

基于可见光红外成像辐射仪数据的地表温度反演

夏浪^{1,2}, 毛克彪^{1,2}, 马莹², 孙知文³, 赵芬¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081;
2. 广州地理研究所, 广州 510070; 3. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 地表温度是农业旱灾和作物估产模型的重要参数。该文针对可见光红外成像辐射仪(visible infrared imager radiometer suite, VIIRS)传感器缺乏水汽通道的特点, 联合 Aqua 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据提出了基于分裂窗算法的 VIIRS 地表温度反演方法。对地表发射率和大气透过率这 2 个关键参数的获取进行了详细分析, 选取了处于作物生长期的 2013 年 6 月 4 日 VIIRS 数据进行实例验证分析。结果表明, 与全国气象数据比较该文算法在大尺度上能够较好地获取中国地表温度; 与 MODIS 数据温度产品在高温产粮区比较, 该文算法与 MODIS 温度产品精度较一致, 两者差值小于 1 K。使用 MODTRAN (moderate resolution transmission) 软件对算法的精度进行了模拟评价验证, 分析表明: 在一定的水汽和地表发射率条件下, 算法反演精度一般保持在 1 K 内, 平均误差为 0.431 K, 误差标准偏差为 0.247 K。能够为农业干旱、作物长势等农情信息监测提供所需的地表温度数据。

关键词: 遥感; 温度; 水汽; 传感器; 可见光红外成像辐射仪; 反演; 中分辨率成像光谱仪

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.013

中图分类号: P407

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0109-08

夏浪, 毛克彪, 马莹, 等. 基于可见光红外成像辐射仪数据的地表温度反演[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 109 - 116.

Xia Lang, Mao Kebiao, Ma Ying, et al. Retrieval land surface temperature from visible infrared imager radiometer suite data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 109 - 116. (in Chinese with English abstract)

0 引言

地表温度作为地气之间长波辐射和湍流热通量交换的直接驱动力, 是地表能量变化的物理过程和全球尺度下局部水量平衡的最重要参数之一^[1], 因此及时、准确地获取地表温度参数对农业旱灾^[2-3]、作物长势监测和产量预测^[4]等影响粮食安全的农情信息监测应用具有重大意义。基于卫星数据的地表温度监测方法^[5-9]较传统的气象站点监测方法有观测范围大、受地理条件限制少的优点, 因此发展较为迅速。

现今在卫星数据上被较多使用的遥感地表温度反演方法主要有单通道算法、双通道算法(分裂窗算法)和多通道(角度)算法。单通道的热红外算法首先于 20 世纪 80 年代提出, 此后覃志豪在 2001 年提出了针对 TM 实用的单通道算法^[10], 该算

法仅需要地表发射率、大气透过率和有效大气平均作用温度 3 个参数就可以反演地表温度。1975 年 McMillin^[11]提出针对陆地的分裂窗算法, 此后 Sobrino 等^[12]、Becker 和 Li^[13]、Wan 等^[14]、Qin 等^[15]、Mao 等^[16]对 SWA 算法做出了相应的研究改进。SWA 的主要原理是使用波长相邻的两个热红外波段来组建 2 个方程, 2 个方程求解 2 个未知数即可获得地表温度。Wan 和 Li^[17]针对 MODIS^[18]数据提出了多通道算法, 主要原理是假定白天和晚上同一个地方发射率不变, 建立多个方程, 通过迭代同时反演得到地表温度和发射率。以上各种算法针对不同的数据特征开发, 由于大气参数获取差异, 各有优缺点。

1999 年搭载在 Terra 卫星平台升空的中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据因免费接收、观测幅大、重复观测周期短等优点被广泛运用到农业灾害监测和作物产量估算研究中。由于 MODIS 仪器服役年限已超出设计年限, MODIS 数据可持续性风险逐渐增大, NASA 于 2011 年 10 月 28 日发射了下一代对地观测卫星——Suomi 国家极轨合作伙伴(Suomi National Polar-orbiting Partnership, Suomi NPP), 接替 Terra、Aqua 和 Aura 卫星的对

收稿日期: 2013-12-11 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAC03B00); 国家基础研究“973”项目(2010CB951503)

作者简介: 夏浪, 男, 主要从事环境遥感研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: xialang2012@163.com

通信作者: 毛克彪(1977 -), 男, 博士后, 副研究员, 主要从事农业遥感和气候变化等方面的研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: kebiao67@126.com

