水资源的多少密切相关。空中水汽资源丰富,虽然只有部分通过云降水过程降落地面,但是空中水汽资源开发潜力巨大<sup>[13]</sup>。对于整层大气来说,大气水汽含量通常用大气可降水量来表征降水的潜能,因此了解大气可降水量的时间分布情况,是评估水汽资源、判断增雨潜力、抓住时机合理开展人影工作的重要基础。本研究对2006—2016年间淮北市整层大气可降水量的变化规律进行研究,图2为2006—2015年月平均整层大气可降水量逐年变化及其方差。采用奇异谱分析的方法对该地区整层大气可降水量随时间变化趋势进行研究,其拟合公式为

$$W = a + bt + c \sin(\omega t), \quad (2)$$

式中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为拟合值, $b$ 为线性增长项; $\omega$ 为固定的12个月的周期。如图2中红线表示正弦波曲线拟合的整层大气可降水量随时间的变化,灰线是趋势的线性回归,其方程均在图中给出。红线显示了拟合曲线与大多数观测值保持一致。且其线性增长项为 $-0.04$ ,结合趋势的线性回归(拟合斜率为 $-0.04$ ),可见整层大气可降水量逐年变化趋势是减小的。这和Wang等<sup>[14]</sup>对中国大陆大气可降水量的统计分析研究结果是一致的。同时,从图中可以看出,10年间月平均整层大气可降水量的方差均呈现7—9月份相对较大、其他月份相对较小的分布情况。可见,10年间月平均整层大气可降水量和季节密切相关。

为了了解整层大气可降水量十年间月均值的变化,本研究对10年间整层大气可降水量的月均值及其标准差分布情况进行分析,如图3所示,其中灰色光滑曲线为月均值的高斯分布。从图中可以看出,1月和12月份整层大气可降水量月均值标准差相对较小;7—9月标准差相对较大,其中9月最高,达到 $3.4 \text{ kg/m}^2$ 以上。另外,从图中也可以看出整层大气可降水量月均值呈高斯分布:5—9月份较高,在 $20 \sim 45 \text{ kg/m}^2$ 以上,七月份最高,达到 $45 \text{ kg/m}^2$ 。这和淮北市夏季集中降水,5—9月是汛期的情况一致。

总体来说,1月和12月整层大气可降水量年际变化较小,其他月份则年际变化较大。12月—次年1月整层大气可降水量为一年中最少时段,3—5月有所增加,6—8月达到最充沛,9—11月逐月下降。这是因为淮北市受夏季风和冬季风交替影响,夏季风带来湿润的水汽使得空气中的水汽含量达到最高,而冬季来自内陆的季风带来干燥寒冷的空气,使得空气中的水汽含量大幅下降。这和Wang等<sup>[11]</sup>对中国大陆地区1995—2012年的大气可降水量的统计结果一致:大气可降水量季节差异较大,由春季到冬季,先增大在减小,呈现夏季(6—8月)最大,冬季(12月—次年2月)最小。同时可以看出,整层大气可降水量总体上呈现夏季年际变化较大、秋季次之、春季小于秋季、冬季年际变化最小的年际变化特征。

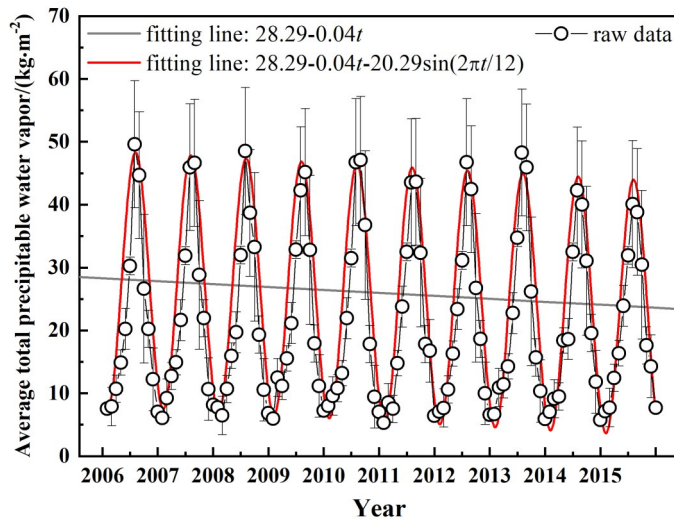


图 2 2006—2015 年月平均整层大气可降水量及其方差

Fig. 2 Monthly average of total precipitable water vapour and its variance from 2006 to 2015

