

谭璐璐, 史 岚, 王茜雯, 等. 中国区域空中水资源的计算与订正[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(8): 307–311.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.08.075

# 中国区域空中水资源的计算与订正

谭璐璐, 史 岚, 王茜雯, 万逸波

(南京信息工程大学地理与遥感学院, 江苏南京 210044)

**摘要:**基于地面水汽压资料和 MODIS05 近红外波段数据求算中国区域水汽含量, 并以探空资料为检验值, 得出: 地面水汽压资料计算的水汽含量与探空资料值较为接近, MODIS05 反演结果数据精度存在系统性偏低。联合地面资料和探空资料, 利用 GIS 技术, 提出拟合法和插值法 2 种订正 MODIS05 数据的方法, 验证站点误差分析表明: 2 种方法均较大幅度地提高了 MODIS05 数据的精度, 且 2 种方法的订正效果相近, 其中 1、4、7、10 月经插值法订正的 MODIS05 数据精度较原始数据精度相关系数  $r$  分别提高 2.56%、1.75%、2.03%、1.44%, 平均相对误差  $MRE$  分别下降 15.87%、30.64%、25.7%、18.15%, 均方根误差  $RMSE$  分别下降 3.11、8.18、11.98、3.82 mm。经过 2 种方法订正后的 MODIS05 近红外波段水汽含量数据精度有了较大的提高, 能更加客观的反映我国水汽含量空间分布情况。

**关键词:**中国; 水汽含量; 探空; 水汽压; MODIS05; 订正; 拟合法; 插值法

**中图分类号:**F323.213; S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)08-0307-05

水汽含量指某一单位地区上空整层大气的水汽全部凝结并降至地面的降水量, 其时空变化规律对于水循环、全球气候变化、生态环境、人工增雨(雪)作业等方面的研究具有重要的意义<sup>[1]</sup>。利用探空资料<sup>[2]</sup>、GPS 反演<sup>[3]</sup>及地面观测资料<sup>[4]</sup>计算水汽含量方法虽然精度相对较高, 但仅能代表单个站点及其周边有限区域的水汽含量, 难以反映较大区域的水汽含量。利用 NECP/NCAR 再分析格点数据<sup>[5-6]</sup>求算水汽含量存在空间分辨率较低的劣势。利用卫星资料(例如 MODIS)反演水汽含量<sup>[7-9]</sup>存在空间分辨率高、能进行大范围空间连续性观测的优势, 然而卫星资料反演的水汽含量数据精度受到反演算法、地表类型等因素的影响较大, 因此有必要对遥感反演数据结果进行订正。充分利用站点观测数据精度

高和遥感反演可获得空间连续数据的优势, 以高精度的实测站点数据订正遥感数据是提高遥感数据精度的一个主要方法<sup>[10-12]</sup>。

本研究首先基于探空资料、地面观测资料计算了中国各观测站点处水汽含量, 利用探空资料数据可靠、精度高和地面站点数量多的优势, 建立探空站与地面站之间的拟合关系, 以弥补探空站点数量少的缺憾。利用 GIS 技术<sup>[13-15]</sup>, 采用地面资料联合探空资料来订正 MODIS05 近红外水汽含量数据, 从而提高 MODIS05 近红外水汽含量数据的精度, 为基于遥感数据等开展空中水资源的研究提供一定的借鉴。

## 1 研究区数据

使用的数据的时间尺度为 2001—2010 年, 选用四季中具有代表性的 1、4、7、10 月(分别代表冬季、春季、夏季和秋季)10 年月平均水汽含量数据作为研究所需数据。气象观测数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>), 数据包括气象站点的站点号、经度、纬度、海拔高度以及水汽压。将数据进行严格的质量控制和筛选, 得到完整逐月观测资料

收稿日期: 2016-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41405107)。

作者简介: 谭璐璐(1990—), 男, 山东东营人, 硕士, 研究方向为 GIS 与气象应用。E-mail: Tanll1990@163.com。

通信作者: 史 岚, 博士, 副教授, 研究方向为 3S 技术与气象应用。E-mail: sl\_nim@163.com。

[7] 李华芝, 李秀艳, 胡启平, 等. 处理厨余垃圾的高温菌剂研制及其降解性质研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(2): 126–133.

[8] 吴 琦, 李 军, 李 陈, 等. 一株产胶原蛋白酶短小芽孢杆菌的分离与鉴定[J]. 中国皮革, 2007, 36(17): 16–19.