地观测任务。NPP 卫星携带了用于取代 MODIS 的新一代对地观测仪器, 可见光红外成像辐射仪 (visible infrared imager radiometer suite, VIIRS), 该传感器继承和发展于 MODIS, 与 MODIS 传感器具有一定的相似性, 因此对 VIIRS 传感器数据进行研究分析有利于农业应用中由使用 MODIS 数据向 VIIRS 数据平稳过渡。本文先介绍了 VIIRS 传感器数据, 然后推导了适用于 VIIRS 传感器地表温度反演的分裂窗算法, 最后用处于作物生长期关键期的 6 月份 VIIRS 数据对本文提出的算法进行了真实数据验证分析。

1 VIIRS 数据介绍

VIIRS 传感器共 22 个波段, 分辨率为 750 m 的 DNB 波段一个, 370 m 分辨率的影像波段 5 个, 16 个分辨率 750 m 的 M 波段, 扫描角 $\pm 56^\circ$, 观测刈幅 3 000 km。VIIRS 相对于 MODIS 传感器最突出的特点是对随扫描角增加而增加的空间分辨率进行了有效控制, 而这也是 VIIRS 对极轨环境卫星数据质量的重大改进^[19]。另外数据信噪比和观测刈幅均有所提升, 但 VIIRS 波段数不如 MODIS 丰富, 尤其是缺少位于水汽吸收区的 7.3、0.9 和 0.95 μm 等水汽通道, 因此从 VIIRS 获取大气水汽参数变得十分困难。本文在不能直接从 VIIRS 传感器获取成像时水汽参数的情况下探讨了基于 Aqua 和 NPP 双星分裂窗算法的 VIIRS 地表温度反演算法, 使用的 VIIRS 相应通道的部分参数见表 1。M5 和 M7 通道分别是归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 计算中所需的植被吸收强烈的红色波段和植被散射强烈的近红外波段, M15 和 M16 是分裂窗算法所需的 2 个热红外波段。

表 1 本文使用的 VIIRS 传感器通道
Table 1 VIIRS channels used in this study

波段 Bands	波长 Wavelength / μm	分辨率 Resolution /m	应用范围 Scope of application	对应 MODIS 波段 MODIS bands
M5	0.672	750	海洋水色、气溶胶	13 或 14
M7	0.865	750	海洋水色、气溶胶	16 或 2
M15	10.763	750	洋面温度	31
M16	12.013	750	洋面温度	32

2 算法推导

到目前分裂窗算法已经有几十个不同改进算法, 但大多是对辐射传输方程进行推导简化得出, 辐射传输方程如式 (1):

$$B_\lambda(T_\lambda) = \tau_\lambda(\theta)[\varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon_\lambda)(1 - \tau_\lambda(\theta)) B_\lambda(T_a)] + (1 - \tau_\lambda(\theta)) B_\lambda(T_a) \quad (1)$$

式中: $B_\lambda(T_\lambda)$ 为大气层顶 (top of the atmosphere,

TOA) 传感器接收到波长 λ 的辐亮度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$; $\tau_\lambda(\theta)$ 代表波长为 λ 地物发射辐射通过大气的透过率; ε_λ 代表地物在波长 λ 处的发射率; $B_\lambda(T_s)$ 、 $B_\lambda(T_a^\downarrow)$ 和 $B_\lambda(T_a^\uparrow)$ 分别为地物发射辐射、大气下行辐射和大气上行辐射, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$; 其中 T_s 、 T_a^\downarrow 和 T_a^\uparrow 分别代表地表温度、大气下行辐射温度和大气上行辐射温度, K; θ 为传感器观测天顶角, ($^\circ$)。Qin 等通过分析后认为使用大气上行辐射 T_a^\uparrow 代替大气下行辐射 T_a^\downarrow 对整个反演的影响较小^[15], 因此可对式 (1) 进行简化得到式 (2):

$$B_\lambda(T_\lambda) = \tau_\lambda(\theta)\varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) + (1 - \tau_\lambda(\theta)) (1 + (1 - \varepsilon_\lambda)\tau_\lambda(\theta)) B_\lambda(T_a^\uparrow) \quad (2)$$