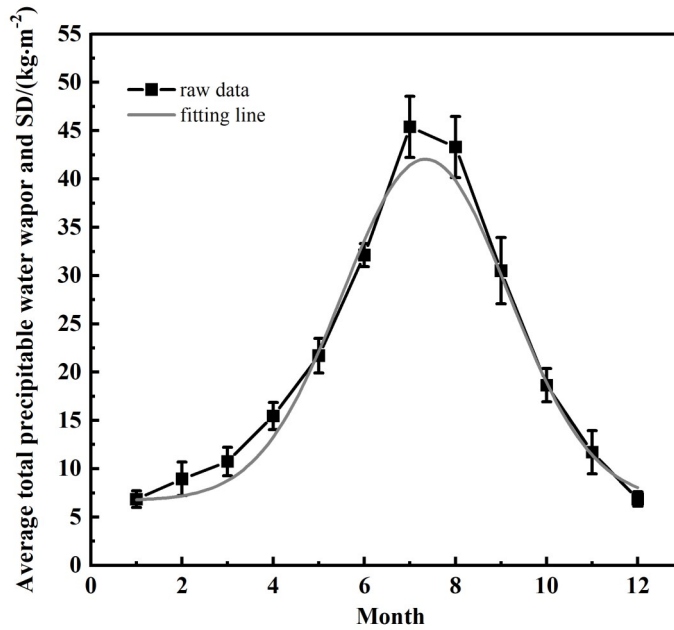


图 3 2006—2015 年整层大气可降水量月均值及其标准差分布

Fig. 3 The standard deviation distribution and monthly average of total precipitable water vapour from 2006 to 2015

### 2.2 季均值年际变化

由于整层大气可降水量和季节关系密切, 为了了解 10 年间淮北地区整层大气可降水量的季节变化情况, 对这期间四季整层大气可降水量逐年变化情况进行了分析, 如图 4 所示。从图中可以看出, 冬季平均整层大气可降水量四季中最低, 在  $7 \sim 8.5 \text{ kg/m}^2$  之间, 逐年变化较小; 春季较冬季有所增加, 在  $15 \sim 17.5 \text{ kg/m}^2$  之间, 逐年变化较小; 由于夏季风环流的影响, 来自热带印度洋和孟加拉湾的西南气流以及热带西太平洋和中国近海等地东南气流或自南向北输送的水汽输送, 使得夏季平均整层大气可降水量较高, 在  $35 \sim 45 \text{ kg/m}^2$  之间, 且逐年变化相对较大。当夏季风环流减弱, 副高位置偏南, 雨带会长期停留在长江流域, 造成长江中下游洪涝, 同时影响水汽北上输送; 当夏季风环流增强, 副高位置偏北, 便于水汽北上输送。淮北地区夏季大气可降

水量逐年变化情况可能是亚洲夏季风的变化导致水汽输送变化所致。秋季随着西风气流逐渐增强,夏季风减弱,水汽输送减弱,大气可降水量有所减小,在 $17\sim 23\text{ kg/m}^2$ 之间,逐年变化低于夏季且高于春冬季。

此外,从整层大气可降水量逐年线性变化来看,四季逐年变化有所不同,具体表现为:春冬无明显的逐年线性变化;夏季整层大气可降水量线性拟合斜率为负值,可见在2006—2015年间淮北地区夏季整层大气可降水量整体上逐年有所减小,这可能是由于近些年来东亚季风强度的减弱<sup>[15,16]</sup>使得来自洋面输送到陆地的水汽减少,从而导致整层大气可降水量减少;在2006—2011年秋季整层大气可降水量线性拟合斜率为正值,且 $R^2$ 为0.81,线性拟合度较好。可见,2006—2011年秋季整层大气可降水量逐年以 $0.433\text{ kg/m}^2$ 的速度线性增加。而2012年和2013年秋季由于大气环流异常影响水汽输送<sup>[17,18]</sup>,造成整层大气可降水量低,干旱少雨。

综上所述,2006—2015年间安徽淮北地区上空整层大气可降水量从春季到冬季先增加后减小,呈现夏季高>秋季>春季>冬季的季节分布。同时,10年间夏季整层大气可降水量逐年变化相对较大,且呈现线性减小趋势;秋季逐年变化较之略小,且2006—2011年秋季呈现较为明显的逐年线性增加;春、冬两季逐年变化相对较小,逐年线性变化不明显。

