

doi:10.3788/gzxb20144310.1001003

基于成像光谱仪 MODIS 的近十年武汉水汽含量变化分析

张金业^{1,2}, 于秀丽^{1,2}, 吕辉^{1,2}, 朱进容^{1,2}

(1 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

(2 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 武汉 430068)

摘 要:应用中分辨率成像光谱仪近红外通道数据进行大气水汽含量反演.采用三通道比值加权平均法用于武汉地区大气水汽含量反演,将反演结果与 EOS 发布的水汽产品进行对比,验证了该反演算法的可信性.借助遥感影像处理软件 ENVI,利用三通道比值加权平均法反演了武汉地区近十年(2001-2011)的大气水汽含量,结合武汉地区实际地理位置、气候条件和城市发展现状,分析了武汉地区大气水汽含量变化.结果表明:武汉地区大气水汽含量在秋季和冬季呈明显减少趋势.借助统计软件 SPSS 对中分辨率成像光谱仪反演的大气水汽含量与地面气象探测因子气压、气温和相对湿度之间做回归分析,结果表明:大气水汽含量与气温呈正相关,气压呈负相关,和相对湿度的相关性不大,但在温度一定时,两者呈正相关.

关键词:遥感;中分辨率成像光谱仪;水汽含量;回归分析;气象因子

中图分类号:P412.27

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)10-1001003-6

Analysis of Atmospheric Precipitable Water Vapor over Wuhan Based on MODIS Data in Recent Ten Years

ZHANG Jin-ye^{1,2}, YU Xiu-li^{1,2}, LÜ Hui^{1,2}, ZHU Jin-rong^{1,2}

(1 School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2 Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The algorithm for retrieving atmospheric Precipitable Water Vapor (PWV) was introduced by several Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-IR channels. Three-channel ratio weighting method is applicable for water vapor retrieval over Wuhan by comparing several commonly used algorithms. The credibility of the algorithm is verified in contrast to the EOS water vapor products. The PWV in recent ten years (2001-2011) over Wuhan were analyzed by the three-channel ratio weighting method with the aid of remote sensing image processing software ENVI combined with actual geographical location, climate conditions and urban status of the development. The results show that the PWV over Wuhan has a distinct decreasing trend in the autumn and winter. With the help of scientific statistical software SPSS, unary regression model was used to analyze the relationship between the MODIS derived PWV and ground-based meteorological factors, such as temperature, pressure and relative humidity. The results show that PWV derived from MODIS has positively correlated with temperature, negatively correlated with pressure, has little correlation with relative humidity, except that when the temperature is the same, in which condition the two are positively related.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 41301372)、湖北省自然科学基金(No. 2012FFB00704)、测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(No. 12R01)、湖北省教育厅科研计划项目(No. B20121403)和博士科研启动项目(No. BSQD12079)资助

第一作者:张金业(1981-),女,讲师,博士,主要研究方向为激光大气遥感. Email: zhangjinye@mail.hbut.edu.cn

通讯作者:于秀丽(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学遥感. Email: yuxiuli1114@163.com

收稿日期:2014-05-07; **录用日期:**2014-07-17

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Remote sensing; MODIS; Precipitable water vapor; Regression analysis; Meteorological factors

OCIS Codes: 010.0010; 010.0280; 010.1320; 010.7340

0 引言

大气水汽又称大气可降水量(Precipitable Water Vapour, PWV),其在大气中所占的比例很小,仅0.1%~3%,却是大气组分中最活跃的成分,它随着温度、气压、时间、空间的变化而剧烈变化^[1].水汽不仅是成云致雨的条件,还影响着辐射的平衡、能量的输送,与天气变化和自然灾害的发生直接相关,也是研究气溶胶反演和地表温度反演等的输入参量^[2].

探测大气水汽的方法有地基微波辐射计,无线电探空仪和激光雷达等,但是这些探测方法有价格昂贵、时空分辨率低、不能实现全天候观测等缺点^[3].光学卫星遥感技术的发展为探测大气水汽含量提供了新的手段.遥感影像由于具有信息量大、几何性质稳定、方便使用等特点得到广泛应用^[4].