[9] 张拥军, 鲜 乔. 芽孢杆菌几丁质酶高酶活菌株的筛选及其酶活测定[J]. 中国食品学报, 2009, 9(3): 135–139.

[10] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 349–398.

[11] 张冀翔, 王 东, 蒋宝辉, 等. 厨余垃圾水热液化制取生物燃料[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1475–1482.

[12] Hodge K L, Levis J W, Decarolis J F, et al. Systematic evaluation of industrial, commercial, and institutional food waste management strategies in the United States [J]. Environmental Science &

Technology, 2016, 50(16): 8444–8452.

[13] 孙佳佳, 王红英, 钱斯日古楞, 等. 产胶原蛋白酶枯草芽孢杆菌的筛选[J]. 大连工业大学学报, 2010, 29(4): 248–250.

[14] Uchia H K, Kondo D K, Yamashita S K, et al. Purification and properties of a protease produced by *Bacillus Subtilis* CN2 isolated from a Vietnamese fish sauce[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2004, 20(6): 579–582.

[15] Senol M, Nadaroglu H, Dikbas N, et al. Purification of Chitinase enzymes from *Bacillus subtilis* bacteria TV-125, investigation of kinetic properties and antifungal activity against *Fusarium culmorum* [J]. Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials, 2014(13): 35.

[16] 陶树兴, 张娟妮, 郭 贤, 等. 枯草芽孢杆菌 2-3-2 的抗线虫作用和产酶条件与酶特性[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 45–49.

的台站共 656 个。采用杨景梅经验公式<sup>[4]</sup>,由地面水汽压资料计算整层水汽含量。

探空数据来源于美国怀俄明大学气象数据网,共 83 个中国国际交换站点数据,其中 73 个站点参与数据的订正,10 个站点为验证站点。MODIS05 数据来源于 NASA 官网,下载范围为 73°~135°E、18°~54°N。该数据集有红外(空间分辨率为 5 km×5 km)和近红外(空间分辨率为 1 km×1 km)2 种水汽产品。本研究选取空间分辨率相对高的 MODIS05 近红外波段数据。由于 Terra 星和 Aqua 星是交叉时次观测,因此选取 2 颗星观测数据的平均值作为研究数据。用 IDL 语言批量实现图像的校正、拼接、裁剪及求月均值。

## 2 精度评价指标与订正方法

### 2.1 精度评价指标

本研究采用相关系数  $r$ 、平均相对误差  $MRE$ 、均方根误差  $RMSE$  作为评价指标,公式如下:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (1)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{x_i}}{n}; \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (3)$$

$r$  的取值范围为  $[0 \sim 1]$ ,越接近 1,数据一致性越好; $MRE$  讨论的是遥测降水值和实测值的绝对相对误差的平均状况,最优值为 0; $RMSE$  越小则表示误差越小。

### 2.2 MODIS 的订正方法

2.2.1 拟合法订正 MODIS 建立 73 个探空站资料值与对应的 73 个地面站资料值之间的线性关系,得到拟合系数。依据该系数和剩余的 583 个地面站观测资料拟合得到有地面资料但无探空资料的站点的水汽含量,将 656 个地面站点处水汽含量与 MODIS05 数据作差,采用反距离加权(IDW)法将两者之差推求到整个研究区,将得到的插值图与 MODIS05 数据进行栅格相加最终得到订正后的 MODIS05 数据,公式如下:

$$Y_{TK} = aK_{TK\_DM} + b; \quad (4)$$

$$Y_{NH} + aX_{DM} + b; \quad (5)$$

$$\Delta PWV_{D\_M} = \text{Interpolate}(Y_{NH} + Y_{TK} - PWV_{MODIS}); \quad (6)$$

$$PWV_{MODIS\_correct} = \Delta PWV_{D\_M} + PWV_{MODIS}. \quad (7)$$

式中: $Y_{TK}$  为 73 个探空站资料值, $X_{TK\_DM}$  为与探空站相对应的 73 个地面站大气可降水量值, $a$ 、 $b$  为系数, $Y_{NH}$  为拟合得到的 583 个站点水汽含量, $X_{DM}$  为有地面观测资料但无探空资料的 583 个站点的水汽含量值, $\Delta PWV_{D\_M}$  为站点处水汽含量与对应的 MODIS05 数据之差, $PWV_{MODIS}$  为原始的 MODIS05 水汽含量, $PWV_{MODIS\_correct}$  为订正后的 MODIS05 水汽含量。