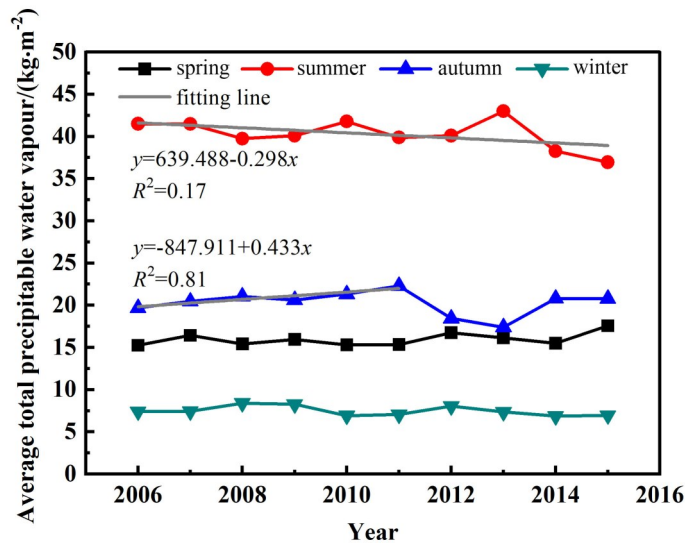


图4 2006—2015年四季整层大气可降水量逐年变化

Fig. 4 Seasonal averages of total precipitable water vapour vary with year from 2006 to 2015

### 3 不同层累积水汽时间分布特征

#### 3.1 月均值年际变化

上述研究可见,整层大气可降水量有明显的月份、季节分布和年际变化特征。为了进一步研究空中水汽的分布特征,将从垂直尺度上根据气象预报分析中常考虑层(1000、925、850、700、500、200、100 hPa)结合人工增雨作业要考虑的作业高度,利用AIRS + AMSU标准反演水汽产品,对1000~850、850~500、500~100 hPa层累积水汽进行研究,分析不同层累积水汽的时间分布特征。图5为2006—2015年这10年间1000~850、850~500、500~100 hPa层累积水汽月均值及标准差分布情况,其中光滑曲线为三层累积水汽月均值的高斯分布。从图中可以看出,和整层大气可降水量一样,三层累积水汽逐月均呈高斯分布:5—9月份该层水汽含量较其他月份较高,七月份达到峰值。且从垂直方向上看,1000~850、850~500、500~100 hPa层累积

水汽呈现低层高于高层, 水汽主要集中在 500 hPa 以下中低层。同时从图中可以看出, 对于 1000~850 hPa 和 850~500 hPa 层累积水汽, 1 月份和 12 月份累积水汽月均值标准差较小; 7~9 月份标准差较大, 且总体上 3~5 月份标准差相对 9~11 月份较小。对于 500~100 hPa 层累积水汽, 6~9 月份标准差较高, 其他月份则相对较小。

基于上述分析可见, 2006~2015 年这 10 年间 1000~850 hPa 和 850~500 hPa 层累积水汽呈现夏季逐年变化较大、秋季次之、春季小于秋季、冬季逐年变化四季最小的逐年变化特征, 和四季整层大气可降水量年际变化特征一致。500~100 hPa 层累积水汽呈现夏季逐年变化较大、其他季节逐年变化较小的逐年变化特征。

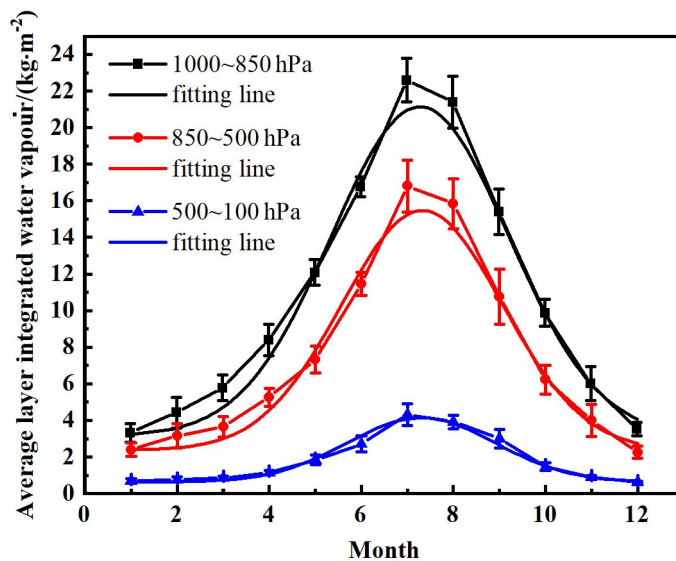


图5 2006—2015年不同层累积水汽月均值及其标准差分布

Fig. 5 The standard deviation distribution and monthly average of different layer integrated water vapour from 2006 to 2015