按照使用通道的不同,大气水汽遥感反演方法分为热红外方法、近红外方法和微波法三种.其中最常用的是近红外法,这种方法又分为两通道比值法和三通道比值法^[5].

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)是搭载在地球观测系统(Earth Observing System, EOS)系列卫星Terra和Aqua上的对地观测仪器. MODIS是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有36个光谱通道,波谱范围在0.4~14.2 μm,分别针对陆地、海洋、大气等波谱特征设计. MODIS的地面分辨率分别为250、500和1 000 m,扫描宽度2 330 km. MODIS是对AVHRR、高分辨率红外垂直探测仪(High Resolution Infrared Sounder, HIRS)等仪器的改进,沿用的是传统成像辐射计的思想,由横向扫描镜、光收集器件、一组线性探测器阵列和位于4个焦平面上的光谱干涉滤色镜四个部分组成^[7].

本文应用MODIS近红外水汽通道数据对武汉地区2001-2011年的大气水汽含量进行反演,分析水汽含量的变化趋势及水汽含量和地面气象因子的相关性.

1 应用MODIS进行水汽反演的原理

1.1 PWV的定义

表示大气水汽的物理量通常有两个^[8]:一个是对高度积分的水汽含量(Integrated Water Vapor, IWV),即单位面积上的水汽的质量,其在高度上理解为无限往上的延伸.另一个是大气可降水汽

(Precipitable Water Vapor, PWV).它相当于同样水汽含量的水柱高,可理解为某一时刻大气中的水汽在达到饱和时凝结成水全部降落后生成的降水量.即

$$PWV = \frac{IWV}{\rho_w} \quad (1)$$

式中 ρ_w 是液态水的密度.在遥感反演中,大气可降水汽定义为:单位面积上,沿卫星天顶角方向从地表到大气层顶的所有水汽,凝结后的水柱高度.即1 cmPWV对应为1 g/cm²的水汽柱.

1.2 反演算法思路

传统上,水汽廓线是利用红外发射辐射通道的观测辐射值进行反演,反演的结果很大程度上取决于最初选择的温度和湿度廓线.洋面上气柱可降水量可利用11~13 μm的大气窗区通道及微波发射通道的测量辐射值进行反演.对于绿色植被覆盖的陆面,采用分裂窗技术也可取得较好的反演结果,但当由地面反射率和近地面温度反演的地面温度与边界层的平均温度近似时(边界层是水汽的主要集中地),红外和微波通道的遥感辐射就对边界层中的水汽不再敏感^[9].

应用MODIS近红外通道数据遥感反演大气水汽方法的基础是利用经地面反射的太阳辐射检测水汽对辐射的吸收大小.总水汽量可用水汽的吸收通道和邻近的非吸收通道间反射的太阳辐射差值获得,即辐射差分吸收原理. Kaufman和Gao^[10]已对上述反演算法有了具体的描述. King等^[11]对利用MODIS数据反演气溶胶、云和水汽的吸收方法也进行过描述.

近红外波段的太阳辐射对整层大气水汽含量具有较高的敏感性. Kaufman和Gao在MODIS的算法研究^[10-12]中,提出了一种利用太阳近红外反射光反演大气水汽含量的光学遥感技术,主要思路是:太阳辐射经地表反射后再经大气水汽的衰减到达传感器,通过比较吸收通道和窗口通道的测量值消除地表反射的影响,得到不同通道间水汽对太阳辐射吸收的差异,再结合辐射传输模型,估算总的水汽含量.该技术在MODIS的实际观测中得到了应用,且相对于热红外技术可更加准确地计算大气下边界层内的水汽含量.

1.3 反演通道的选取

由表1和图1可知,MODIS近红外波段17、18、19附近具有强水汽吸收特性,是大气吸收通道,MODIS波段2和5附近大气透过率大于0.99,接近1,这两个波段作为大气窗口波段.因此,可以通过水汽吸收通道和大气窗口通道的比值来获取大气水汽含量^[13].