将 VIIRS 的 M15 和 M16 通道带入等式 (2), 用 T_s 表示 T_a^\uparrow 即可得到只含 T_s 的等式, 即最终的地表温度计算公式。由于普朗克函数较复杂, 若直接将其带入等式 (2), 则最后的 T_s 计算公式将非常复杂, 因此有必要对普朗克函数进行简化。Mao 等通过普朗克函数模拟计算发现, 在温度比较小的变化范围内, 辐射亮度和温度之间可以用线性关系来近似描述^[16]。但由于 VIIRS 的波段特性与 MODIS 有一定的差异, 针对 MODIS 数据 31 和 32 通道的普朗克函数线性简化公式^[16]不适用于 VIIRS M15 和 M16 波段, 因此本研究对参数进行了重新计算。式 (3) 和 (4) 分别是 VIIRS M15、M16 波段的普朗克函数线性简化公式:

$$B_{15}(T) = 0.1494T - 34.934 \quad R^2 = 0.996 \quad (3)$$

$$B_{16}(T) = 0.1239T - 28.083 \quad R^2 = 0.997 \quad (4)$$

式中: $B_{15}(T)$ 和 $B_{16}(T)$ 代表 M15、M16 通道对应波长下温度为 T 的辐亮度; R^2 为线性相关系数。

将简化后的普朗克函数带入式 (2) 后可以得到简化后的地表温度计算式 (5):

$$T_s = (C_{16}(B_{15} + D_{15}) - C_{15}(D_{16} + B_{16})) / (C_{16}A_{15} - C_{15}A_{16}) \quad (5)$$

其中: $A_{15} = 0.1494\tau_{15}\varepsilon_{15}$

$$B_{15} = 0.1494T_{15} + 34.934\tau_{15}\varepsilon_{15} - 34.934$$

$$C_{15} = (1 - \tau_{15})(1 + (1 - \varepsilon_{15})\tau_{15})0.1494$$

$$D_{15} = (1 - \tau_{15})(1 + (1 - \varepsilon_{15})\tau_{15})34.934$$

$$A_{16} = 0.1239\tau_{16}\varepsilon_{16}$$

$$B_{16} = 0.1239T_{16} + 28.083\tau_{16}\varepsilon_{16} - 28.083$$

$$C_{16} = (1 - \tau_{16})(1 + (1 - \varepsilon_{16})\tau_{16})0.1239$$

$$D_{16} = (1 - \tau_{16})(1 + (1 - \varepsilon_{16})\tau_{16})28.083$$

式中 τ_{15} 和 τ_{16} 为 M15 和 M16 波段透过率; ε_{15} 和 ε_{16} 为 M15 和 M16 波段对应地物的发射率。因此, 通过确定 M15 和 M16 波段对应的大气透过率和发射

率地表即可确定地表温度 T_s 。

3 透过率和发射率参数获取

3.1 发射率估计

本研究根据国际地圈生物圈计划 (International Geosphere Biosphere Program, IGBP) 全球植被分类方案数据获取地表覆盖类型, 对植被覆盖区域的混合象元采用混合加权模型^[20-21]估计象元发射率, 如下式:

$$\varepsilon = P_V R_V \varepsilon_V + (1 - P_W - P_V) R_S \varepsilon_S \quad (6)$$

式中: ε 为象元发射率; P_V 代表植被在象元中所占比例; ε_V 为对应植被类型的发射率; ε_S 为非植被发射率 (土壤、沙漠、水体等); R_V 和 R_S 分别代表象元中植被和非植被地物在象元中所占辐射量比例; P_W 为象元中水体所占比例, 当 $P_W=1$ 时该象元为水体, 当 $P_W=0$ 时该象元为陆地象元。 P_V 由植被指数定义, 如下式:

$$P_V = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_S) / (\text{NDVI}_V - \text{NDVI}_S) \quad (7)$$

式中: NDVI 为植被指数; NDVI_S 和 NDVI_V 代表地表类型为植被和土壤的 NDVI 值, 其值分别取 $\text{NDVI}_S=0.65$ 和 $\text{NDVI}_V=0.05$ 。