2.2.2 插值法订正 MODIS05 数据 73 个探空站资料值与对应的 73 个地面站资料值作差,通过 IDW 法将两者之间的差推求到整个研究区域,按 656 个地面站点提取相应的值,将提取到的值与地面站点资料值相加,得到经过探空站订正后的地面水汽含量,按 656 个地面站点提取地面站点对应的 MODIS05 数据,并将两者作差,采用 IDW 法将两者之差推求到整个研究区,将得到的插值图与 MODIS05 数据图层进行栅格相加最终得到订正后的 MODIS05 数据。订正公式如下:

$$\Delta PWV_{T-D} = \text{Interpolate}(PWV_{TK} - PWV_{DM}); \quad (8)$$

$$PWV_{DM\_correct} = PWV_{DM2} + \text{extract}(\Delta PWV_{T-D}); \quad (9)$$

$$\Delta PWV_{D\_M} = \text{Interpolate}(PWV_{DM\_correct} - PWV_{MODIS}); \quad (10)$$

$$PWV_{MODIS\_correct} = \Delta PWV_{D\_M} + PWV_{MODIS}. \quad (11)$$

式中: $\Delta PWV_{T-D}$  为探空站实测值与对应地面资料值之差, $PWV_{TK}$  为 73 个探空站实测水汽含量, $PWV_{DM}$  为与探空站对应的 73 个地面站水汽压推算得到的水汽含量, $PWV_{DM\_correct}$  为经过探空站订正后的 656 个地面站点水汽含量, $PWV_{DM2}$  为 656 个地面站点大气可降水量, $\Delta PWV_{D\_M}$  为经过探空站点订正后的 656 个地面站点数据与对应的 MODIS05 数据之差, $PWV_{MODIS}$  为 MODIS05 水汽含量, $PWV_{MODIS\_correct}$  为订正后的 MODIS05 水汽含量,Interpolate() 为插值函数,Extract() 表示按点提取图层值。

## 3 结果与分析

### 3.1 3 种方法计算得到的结果分析

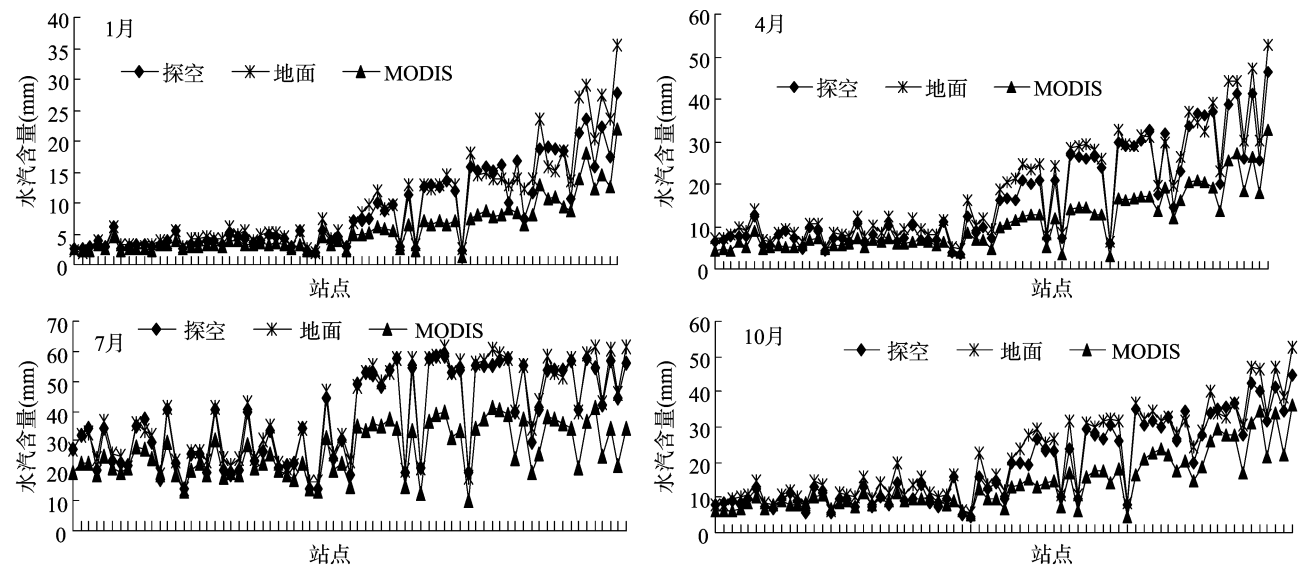
本研究分别计算了 2001—2010 年 10 年月平均 1、4、7、10 月由探空资料<sup>[2]</sup>、地面水汽压资料<sup>[4]</sup>、MODIS05 近红外波段反演<sup>[10]</sup>得到的水汽含量,并绘制折线图(图 1)。