### 3.2 季均值年际变化

图6为2006~2015年这10年间不同层四季累积水汽逐年变化情况。从图中可以看出, 对于1000~850 hPa层, 春季平均累积水汽在8~9.5 kg/m<sup>2</sup>之间; 夏季在18.5~21.5 kg/m<sup>2</sup>之间; 秋季在9.5~11 kg/m<sup>2</sup>之间; 冬季在4 kg/m<sup>2</sup>左右。对于850~500 hPa层, 春季平均累积水汽在5~6 kg/m<sup>2</sup>之间; 夏季在13~16 kg/m<sup>2</sup>之间; 秋季在5.5~7.5 kg/m<sup>2</sup>之间; 冬季在2~3 kg/m<sup>2</sup>之间。1000~850 hPa层和850~500 hPa层均呈现夏季逐年变化较大、秋季次之、春冬季逐年变化相对较小的特点。对于500~100 hPa层, 春季平均累积水汽在1~1.5 kg/m<sup>2</sup>之间, 冬季在0.5~0.8 kg/m<sup>2</sup>之间, 两季平均累积水汽逐年变化较小; 夏、秋两季平均累积水汽逐年变化相对较大, 分别在3~4 kg/m<sup>2</sup>和1.5~2.5 kg/m<sup>2</sup>之间。从逐年线性变化上来看, 春、冬季三层累积水汽没有呈现明显的逐年线性变化; 夏季线性拟合斜率为负值, 总体线性减小; 1000~850 hPa和850~500 hPa层在2006~2011年秋季累积水汽线性拟合斜率为正值, 且R<sup>2</sup>分别为0.58和0.85, 拟合度较好。可见, 1000~850 hPa和850~500 hPa层在2006~2011年秋季累积水汽分别以每年0.122 kg/m<sup>2</sup>和0.208 kg/m<sup>2</sup>的速度增加。此外, 三层累积水汽在2012年和2013年秋季较少, 该特点和上述整层大气可降水量偏少的结论一致。

综上分析, 按照时间轴从不同层上说, 1000~850、850~500、500~100 hPa层累积水汽四季分布和整层大气可降水量一致: 夏季较高, 秋季次之, 春季较冬季高, 冬季最低。同时, 夏季逐年变化相对较大, 且呈线性减小趋势; 秋季次之, 且除500~100 hPa层外, 2006~2011年其他层均呈现逐年线性增大; 春冬两季逐年变化

较小,且无明显线性变化。这与整层大气可降水量的分析结果一致。

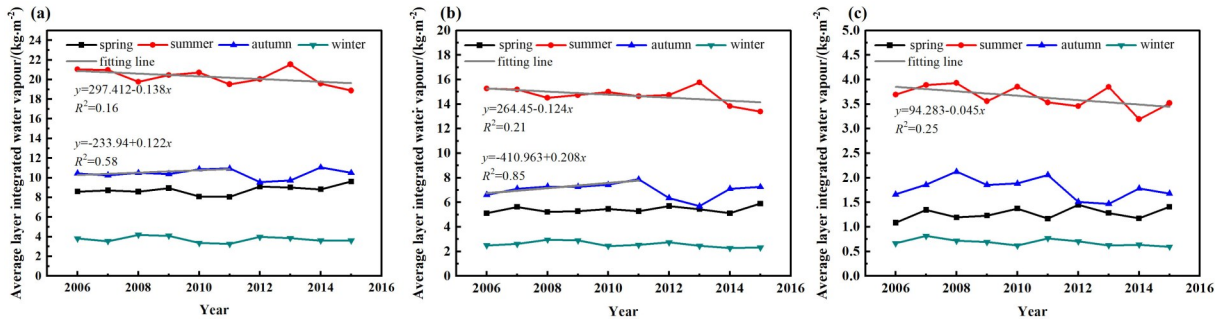


图6 2006—2015年四季不同层平均累积水汽逐年变化。(a) 1000~850 hPa; (b) 850~500 hPa; (c) 500~100 hPa

Fig. 6 Seasonal averages of different layer integrated water vapour vary with year from 2006 to 2015. (a) 1000-850 hPa; (b) 850-500 hPa; (c) 500-100 hPa