3.2 透过率获取

大气水汽是影响热红外波段透过率的重要影响因素。在不能直接从卫星传感器上获取大气水汽时, 分裂窗算法往往使用气象站点的水汽数据作为大气水汽数据的输入, 然后再计算透过率。但由于气象站点数量的限制, 不同区域水汽分布可能存在潜在的差异, 因此使用气象站点水汽数据可能会对温度反演的精度造成一定的影响。MODIS 传感器携带了对水汽敏感的通道, 因此针对 MODIS 数据的分裂窗算法可以直接反演得到同步水汽参数, 但 VIIRS 传感器并没有相应的通道, 因此不能直接获取水汽数据。表 2 列出了 Aqua、Terra 和 NPP 卫星的部分参数, 从表中可知 Aqua 和 NPP 卫星共同运行在升交点为 13:30 的同步轨道上, 故可以使用 Aqua MODIS 传感器反演获取的水汽数据代替 VIIRS 所缺失的水汽通道数据进行温度反演。

表 2 Terra、Aqua 和 NPP 卫星部分轨道参数

Table 2 Part orbital parameters of Terra, Aqua and NPP satellite

卫星 Satellite	轨道高度 Orbit height/ km	交点时间 Node time	周期 Period/ min	传感器 Sensor	刈幅 Swath/ km
Aqua	705	13:30 (ascending)	99	MODIS	2 330
Terra	705	10:30 (descending)	99	MODIS	2 330
NPP	824	13:30 (ascending)	101	VIIRS	3 000

Qin 等^[15]对 AVHRR 4、5 通道, Mao 等^[16]对 MODIS 31、32 通道大气透过率和水汽含量相关性

研究发现两者之间存在较好的线性关系, 本文在大气辐射模拟软件 MODTRAN 对 VIIRS M15 和 M16 通道水汽含量和透过率进行了相应模拟。从图 1 中可以看出 M15 和 M16 通道水汽和透过率均具有较好的线性关系, 并且 M16 通道透过率随水汽变化的线性关系 ($R^2=0.9984$) 比 M15 通道的线性关系 ($R^2=0.9907$) 更好。但仔细观察 M15 通道水汽和透过率之间的关系发现, 尽管 R^2 值高达 0.9907, 但水汽含量 $< 1.2 \text{ g/cm}^2$ 、 $1.8 \text{ g/cm}^2 < \text{水汽含量} < 2.2 \text{ g/cm}^2$ 时, 通过线性模拟得到的透过率与 MODTRAN 模拟获取的透过率有较大差异, 因此本文使用查找表的方式来获取大气水汽。通过 MODTRAN 软件模拟不同水汽含量下的大气透过率, 制作成查找表, 实际反演中只需在查找表中查找相同水汽含量下的大气透过率即可获取透过率。

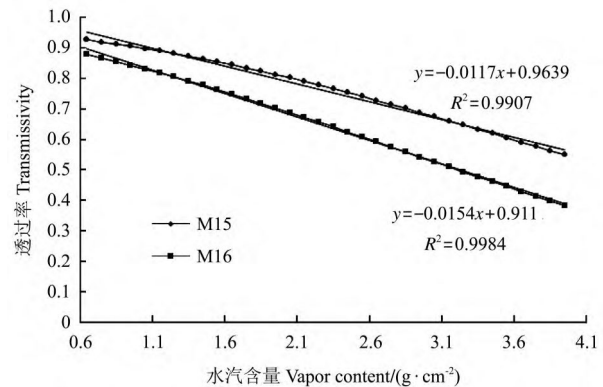


图 1 中纬度夏季大气状态下 M15 和 M16 通道不同水汽含量和透过率关系

Fig.1 Relationship of atmospheric transmittance and water vapor content for VIIRS M15 and M16 channels under mid-latitude summer atmosphere

4 算法精度分析

4.1 基于 MODTRAN 模型的精度分析

极轨卫星观测范围大, 空间分辨率较低, 每个像元所代表的地物组成复杂, 获取一个数据像元代表范围的地表温度存在很大的困难, 研究者 (Sobrino 等^[12]、Qin 等^[15]、Mao 等^[16]) 在验证 AVHRR 和 MODIS 地表温度反演精度时多使用标准大气模型 (LOWTRAN、MODTRAN) 来进行相应的精度分析。如表 3 所示, 在中纬度夏季大气状态下, 地表温度为 295、310 和 325 K, 水汽含量 1.0、2.2 和 3.4 g/cm^2 , M15 和 M16 通道发射率分别为 0.963 和 0.974 (旱土) 和水汽含量分别为 2.5 和 3.5 g/cm^2 , M15 和 M16 通道发射率分别为 0.984 和 0.992 (植被) 时通过 MODTRAN 模拟分析了本研究的反演精度。由表 3 可知, $|T_s - T_m|$ 值均小于 1 K, 表明在不同大气水汽含量和地表温度下, 本研究提