由图 1 可知,探空资料结果与地面资料计算的结果一致性较高,地面资料计算的结果总体上较探空资料结果略微偏大。MODIS 反演结果与探空资料结果相比,存在系统性偏低,这与达布·希拉图等的研究结果<sup>[7]</sup>一致。但 3 种计算方法得到的数据的变化趋势较一致。由北向南,MODIS 反演结果低估水汽含量的现象越来越明显:北方高纬度干旱、半干旱、半湿润区三者一致性较好,MODIS 反演误差较小;南方低纬度亚热带季风气候区、热带季风区,MODIS 低估现象明显。从季节上看,1 月水汽含量最少,MODIS 估算效果最好;7 月水汽含量最多,MODIS 低估现象明显,4 月和 10 月居中。

MODIS 存在系统性低估的主要原因:MODIS 近红外通道算法可以准确反映晴空大气总水汽量,而对云顶以下的水汽是无法反演的,不能做到全天候反演大气可降水。我国冬季受冷高压控制,天气以晴朗干燥为主,尤其是北方地区,因此 MODIS 反演结果较好。夏季受到季风影响,空中云量大,由于无法反演云层以下的水汽,且近地面是水汽集中区,因而 MODIS 出现普遍的低估现象。此外,夏季多降水,土壤的含水量增加使近红外区光谱反射率降低,也导致了反演的数据精度偏低。冬季由于此时地表较均匀并且地表反射系数较大,因而反演的结果比在夏季中的要准确些<sup>[6]</sup>。

为进一步验证由地面水汽压资料计算的水汽含量的精度,本研究以探空资料为检验值,制作了地面资料和 MODIS 反演结果的误差分析表(表 1)。

从表 1 可以看出,地面资料计算的结果均好于 MODIS 反演的结果。各月地面资料计算结果与探空数据的相关系数均在 96.81% 以上,其中 1 月的相关系数最低,但相关系数仍达到 96.81%,7 月的相关系数最高,为 99.13%。7 月的平均相对误差和均方根误差均最小,分别为 6.09%、2.48 mm,4 月的平均相对误差最大,为 16.36%,10 月均方根误差最大,为 3.28 mm。4 月份 MODIS 反演结果与探空数据的相关系数最高,为 97.38%,但仍比地面资料结果低 1.59 百分点;10 月 MODIS 反演结果与探空数据的平均相对误差最小,为



图中从左至右站点依次为：海拉尔、嫩江、伊春、阿勒泰、哈尔滨、伊宁、锡林浩特、二连浩特、通辽、延吉、赤峰、额济纳旗、沈阳、库车、马鬃山、呼和浩特、临河、敦煌、北京、酒泉、喀什、若羌、大连、民勤、银川、太原、和田、民丰、西宁、延安、格尔木、都兰、青岛、榆中、平凉、合作、郑州、徐州、射阳、汉中、南阳、阜阳、甘孜、上海、昌都、宜昌、武汉、安庆、鄂西、杭州、拉萨、重庆、衢州、洪家、南昌、长沙、西昌、怀化、威宁、贵阳、福州、赣州、郴州、桂林、腾冲、百色、汕头、蒙自、南宁、思茅、海口

图1 3 种方法计算的水汽含量折线图

表 1 两方法计算结果对比						
月份	地面资料			MODIS		
	<i>r</i> (%)	<i>MRE</i> (%)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>r</i> (%)	<i>MRE</i> (%)	<i>RMSE</i> (mm)
1	96.81	15.40	2.21	95.31	25.82	3.97
4	98.97	16.36	2.59	97.38	30.11	7.84
7	99.13	6.09	2.48	94.91	26.16	13.29
10	98.37	16.29	3.22	94.40	24.86	6.95