表 1 MODIS 中用于反演水汽的近红外五个通道的位置和宽度

Table 1 Positions and widths of five MODIS near-IR channels used in water vapor retrievals

MODIS channel	Position/ μm	Width/ μm
2	0.865	0.040
5	1.240	0.020
17	0.905	0.030
18	0.935	0.010
19	0.940	0.050

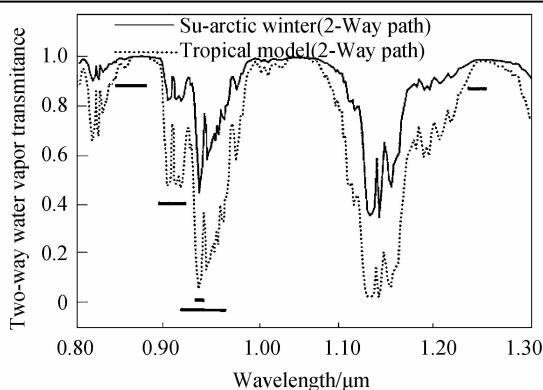


图 1 MODIS 5 个近红外通道的位置和宽度 (图中的水平条)^[10]

Fig.1 Positions and widths of five MODIS near-IR channels marked in thick horizontal bars^[10]

1.4 反演算法

传感器接收到的辐射包括:经地表反射和大气透射后到达传感器的太阳辐射,大气路径中分子、气溶胶的散射辐射^[14]。

因此传感器接收到的辐射表示为

$$L_{\text{sensor}}(\lambda) = L_{\text{sun}}(\lambda)\tau(\lambda)\rho(\lambda) + L_{\text{path}}(\lambda) \quad (2)$$

式(2)即辐射传输方程, λ 代表波长; $L_{\text{sensor}}(\lambda)$ 是传感器接收到的测量辐射; $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 是大气上界的太阳辐射; $\tau(\lambda)$ 是整层大气的透过率(由于在近红外区域其它气体的吸收相对于水汽很小,所以把 $\tau(\lambda)$ 看作仅是水汽含量的函数); $\rho(\lambda)$ 是地表的反射率; $L_{\text{path}}(\lambda)$ 是路径中分子、气溶胶的散射辐射,在近红外区域主要受到单次散射和多次散射的影响。

因气溶胶光学厚度在近红外光谱区很小,散射作用很小,以至可以忽略,故上式简化为

$$L_{\text{sensor}}(\lambda) = L_{\text{sun}}(\lambda)\tau(\lambda)\rho(\lambda) \quad (3)$$

卫星某通道的星上反射率为

$$\rho^*(\lambda) = L_{\text{sensor}}(\lambda)/L_{\text{sun}}(\lambda) \quad (4)$$

MODIS 近红外第 i 通道 ($i = 2, 5, 17, 18, 19$) 的大气辐射传输方程可表示为

$$\rho^*(\lambda_i) = \tau(\lambda_i)\rho(\lambda_i) \quad (5)$$

如果地面的反射率不随波长变化,即 $\rho(\lambda) = \rho$,则可得

$$\frac{\tau(\lambda_1)}{\tau(\lambda_2)} \approx \frac{\rho^*(\lambda_1)}{\rho^*(\lambda_2)} \quad (6)$$

即两通道大气透过率的比值约为二者星上反射率之比.若 λ_1 为水汽的吸收通道, λ_2 为大气窗口通道($\tau(\lambda_2) \approx 1$),则有

$$\tau(\lambda_1) \approx \frac{\rho^*(\lambda_1)}{\rho^*(\lambda_2)} \quad (7)$$

此即两通道比值法

若表面反射率 $\rho(\lambda)$ 随波长变化,则两通道比值法不再适用.根据 Gao 和 Kaufman 对 $0.85 \mu\text{m}$ 到 $1.25 \mu\text{m}$ 间各种地物反射率进行分析发现,此光谱区间反射率基本满足线性关系^[10-12]。