出的反演算法精度较高。同时反演的平均误差为 0.431 K, 标准偏差为 0.247 K, 说明反演精度波动性不大, 本算法在不同水汽和地表温度条件下能较稳定的反演地表温度。

表 3 基于 MODTRAN 的精度验证结果
Table 3 Verify accuracy of study with MODTRAN

地类 Land type	水汽 含量 Vapor content/ (g·cm ⁻²)	透射率 Transmittance		通道亮温 Brightness temperature/K		T _m /K	T _s /K	T _s -T _m /K
		M15	M16	M15	M16			
土壤	1.0	0.898	0.830	0.974	292.988	295.000	294.349	0.651
		0.898	0.830	0.974	306.686	310.000	309.653	0.347
		0.898	0.830	0.974	320.547	325.000	325.045	0.045
	2.2	0.777	0.656	0.974	292.799	295.000	294.365	0.635
		0.777	0.656	0.974	304.777	310.000	309.658	0.342
		0.777	0.656	0.974	317.036	325.000	325.162	0.162
		0.618	0.460	0.974	292.487	295.000	294.501	0.499
	3.4	0.618	0.460	0.974	302.148	310.000	309.935	0.065
		0.618	0.460	0.974	312.193	325.000	325.819	0.819
		0.740	0.608	293.718	294.056	295.000	294.252	0.748
2.5	0.740	0.608	305.28	304.025	310.000	309.324	0.676	
	0.740	0.608	317.162	314.339	325.000	324.646	0.353	
	0.604	0.445	293.256	293.128	295.000	294.581	0.418	
	0.604	0.445	302.825	300.562	310.000	309.821	0.179	
植被	0.604	0.445	312.788	308.366	325.000	325.523	0.523	

注: T_m 代表输入 MODTRAN 软件的地表温度; T_s 为将相应的水汽和地表发射率带入本算法得到的地表温度; |T_s-T_m| 代表本算法反演地表温度 T_s 和实际地表温度 T_m 的差值。

Note: T_m is the real LST which input to the MODTRAN; T_s is the retrieval LST of this study; |T_s-T_m| is the difference between real land surface temperature and retrieval land surface temperature.

4.2 与传统分裂窗算法比较

传统分裂窗算法的基本原理是利用水汽对 2 个热红外波段辐射的吸收不同来消除大气影响。通常反演算法方程如下式:

$$T_s = a_0 + a_1(B_i - B_j) + a_2 B_i \quad (8)$$

式中: T_s 代表地表温度, K; a₀、a₁ 和 a₂ 为方程系数; B_i 和 B_j 分别为相邻两热红外通道亮温, K; a₁(B_i-B_j) 为消除大气特别是水汽的影响; a₂B_i 为反演主通道。

从式(8)可知, 地表温度 T_s 的反演精度取决于系数 a₀、a₁ 和 a₂。对于传统的分裂窗算法, 上述系数通常在特定的大气状态和地表参数下通过对卫星模拟数据进行回归获取, 或者通过分析卫星观测区域对应的地表温度来获取经验参数^[1]。由于同步实时获取卫星观测区域对应的地表温度和大气参数非常困难, 因而先通过 MODTRAN 等辐射传输模型模拟相应的卫星数据和参数, 然后再回归统计方程系数是最有效的方法。本研究使用 MODTRAN 模型对地表类型为旱土和植被的 VIIRS M15、M16 通道的相应参数进行了回归计算, 其中水汽范围为 0.4~4.0 g/cm², T_s 为 290~325 K, 发

射率与 4.1 节中相同, 式(9)和式(10)分别为下垫面类型为土壤和植被的地表温度反演公式:

$$T_{soil} = -5.924 + 2.106(M_{15} - M_{16}) + 1.032M_{15} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.998$$

$$T_{veg} = -5.697 + 2.017(M_{15} - M_{16}) + 1.027M_{15} \quad (10)$$

$$R^2 = 0.997$$

式中: T_{soil} 和 T_{veg} 分别为土壤和植被的地表温度, K; M₁₅ 和 M₁₆ 为 VIIRS M15、M16 通道亮温, K。在该反演方程下, 使用表 3 的参数分别计算了本研究算法和传统回归方法的精度, 如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 在对应的地表类型下, 本研究算法和传统分裂窗算法误差均小于 1 K。对于土壤, 本研究算法和传统分裂窗算法平均误差分别为 0.396 和 0.393 K, 标准差为 0.275 和 0.327 K; 对于植被, 平均误差分别为 0.483 和 0.460 K, 标准差为 0.211 和 0.248 K, 本研究算法精度要好于传统分裂窗算法, 且本文算法反演误差的波动性更小, 在对应的地物下, 反演的稳定性更好。