24.86%，但仍比地面结果高 8.57 百分点；1 月 MODIS05 数据与探空数据的均方根误差最小，为 3.97 mm，但仍比地面资料结果高 1.76 mm。

上述数据精度的对比分析为本研究联合地面和探空资料订正 MODIS05 数据的可行性提供了有力的理论支持。

3.2 拟合法、插值法订正结果误差检验

为验证订正效果，以未参与订正的 10 个探空站为验证站点，做了基于原始 MODIS05 数据和以上 2 种方法订正得到的数据结果的误差对比分析（表 2）。

月份	原始 MODIS			拟合法订正 MODIS			插值法订正 MODIS		
	<i>r</i> (%)	<i>MRE</i> (%)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>r</i> (%)	<i>MRE</i> (%)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>r</i> (%)	<i>MRE</i> (%)	<i>RMSE</i> (mm)
1	96.97	28.66	4.36	99.61	13.02	0.87	99.53	12.79	1.25
4	97.99	37.92	9.81	99.78	8.53	1.11	99.74	7.28	1.63
7	97.46	30.13	13.72	99.18	6.66	2.09	99.49	4.43	1.74
10	98.31	24.54	5.59	99.75	9.41	1.45	99.75	6.39	1.77

为直观反映订正效果，制作了探空资料、地面资料推算水汽含量、插值法订正后的 MODIS 数据、原始 MODIS 数的雷达对比图，以显示订正效果（图 2）。

从图 2 可以看出，低纬度地区的站点水汽含量大，探空资料、地面资料、MODIS 反演得到的结果差距明显；高纬度、青藏高原地区站点水汽含量小，3 种方法计算得到的结果差距小。总体上，地面资料计算的水汽含量最大，原始的 MODIS

由表 2 可知，2 种订正方法都很好地提高了 MODIS05 数据的精度。经 2 种方法订正后的 MODIS05 数据与探空数据的相关系数均达到了 99% 以上，较原始 MODIS05 数据均有所提高，呈高度相关性；2 种订正方法得到的结果平均相对误差均明显好于未订正的数据；经拟合法订正后得到的平均相对误差均略高于插值法，1 月份拟合法得到的平均相对误差最大，为 13.02%，较插值法结果高 0.23 百分点，但较 MODIS05 原始数据低 15.64 百分点。7 月份拟合法得到的平均相对误差最小，为 6.66%，比插值法的结果高 2.23 百分点，但较 MODIS05 原始数据低 23.47 百分点；除 7 月外，经拟合法订正的 MODIS05 数据的均方根误差均略小于插值法得到的结果；其中 1 月份拟合法得到的均方根误差最小，为 0.87 mm，较插值法结果小 0.38 mm，较 MODIS05 原始数据小 3.49 mm；7 月份最差，为 2.09 mm，较插值法结果大 0.35 mm，较 MODIS05 原始数据小 11.63 mm。2 种订正方法得到的结果的均方根误差均明显好于原始 MODIS05 数据的结果，且 2 种方法订正效果相近。

反演结果最小，探空资料结果居中，这也进一步印证了图 1 所反映的信息。此外，订正后的 MODIS 结果与探空资料数据最为接近，其折线图位于地面资料结果与探空数据结果中间，这是地面资料和探空资料联合订正的结果。1、7 月份订正效果较好，4、10 月份订正效果略差。