假定 λ_1 为水汽吸收通道, λ_2 和 λ_3 为大气窗区通道($\tau(\lambda_2) \approx 1, \tau(\lambda_3) \approx 1$),且有

$$\rho(\lambda_1) = C_1\rho(\lambda_2) + C_2\rho(\lambda_3) \quad (8)$$

则由式(5)和式(8)得

$$\tau(\lambda_1) \approx \frac{\rho^*(\lambda_1)}{C_1\rho^*(\lambda_2) + C_2\rho^*(\lambda_3)} \quad (9)$$

此即三通道比值法

令 λ_1, λ_2 和 λ_3 分别为第 19, 2 和 5 波段,则有

$$\tau_{19} \approx \frac{\rho_{19}^*}{\rho_2^*} \quad (10)$$

$$\tau_{19} \approx \frac{\rho_{19}^*}{C_1\rho_2^* + C_2\rho_5^*} \quad (11)$$

式中, $C_1 = 0.8, C_2 = 0.2$ 。

对于透过率与水汽含量的关系,Kaufman 和 Gao Bo-Cai^[10]利用 LOWTRAN 模拟出两者之间的关系为^[12]

$$\tau = \exp(\alpha - \beta\sqrt{W}), R^2 = 0.999 \quad (12)$$

系数 α, β 与太阳天顶角、卫星天顶角等因素有关,对于复合型地表,式中 $\alpha = 0.02, \beta = 0.651$

R 为相关系数,通道辐射比可以从影像文件中算出,解式(12)得到水汽含量表达式为

$$W = \left(\frac{\alpha - \ln \tau}{\beta} \right)^2 \quad (13)$$

在 MODIS 的 $0.935 \mu\text{m}, 0.940 \mu\text{m}$ 和 $0.905 \mu\text{m}$ 通道上水汽有不同的吸收系数.因而在相同大气环境下,三个波长对水汽吸收有不同的敏感度. $0.935 \mu\text{m}$ 强吸收带在干燥条件下对水汽最敏感,而 $0.905 \mu\text{m}$ 弱吸收带在湿润条件下对水汽最敏感。

在给定大气条件下,从三个不同的通道反演的水汽值是有差别的,平均水汽含量 W 为^[10,13]得到

$$W = f_{17}W_{17} + f_{18}W_{18} + f_{19}W_{19} \quad (14)$$

W_{17}, W_{18}, W_{19} 分别是计算得到的 17, 18, 19 通道的水汽值, f_{17}, f_{18}, f_{19} 是相应的权重函数。

目前所用的权重函数是根据通道上透射率 τ_i 对可降水总量的敏感性计算.权重函数为^[10]

$$f_i = \frac{\eta_i}{\eta_{17} + \eta_{18} + \eta_{19}} \quad (15)$$

$$\eta_i = |\Delta\tau_i / \Delta W| \quad (16)$$

η_i 可以采用对大气透过率与大气水汽含量的数值模拟曲线求导的方法获取, 计算得到 f_{17} 、 f_{18} 、 f_{19} 的值分别是 0.189、0.242、0.569, 即

$$W = 0.189W_{17} + 0.242W_{18} + 0.569W_{19} \quad (17)$$

可知, 19 通道占的权重最大, 17 通道占的权重最小.

在反演水汽时, 通常只反演无云地区的, 而且在反演时, 对于陆地区域使用 3 波段比值法, 对于洋面耀斑区域使用 2 波段比值法^[10,13].

赵有兵将得到的两通道比值加权法和三通道比值加权法的大气水汽和站点 SONDE 大气可降水汽进行比较分析发现, 三通道比值加权法的可靠性更高^[9]. 代强玲等通过对比分析发现三通道法比二通道法反演的效果更接近 MOD05 标准水汽产品, 且对三个通道的水汽进行加权平均所得到的水汽效果更好^[15]. 所以本文采用三通道比值加权法反演武汉地区的大气水汽含量.