#### 4 水汽和温度的关系

根据克拉伯龙克劳修斯方程,水汽是温度的函数。为了探讨水汽和温度之间的关系,分析研究月平均整层大气可降水量和整层大气柱平均气温的关系以及文中三层累积水汽和对应层平均气温的关系,如图7(a)所示,图7(b)则为两者四季对应关系。从图中可以看出,整层大气可降水量及三层累积水汽和对应的气温间均呈正相关性,随气温的升高而增大。夏季气温较高,大气中水汽含量较高,冬季则相反[如图7(b)]。这是因为水汽主要来源于海洋表面的蒸发。相对冬季来说,夏季海洋表面的蒸发较强,来自副热带洋面的蒸发提供了大量的水汽,经大气环流进行输送。可见除了受大气环流的影响外,温度的季节变化也影响水汽的季节分布。

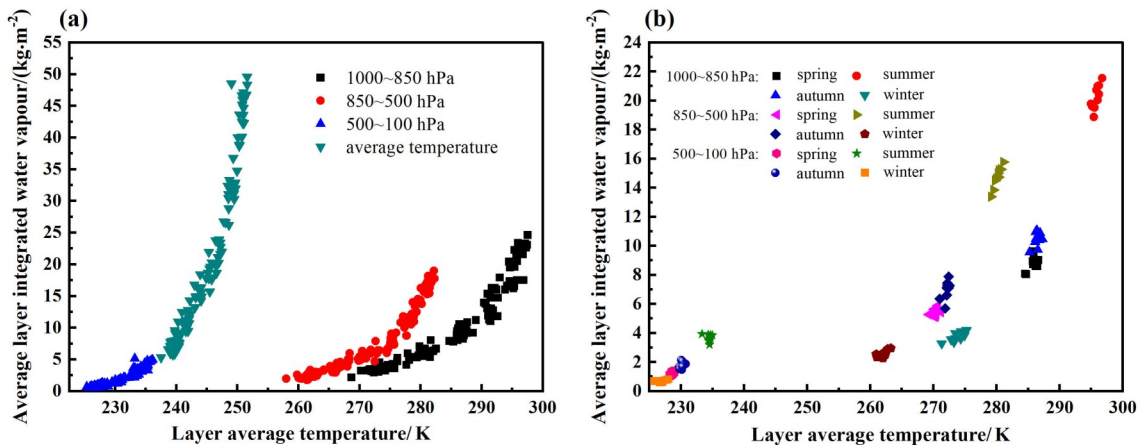


图7 2006—2015年水汽和温度的关系(a)及四季变化(b)

Fig. 7 Relationship between column temperature and water vapour from 2006 to 2015 (a) and seasonal variation (b)

#### 5 结论

基于AIRS和AMSU联合反演的2006—2015年AIRS L2标准反演产品AIRX2RET V006资料,对安徽淮



了水汽随温度的变化关系情况。研究发现:

1) 2006—2015年淮北地区上空月平均整层大气可降水量呈现逐年减小的趋势。四季呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季的季节分布。同时,10年间夏季整层大气可降水量逐年变化相对较大,且呈线性减小趋势;秋季逐年变化较之略小,且2006—2011年秋季呈现较为明显的逐年线性增加;春、冬两季逐年变化相对较小,逐年线性变化不明显。

2) 按照时间轴从不同层上来说,1000~850、850~500、500~100 hPa层累积水汽四季分布和整层大气可降水量一致:夏季较高,秋季次之,春季较冬季高,冬季最低;夏季逐年变化相对较大,且呈线性减小趋势;秋季次之,且除500~100 hPa层外,2006~2011年呈现逐年线性增大的趋势;春、冬两季逐年变化较小,且无明显线性变化。

3) 整层大气可降水量和大气柱平均气温以及三层累积水汽和对应层的平均气温之间均呈正相关,水汽随气温的升高而增加。温度的季节变化影响水汽的季节分布。

此外,在云和降水形成过程中,云滴和冰晶是形成降水的基本要素,也是人工影响降水的主要微观对象。而云滴和冰晶的形成离不开水汽。水汽在凝结核上聚集形成液态水滴,在凝华核上聚集形成冰晶。水汽通过大气环流输送,上升凝结形成水云或冰云,成为人工影响天气的对象。通过文中的分析,春、冬两季淮北地区水汽含量较低,夏季最高,秋季次之,可见夏季云水条件较好,人影条件较好,可根据淮北地区的实际需要开展人影作业;春、冬两季云水条件一般,人影条件一般,就需要人影部门抓住有利时机来开展人影作业。