为展示订正后 MODIS05 值与原始 MODIS05 之差，基于 ArcGIS 平台空间分析，以插值订正法为例，做了两者之差的

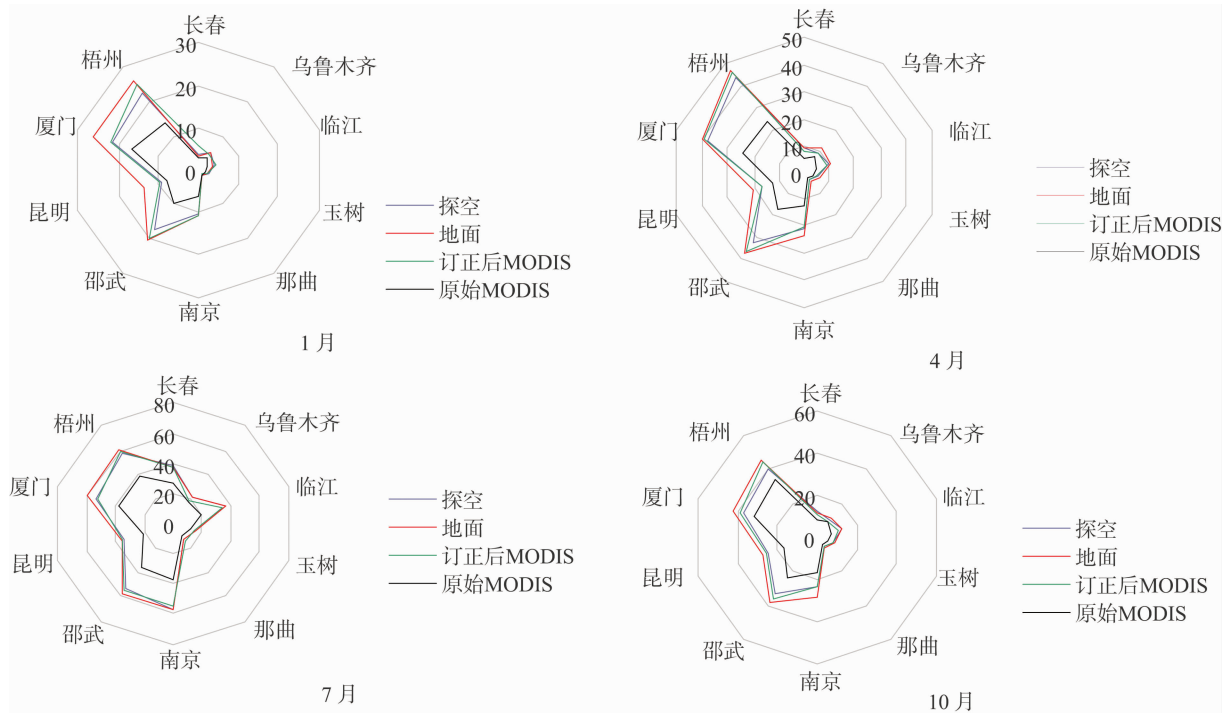


图2 订正前后 MODIS、探空资料、地面资料验证站点雷达图

空间分布,并在此基础上制作了等误差线总体趋势图(图3)。

图3是折线图1在空间上的反映。从图3可以反映出原始 MODIS05 数据整体上存在系统性偏低的状态。1月份 MODIS 反演效果最好,大部分地区低估在 3 mm 范围内,中国东南部局部地区低估 3~9 mm;4、10月估算效果次之,大部分地区低估在 9 mm 范围内,东南部局部地区低估 9~15 mm;7月低估现象最为明显,除西北内陆外,大部分地区低估在 6 mm 以上,东南部局部地区低估 15~24 mm;各月亚热带、热带季风气候区低估最明显,温带大陆性气候区和青藏高原气候区估算效果最好。产生上述现象的原因已在前文阐述,在此不再重复。云南贡山县地处怒江大峡谷,立体气候和小区域气候特征明显,空气湿度大,是 MODIS 低估最明显的地区。

### 3.3 我国水汽含量空间分布图

为直观反映 MODIS05 数据订正效果,作了基于 MODIS05 原始数据、插值法订正后的 MODIS05 数据对比图(图4)。从图4可以看出,不论是原始 MODIS05 数据还是经过订正后的 MODIS05 数据,均一致地反映出我国水汽含量变化明显。从时间上看,1月受冬季风影响,气候寒冷干燥,我国水汽含量最小,且主要沿着纬向分布。7月温度高且受夏季风影响,大气可降水最大,呈明显的东南多西北少的局面。4月和10月水汽含量居中。

从空间上看,我国水汽含量分布为低纬大于高纬、平原大于高原、沿海大于内陆。同时,地形对水汽含量的分布有着重要影响。例如,由于四川盆地地区四周被高山环抱,暖湿空气受地形的屏蔽及盆地内多有河流发育,地面可供蒸发量大等因素的影响,水汽含量明显较高。由于受高大地形影响,青藏高原地区降水量普遍偏小,且四季变化不明显,这也进一步印证了梁宏等的相关研究结果<sup>[16-17]</sup>。