2 区域、数据处理及可行性分析

2.1 武汉地理位置及气候特点

武汉地处东经 $113^{\circ}41'$ ~ $115^{\circ}05'$, 北纬 $29^{\circ}58'$ ~ $31^{\circ}22'$, 位于中国腹地中心、湖北省东部、长江与汉江交汇处, 是全国特大城市和重要的交通枢纽^[16].

武汉地处北回归线北侧, 属北亚热带季风性(湿润)气候, 具有常年雨量充沛、热量充足、雨热同季、光热同季、冬冷夏热、四季分明等特点. 年平均气温 15.8°C ~ 17.5°C , 1 月平均气温最低为 0.4°C , 7、8 月平均气温最高为 28.7°C . 武汉夏季长达 135 天, 又地处内陆、远离海洋, 盆地地形, 故聚热容易散热比较难; 湖泊较多, 加上城市热岛效应, 为副高压控制, 十分闷热, 和南京、重庆并称中国三大火炉^[16].

2.2 数据来源与处理

所用的数据包括 MODIS 遥感数据和地面探测的气象数据两类. MODIS 遥感数据是免费下载获取的, 气象数据是查阅武汉地方年鉴获得的.

借助遥感影像处理软件 ENVI 将下载的 MODIS 影像数据进行几何校正, 在此基础上由图像元数据的 DN 值计算表观反射率, 再利用三波段比值加权平均法反演大气水汽含量值. 本文的研究从 2001 年开始到 2011 年每隔一年对武汉地区的大气水汽含量变化做出分析.

2.3 算法正确性验证

选择 2007 年 1 月份的 Terra-MODIS 影像数据反演 PWV, 将试验反演的结果和 EOS 发布的同期 2 级大气水汽产品进行比较, 31 天的水汽含量值的对比如图 2.

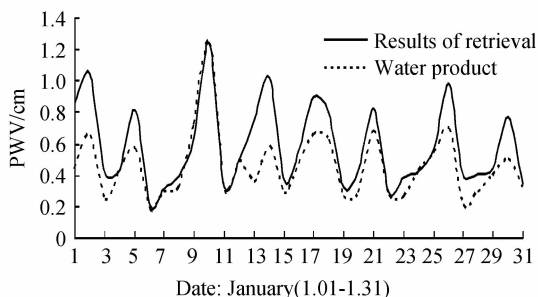


图 2 MODIS 数据反演的水汽含量和 EOS 水汽产品的对比
Fig. 2 Comparison of water vapor from MODIS with EOS water vapor product

由图 2 可知, 应用 MODIS 数据进行反演得到的大气水汽含量和 EOS 发布的水汽产品基本一致, 只是在某些天有差距, 这是因为在这些天中云量比较大, 影响了大气水汽含量值的获取. 但是这些差距并不影响本文的可信度, 因此这种方法反演大气水汽含量是可行的.

3 结果分析

3.1 大气水汽含量的月、季变化

由图 3 可知, 冬季各月(12 月到 2 月)的大气水汽含量较低, 在 1 cm 以下. 进入 3 月后水汽含量开始逐月增加, 直到 7、8 月份达到最大值. 这是因为武汉属于亚热带季风性湿润气候区, 7、8 月份正处于夏季, 雨量充沛, 气温较高, 所以水汽含量达到高峰. 8 月之后水汽含量开始逐月减少.