表 4 本研究与传统分裂窗算法反演精度比较

Table 4 Retrieval accuracy comparison between traditional SWA and this study

地类 Land type	水汽 含量 Vapor content/ (g·cm ⁻²)	T _m =295 K 时, 反演地表温度与 输入值的差值 T _s -T _m /K		T _m =310 K 时, 反演地表温度 与输入值的差 值 T _s -T _m /K		T _m =325 K 时, 反演地表温度与 输入值的差值 T _s -T _m /K	
		本文研 究算法	传统 算法	本文研 究算法	传统 算法	本文研 究算法	传统 算法
土壤	1.0	0.661	0.490	0.358	0.177	0.028	0.192
	2.2	0.643	0.169	0.349	0.474	0.155	0.977
	3.4	0.506	0.834	0.070	0.176	0.814	0.046
植被	2.5	0.748	0.270	0.676	0.357	0.353	0.722
	3.5	0.418	0.735	0.179	0.131	0.523	0.545
土壤 误分为 植被	1.0	0.651	1.640	0.347	1.442	0.045	1.181
	2.2	0.635	1.018	0.342	0.892	0.162	0.563
植被	3.4	0.499	0.392	0.065	1.277	0.819	1.727

注 T_m 代表输入地表温度; |T_s-T_m| 为输入地表温度和反演地表温度的差值。
Note: T_m is real land surface temperature; |T_s-T_m| is the difference between real land surface temperature and retrieval land surface temperature.

传统分裂窗算法系数通过统计回归得到, 在某种程度上讲, 实际应用的精度取决于统计样本数据与实际反演数据是否具有一致性或者相似性, 因此算法有时不具备普适性。另一方面, 由于需要对不同地表类型回归建立不同的反演方程, 传统的分裂窗算法强烈的依赖地表分类。例如本研究只分析了旱土的反演方程, 实际上土壤有很多种, 发射率变化幅度很大, 不同土壤类型的发射率对反演精度表现差异很大。在实际地表温度反演中, 极轨气象卫星存在大量的混合像元, 如果直接使用按地表类型回归得到的方程反演地表温度, 可能对正确的地表使用错误的反演方程, 如表中将土壤误分为植被后, 其反演出现较大误差。本研究则考虑 NDVI 这

一变量，动态的对地表发射率进行计算，此外水汽的获取也是动态的，但如果 MODIS 和 VIIRS 传感器对同一区域成像时差较大，则可能会对反演的精度造成一定影响。

5 实例应用分析

5.1 与气象数据和 MODIS 数据对比分析

图 2a 为联合 Aqua MODIS 获得的 VIIRS 对应的大气水汽，图 2b 是本研究算法反演获取的地表温度，该 VIIRS 数据成像于 2013 年 6 月 4 日 05:53 至 2013 年 6 月 4 日 05:59，Aqua MODIS 数据获取时间为 2013 年 6 月 4 日 05:40 至 2013 年 6 月 4 日 05:50，图 2c 为从国际气象交换数据提取的当天 06:00(北京时间 14:00)近地表气温，图 2d 是 Aqua MODIS 地表温度产品，由 2 景 MODIS 数据合成。由图 2a 可知，水汽在沿海地区含量较高，达到了 3~4 g/cm²，内陆地区水汽相对较低，但水汽的分布并不

均匀，存在较大的跳跃性，因此如果仅用固定的水汽含量来代替实际水汽值则会出现较大的误差，影响反演精度。从图 2b 中可知，该时刻中国区域的地表温度大部分处于 30~35℃，沿海和东北区域温度不高于 30℃，大于 45℃ 的高温主要分布在河南、陕西和内蒙古区域。图 2c 显示了下午 14:00 时对应区域的空气温度，从图中可知东部沿海地区温度较低，靠近内陆温度升高，高温区域主要分布在河南、陕西和内蒙古西部区域。尽管近地表空气温度的获取时间和卫星过境时间不对应，且近地表空气温度与地表温度在数值上也不相等，但在 14:00 时左右近地表气温和地表温度一般达到相对稳定的最大值，两者反映的温度覆盖区域的大小是相当的。通过对比图 2b 和图 2c 可知，本文算法反演的地表温度在大致轮廓上和近地表空气温度的分布相似，因此从整体上本研究提出的算法在大尺度区域上能够较好的获取中国地区地表温度。