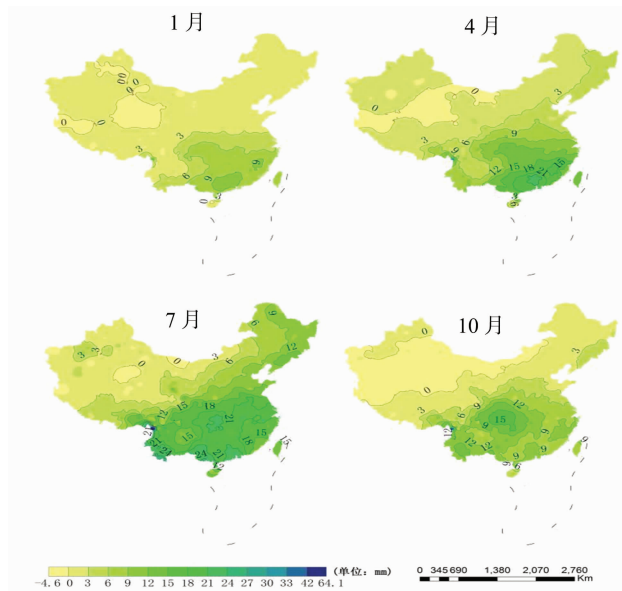


图3 订正后中国区域 2001—2010 年多年平均 1、4、7、10 月 MODIS05 近红外波段水汽含量与原始 MODIS05 值之差空间分布

此外,MODIS 数据分辨率高,从图4也可以看出青藏高原的湖泊地区水汽含量明显高于周围地区,以1月份最为明显。如1月份青海湖等湖区水汽含量分布明显高于周围地区。同时,盛行西风将大西洋的水汽自西向东输送到内陆,受到青藏高原地形的阻挡,气流分成沿青藏高原南北两侧的南北两支流,其中北支流主要经过我国<sup>[19-20]</sup>,图中可以明显看出青藏高原北部有一个明显的高水汽含量带。