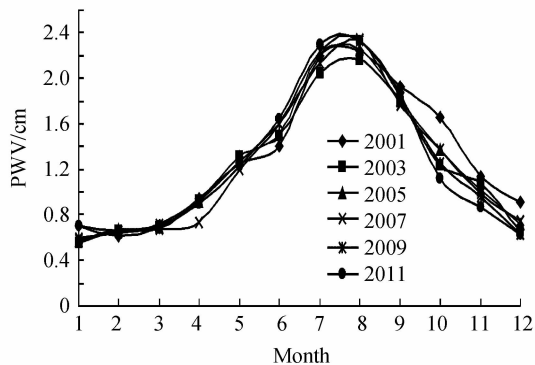


图 3 武汉地区大气水汽含量的月变化(2001-2011 年)
Fig. 3 Monthly changes of atmospheric water vapor content over Wuhan(2001-2011)

近 10 年中 1~3 月份的水汽含量变化不大, 2007 年的 4 月份水汽含量偏低, 2001 年的 6 月份水汽含量偏低, 7、8 月份的水汽含量变化也不大, 但是进入九月份后, 相比 2001 年的水汽含量, 后几年的水汽含量逐年下降.

由图 4 可知, 武汉地区水汽含量的变化十分明显, 在夏季达到水汽含量的峰值, 这与武汉地区所属的亚

热带季风性湿润气候相一致;在冬春两季水汽含量的值相对比较低,纵观 2001 年以来的水汽含量变化可以清晰地看到,在秋、冬两季水汽含量的减少较为明显.

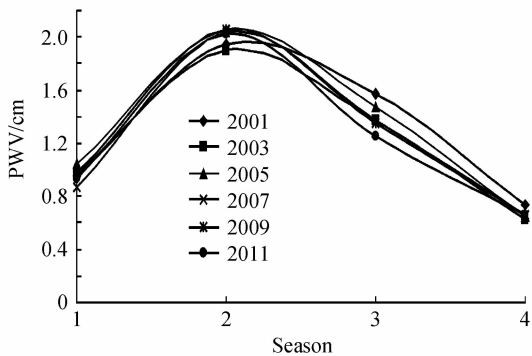


图 4 武汉地区大气水汽含量的季变化(2001-2011 年)
Fig. 4 Seasonal changes of atmospheric water vapor content over Wuhan(2001-2011)

大气中的水汽主要来自江河、湖泊、海洋的水分蒸发,植物的散发以及其他含水物质的蒸发.高温有利于水分的蒸发,所以在温暖的大片水域附近,水汽含量较高.地形、气候条件、植被覆盖面、离水汽源的远近使局部地区的水汽含量在水平方向上有很大差异^[1].

武汉地区水资源丰富,江河纵横,河港沟渠交织,府河、倒水、举水、金水、东荆河等从市区两侧汇入长江,形成了以长江为干流的庞大水网,全市总水域面积达到 2187 平方公里,占市域面积的 25.8%^[16].从图 3 和图 4 可知秋、冬季水汽含量的减少比较明显,秋冬季时植物大都凋零,水汽大部分来源于江河、湖泊水分的蒸发.江河湖泊面积的减少一个主要的原因是近年来城市人口不断增加,土地利用也相应增加,不少开发商开始填湖导致了水域面积的减少;另外一个原因是水域污染严重导致了水域面积的萎缩.据 2010 年武汉市水务局的调查数据显示,近 30 年来武汉湖泊面积减少了 228.9 平方公里,50 年来近 100 个湖泊人间“蒸发”,中心城区仅存的 38 个湖泊,还面临着继续被侵蚀的危险.

3.2 大气水汽含量与气象因子的相关性分析

选用月平均气温、气压、相对湿度、三类气象因子,联合上述计算的月平均水汽含量进行相关性分析研究.

选取 2007 年的数据进行回归分析^[17].由图 5 可知,大气水汽含量和气温的相关性较高, R^2 达 0.875,大气水汽含量和气温呈正相关.主要是由于武汉地区河流湖泊比较多,温度升高时蒸发加快,导致大气水汽含量增加.