本研究工作采用了AIRS和AMSU联合反演的L2标准反演产品AIRX2RET数据资料,考虑到数据的质量控制对质量差的数据进行了剔除,但由于卫星的轨道特性决定了在某些时刻扫描点不能完全覆盖本研究区域,存在一定空缺,故未对水汽的区域分布特征进行研究。水汽的区域分布特征有待于联合多源数据进行下一步的研究。

## 参考文献:

- [1] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R, *et al.* Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from *in situ* observations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(1): 64-85.
- [2] Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, *et al.* Characteristics of the water vapor transport in east Asian monsoon region and its difference from that in south Asian monsoon region in summer [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 460-469.  
黄荣辉,张振洲,黄刚,等.夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J].大气科学,1998,22(4): 460-469.
- [3] Tang R M, Chen Y Y, Ye J Y. The comparison of water vapor content retrieved by radiosonde, ground station and satellite data [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(3): 373-377.  
唐仁茂,陈英英,叶建元.探空、地面及卫星资料反演水汽含量的比较[J].气象科学,2010,30(3): 373-377.
- [4] Moradizadeh M, Momeni M, Saradjian M R. Estimation and validation of atmospheric water vapor content using a MODIS NIR band ratio technique based on AIRS water vapor products [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(5): 1891-1897.
- [5] Jindal P, Thapliyal P K, Shukla M V, *et al.* Trend analysis of atmospheric temperature, water vapour, ozone, methane and carbon-monoxide over few major cities of India using satellite data [J]. *Journal of Earth System Science*, 2020, 129(1): 1-17.

- [6] Chahine M T, Pagano T S, Aumann H H, *et al.* AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(7): 911-926.
- [7] Randel W J, Park M. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D12): D12314.
- [8] Zhan R F, Li J P. Validation and characteristics of upper tropospheric water vapor over the Tibetan Plateau from AIRS satellite retrieval [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 242-260.  
占瑞芬, 李建平. 青藏高原地区大气红外探测器 (AIRS) 资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征 [J]. *大气科学*, 2008, 32(2): 242-260.
- [9] Zhang X Q, Li M J, Sun T. Spatiotemporal variation of water vapor in upper troposphere over central Asia based on AIRS satellite retrieval [J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(6): 951-957.  
张雪芹, 李敏姣, 孙通. 大气红外探测器 (AIRS) 资料揭示的中亚地区上对流层水汽时空变化特征 [J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 951-957.
- [10] Zhang X C, Zhao J, Wang K, *et al.* Study on temporal and spatial law of air water vapor in Qinghai Province based on AIRS data [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(2): 264-274.  
张祥成, 赵杰, 王开, 等. 基于 AIRS 资料的青海省空中水汽时空规律研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(2): 264-274.
- [11] Wang X M, Zhang K F, Wu S Q, *et al.* Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(2): 833-852.
- [12] Naud C M, Miller J R, Landry C. Using satellites to investigate the sensitivity of longwave downward radiation to water vapor at high elevations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5): D05101.
- [13] Li X Y, Guo X L, Zhu J. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1094-1106.  
李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势 [J]. *大气科学*, 2008, 32(5): 1094-1106.
- [14] Wang R, Fu Y F, Xian T, *et al.* Evaluation of atmospheric precipitable water characteristics and trends in mainland China from 1995 to 2012 [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(21): 8673-8688.
- [15] Ding Y H, Sun Y, Liu Y Y, *et al.* Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 253-280.  
丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 253-280.
- [16] Lu D R, Yang Y J, Fu Y F. Interannual variability of summer monsoon convective and stratiform precipitations in East Asia during 1998–2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(10): 3507-3520.
- [17] 段海霞, 王素萍, 冯建英. 2012 年全国干旱状况及其影响与成因 [J]. *干旱气象*, 2013(1): 220-229.
- [18] 段海霞, 王素萍, 冯建英. 2013 年全国干旱状况及其影响与成因 [J]. *干旱气象*, 2014(2): 310-316.