## 4 结论

为弥补探空站点稀少、卫星反演数据精度较低的缺点,发

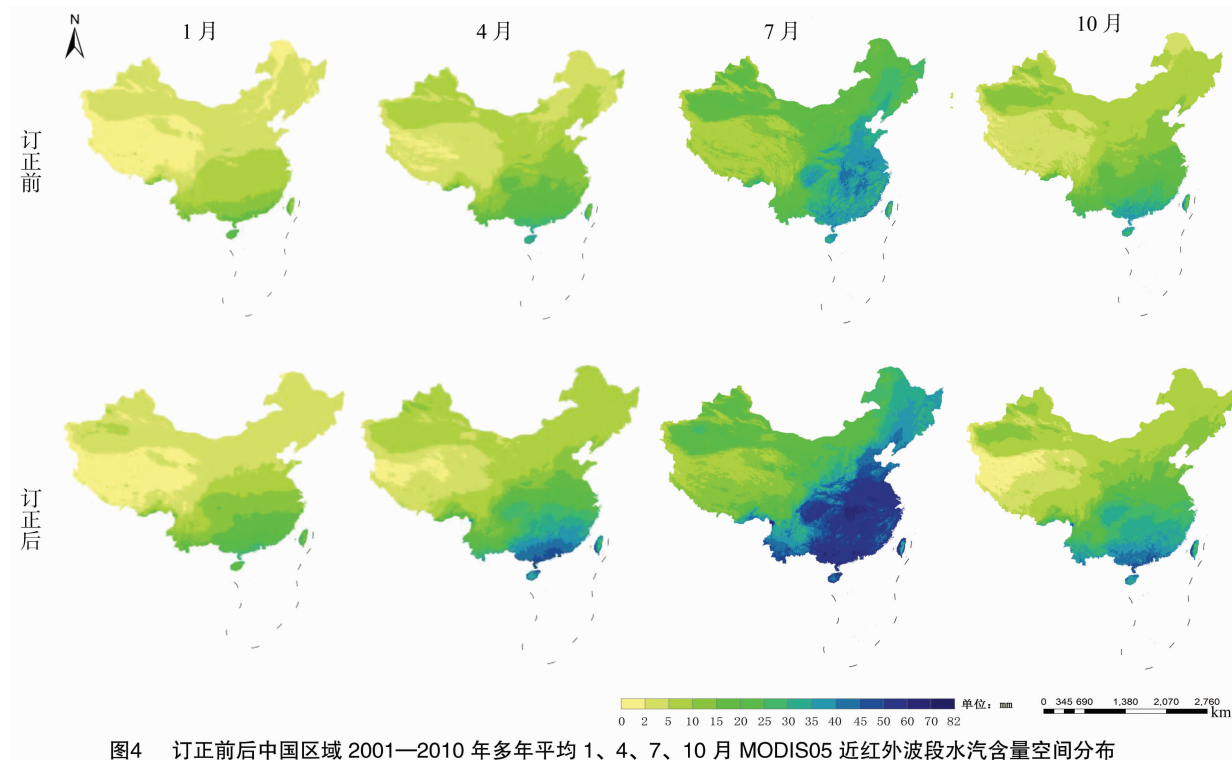


图4 订正前后中国区域 2001—2010 年多年平均 1、4、7、10 月 MODIS05 近红外波段水汽含量空间分布

挥探空站点数据精度高、地面站点数量多、卫星反演数据具有空间连续性观测的优势,本研究联合地面及探空资料,分别采用拟合法和插值法对 MODIS05 近红外波段数据进行订正,得到更准确的中国区域水汽含量空间分布,并得出如下结论:

(1) MODIS05 近红外波段反演得到的数据空间分辨率高、数据精度也较好,适合研究大范围的水汽含量空间分布情况,并能刻画复杂地形下的水汽含量空间分布情况。

(2)通过杨景梅经验公式,由地面水汽压资料计算得到大气可降水量与探空资料值较为接近,MODIS05 近红外波段反演得到的数据精度存在系统性偏低,偏低程度由中国西北部向东南逐渐扩大。

(3)从时间上看,在 1、4、7、10 月中,1 月 MODIS 反演效果最好,7 月 MODIS 反演数据低估现象明显,4 月和 10 月反演效果居中。

(4)经拟合法和插值法 2 种订正方法订正的 MODIS05 数据精度均有大幅度的提高,且 2 种方法的订正效果相近。

#### 参考文献:

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 天气学原理与方法[M]. 北京:气象出版社,2000:329-330.
- [2] 杨红梅,葛润生. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象,1998,24(9):8-11.
- [3] 李国平. 地基 GPS 遥感水汽含量及其在气象中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [4] 杨景梅,邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层水汽含量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学,2002,26(1):10-22.
- [5] 刘丹,邱新法,史岚,等. 基于 NCEP 资料的我国水汽含量的计算及其时空分布[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2013,5(2):113-119.
- [6] 林维俊,陈洪滨,肖稳安. MODIS 与 NCEP 水汽含量资料的比较

- 分析[J]. 南京气象学院学报,2004,27(2):169-177.
- [7] 达布·希拉图,卢士庆,苏丽娟,等. 利用 MODIS 卫星资料监测内蒙古地区大气总水汽量方法研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(5):76-80.
- [8] 姜立鹏,覃志豪,谢雯. 针对 MODIS 近红外数据反演大气水汽含量研究[J]. 国土资源遥感,2006,18(3):5-9.
- [9] 陈渭民,陶国庆,邱新法. 介绍全球气候系统卫星遥感导论[M]. 北京:气象出版社,2012:74-82.
- [10] 张俊东,陈秀万,李颖,等. 基于 GPS 数据的 MODIS 近红外水汽改进反演算法研究[J]. 地理与地理信息科学,2013,29(2):40-44.
- [11] 张舒扬,邱新法. MODIS 大气含水量产品地面资料订正方法研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2012,21(2):60-65.
- [12] 曹芸,何永健,邱新法,等. 基于地面观测资料的 MODIS 云量产品订正[J]. 遥感学报,2012,16(2):325-342.
- [13] 李永艳. 基于 RS 和 GIS 的新疆水汽含量的反演和估算研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2011.
- [14] 蒋好忱,雷宝佳,汪朋,等. 基于 GIS 技术的我国水汽含量分布研究[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(3):100-102.
- [15] 王瑞君,王仁德,高士平,等. 基于 GIS 的河北省土地沙化脆弱性评价与空间分异[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):395-397.
- [16] 梁宏,刘晶淼,李世奎. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析[J]. 自然资源学报,2006,21(4):526-534.
- [17] 金宝. 青藏高原对我国天气和气候的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),1988(3):37-42.
- [18] 王同美,吴国雄,万日金. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响[J]. 高原气象,2008,27(1):1-9.
- [19] 黄刚,周连童. 青藏高原西侧绕流风系的变化及其与东亚夏季风和我国华北地区夏季降水的关系[J]. 气候与环境研究,2004,9(2):316-330.