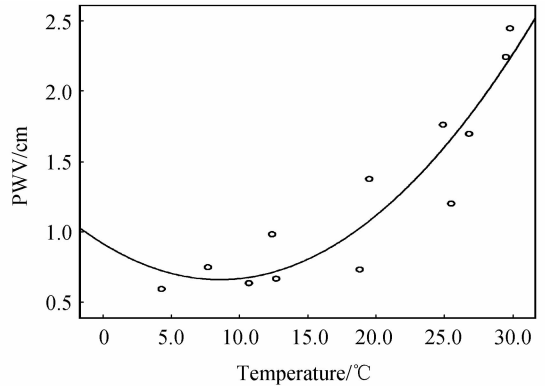


图 5 水汽含量与气温的相关性
Fig. 5 The correlation of water vapor content with temperature

由图 6 可知,武汉地区大气水汽含量和气压的相关性也较高, R^2 达 0.667,大气水汽含量和气压呈现负相关,这主要是因为武汉地区受副热带高压控制,气压的增加在一定程度上抑制了地表水分的蒸发,导致了大气水汽含量减少.

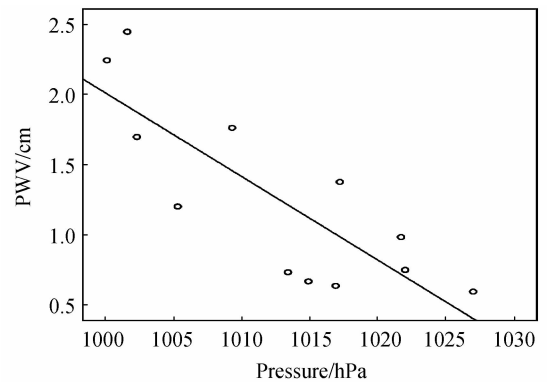


图 6 水汽含量与气压的相关性
Fig. 6 The correlation of water vapor content with pressure

由图 7 可知,武汉地区水汽含量和相对湿度的相关性较低, R^2 为 0.1.

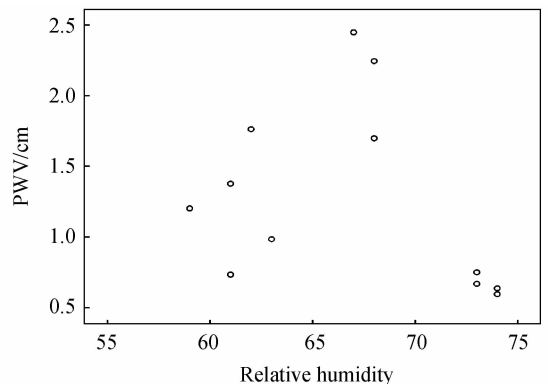


图 7 水汽含量与相对湿度的相关性
Fig. 7 The correlation of water vapor content with relative humidity

相对湿度是指在一定时间内,某处空气中所含水汽量与该气温下饱和水汽量的百分比. 相对湿度的变化主要取决于气温,气温升高时,虽然蒸发加快,水汽增大,但饱和水汽增大得多,相对湿度反而会减小,因此相对湿度的大小不完全取决于水汽的大小,所以水汽和相对湿度的相关性不是很高^[7]. 但在温度一定的条件下,水汽含量越高,相对湿度也越大.

由以上一元回归分析可以清晰看出,大气水汽含量和气温、气压的相关性较大,和气温呈正相关,和气压呈负相关. 水汽含量和相对湿度的相关性不大.

4 结论

本文应用 MODIS 近红外水汽通道数据对武汉地区 2001-2011 年的大气水汽含量进行反演,分析水汽含量的变化趋势及水汽含量和地面气象因子的相关性. 结果表明:1)应用 MODIS 近红外水汽通道数据对武汉地区大气水汽含量进行反演是可行的. 2)武汉地区大气水汽含量变化明显,春季水汽含量较低,随着气温回升,水汽含量逐渐升高,到夏季的 7、8 月份达到水汽含量的最大值,9 月份之后水汽含量开始减少,到冬季又达到水汽含量的最小值. 3)近年来武汉地区大气水汽含量在秋、冬季下降比较明显,这与武汉地区水域面积的减少有极大的关联. 4)MODIS 反演的水汽含量和气温、气压、相对湿度具有一定的相关性,其中水汽含量和气温、气压的相关性比较大,与气温成正相关,与气压成负相关,与相对湿度的相关性不是很大,但是在温度一定时,水汽含量越高相对湿度也越大.