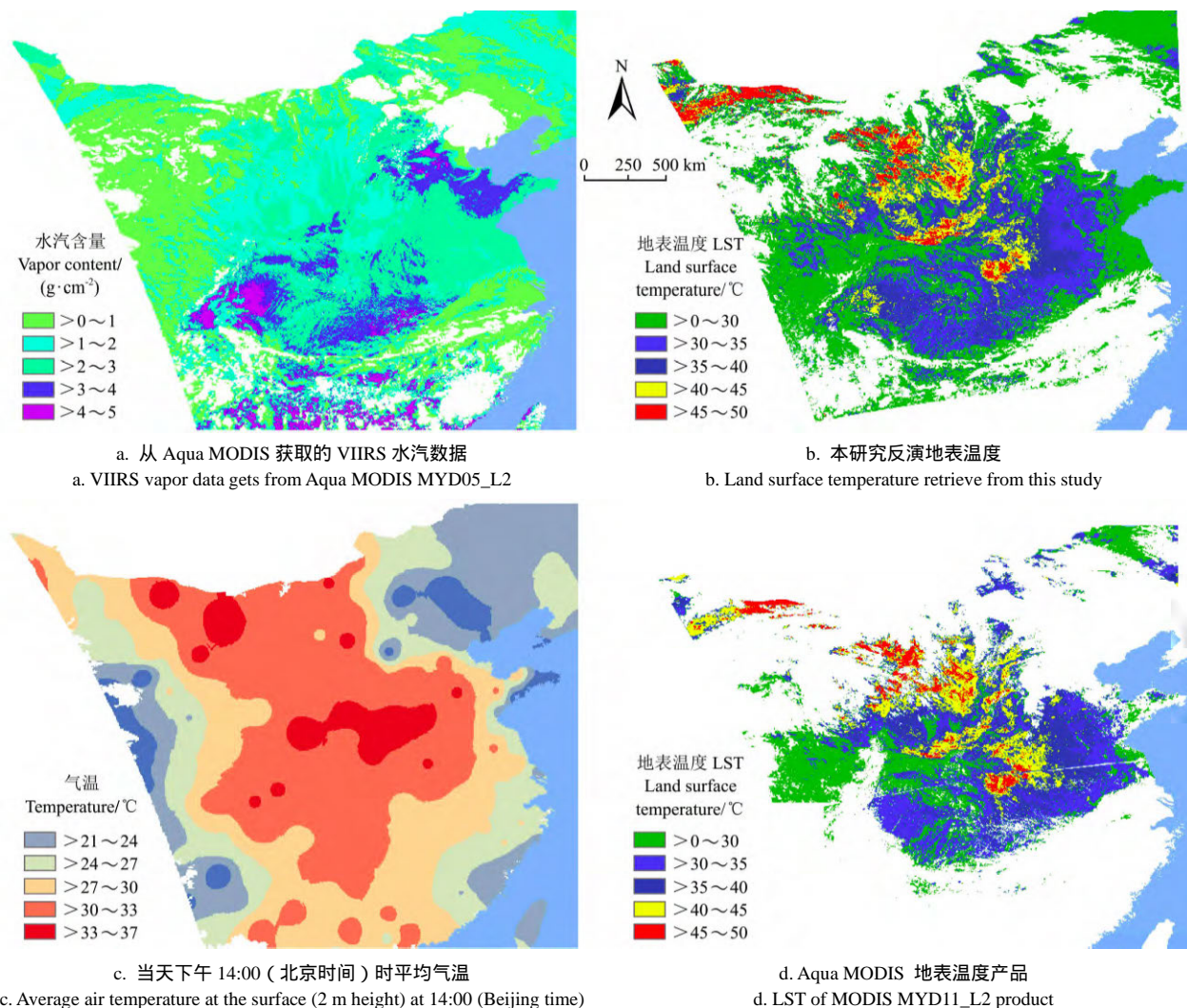


图 2 VIIRS 实例数据应用分析
Fig.2 Application analysis of VIIRS data

对比图 2b 和图 2d 可知,在地表温度为 45 ~ 50 的区域,整体上两图反演的地表温度分布较为一致,同样在 30 ~ 45 范围内,两者的反演结果较为相似,从总体上看,两者对地表温度的反演结果相当。由于两者成像时间存在部分差异,地表风速等相应参数存在差异,因此两图对地表温度反演存在部分差异,例如在 45 ~ 50 的区域,西北部区域本文的算法反演获取的地表温度略高于 MODIS 温度产品。另一方面,本研究地表温度反演算法没有将较薄的云层进行去除,因而图 2b 中云层分布较图 2d 中多,导致本研究反演的 0 ~ 30 区域占图中比例较大,但总体上本研究反演的地表温度结果与成像时差不大的 MODIS 数据反演结果相似。

5.2 与 MODIS 温度产品高温监测精度对比

高温对农作物生长发育有一定的影响,准确监测高温分布范围对农业旱灾的防范具有较大的作用,为验证本研究对地表高温监测的准确性,本文与 MODIS 地表温度产品^[22]进行了对比分析。主要选择了图 2b 中的高温区域(图像中部的河南南阳、陕西关中粮区和西北商品粮基地的宁夏平原)进行对比分析。表 5 列出了 3 个高温区域等面积采样监测对比结果(VIIRS 数据分辨率高于 MODIS,相同面积下 VIIRS 像元数多),其中标准差为采样像元温度的标准差。从表中可以看出,本算法和 MODIS 地表温度产品反演获取的地表温度数据在中国地区几个有高温分布的粮食产区较为相似,均值差值小于 1,说明本文提出的算法在反演精度上较高,能够满足地表温度监测的需要。这里需要说明的是本文选用的 MODIS 数据与 VIIRS 数据成像时间有 8 min 的时差,在短期时间内地表温度一般不会发生较大改变,若两数据的时差较大则不适合用于精度的对比验证。

表 5 基于 MODIS 数据的高温区域反演精度结果验证
Table 5 Validation of retrieval accuracy with MODIS data on high temperature area

区域 Area	像元数 Pixel number		标准差 Standard deviation		均值 Mean value/	