参考文献

- [1] 李云梅,王桥,黄家柱,等. 地面遥感实验原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2011:198-208.
- [2] WANG Li-mei. The inversion of the content of atmospheric water vapor on RS images[D]. Liaoning Technical University, 2009: 2-8.
王丽美. 大气水汽含量的遥感反演方法研究[D]. 辽宁工程技术大学,2009: 2-8.
- [3] YU Xiao-lei, WU Zhao-cong, JIANG Wan-shou, *et al.* Regression analysis between GPS PWV and meteorological factors in wuhan [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, **28**(1): 57-58.
余晓磊,巫兆聪,江万寿,等. 武汉地区地基 GPS 遥感水汽与气象因子的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2012, **28**(1): 57-58.
- [4] JIAN Jian-feng, LI Xin-tao, WANG Ren-xiang, *et al.* A method of eliminating clouds covering in remote sensing imagery[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 3044-3045.
简剑锋,李新涛,王任享,等. 一种遥感影像云层遮挡消除方法[J]. 光子学报,2009,**38**(11):3044-3045.
- [5] LI Hong-lin, LI Wan-biao. Retrieval of atmospheric total water vapor with MODIS near infrared measurements[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, **44**(1): 121-126.
李红林,李万彪. MODIS 近红外资料反演大气水汽总含量[J]. 北京大学学报(自然科学版),2008, **44**(1): 121-126.
- [6] CHRISTOPHER O J, ERIC V, *et al.* The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research[J]. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1228-1230.
- [7] ZHU Wen-ming. The atmospheric precipitable water vapor time change based on MODIS and its correction with meteorological data[D]. Nanjing Normal University, 2007: 11-13.
朱文明. 基于 MODIS 大气水汽的时间变化及其与气象因子的相关分析[D]. 南京师范大学,2007: 11-13.
- [8] WANG Wei-min, SUN Xiao-min, ZHANG Ren-hua, *et al.* The simulation analyze of the effect of surface reflective spectrum on the retrieval of water vapor with MODIS NIR data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(1): 9-10.
王伟民,孙晓敏,张仁华,等. 地物反射光谱对 MODIS 近红外波段水汽反演影响的模拟分析[J]. 遥感学报,2005,**9**(1):9-10.
- [9] ZHAO You-bing. Study on the precipitable water vapor and it's variability over chengdu region combining ground-Base GPS and MODIS[D]. Southwest Jiaotong University, 2008: 53-72.
赵有兵. 联合地基 GPS 和 MODIS 研究成都地区大气可降水量变化[D]. 西南交通大学,2008:5-72.
- [10] GAO Bo-cai, KAUFMAN Y J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(13): 5-8.
- [11] KING M D, KAUFMAN Y J, *et al.* Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(1): 21-23.
- [12] KAUFMAN Y J, GAO Bo-cai. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 872-876.
- [13] 刘玉洁,杨忠东,等. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京:科学出版社,2001: 66-73.
- [14] ZHANG Xiang, ZHANG Jian qi, JIN Wei, *et al.* Improved method for retrieving remote sensing reflectance of ground targets from a spectral image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1221-1222.
张翔,张建奇,靳薇,等. 一种改进的光谱图像反演地表目标遥感反射率的方法[J]. 光子学报,2009,**38**(5):1221-1222.
- [15] DAI Qiang-ling, LIU Liang-ming, WEN Xiong-fei. Research on water-vapor retrieving algorithm based on MODIS data [J]. *Remote Sensing Technology And Application*, 2008, **23**(3): 334-335.
代强玲,刘良明,文雄飞. 基于 MODIS 数据的大气水汽反演算法研究[J]. 遥感技术与应用,2008,**23**(3):334-335.
- [16] 袁善腊,等. 武汉年鉴[M]. 武汉:武汉年鉴社,2008:40-42.
- [17] 朱星宇,陈勇强,等. SPSS 多元统计分析方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011:140-158.