	MODIS 数据	本文 算法	MODIS 数据	本文 算法	MODIS 数据	本文 算法
	河南南阳	1 662	4 505	1.715	1.790	47.023
陕西关中	402	912	1.132	1.788	46.594	46.033
宁夏平原	453	1 204	0.822	2.227	47.343	46.505

6 结 论

通过对可见光红外成像辐射仪(visible infrared imager radiometer suite, VIIRS)数据反演地表温度的分裂窗算法进行验证分析表明:

1) 联合 Aqua MODIS 水汽数据进行 VIIRS 地表温度反演能够弥补 VIIRS 分裂窗算法反演温度缺少的水汽通道,本研究反演获取的地表温度参数与成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据温度产品精度较为一致。

2) 在比较小的水汽含量范围内,VIIRS M15 和 M16 通道水汽含量和大气透过率的关系可用线性化来近似表述,但在水汽含量变化较大时 M15 通道的线性关系不稳定,因此使用水汽查找表替代线性简化能够更加准确的获取大气透过率。

3) 通过实测数据与全国近地表大气温度的对比分析表明,本文算法反演得到的温度能够较好的获取地表温度;与 MODIS 温度产品在全国有高温分布的河南南阳、陕西关中、宁夏平原区域对比显示本研究算法反演温度精度较高,与 MODIS 数据温度差 < 1 K;通过使用 MODTRAN 进行精度分析表明,本研究反演误差为 0.431 K,标准偏差为 0.247 K,表明反演的精度较高,反演的波动性不大,一般精度 > 1 K;通过与传统分裂窗算法进行精度对比分析,本研究算法反演精度的稳定更好,能够满足中国地区农情监测中地表温度的监测需求。

4) 但需要指出的是,由于 Aqua 卫星和 NPP 卫星存在一定的轨道时差,在短期内天气发生较大变化,从 Aqua MODIS 获取水汽数据失败或与真实值存在较大差距时可能会对本文的反演算法有一定的影响。

致谢:感谢美国国家海洋与大气管理局提供的 VIIRS 数据和戈达德太空飞行中心提供的 MODIS 数据。

[参 考 文 献]

- [1] Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 14 - 37.
- [2] 孙灏,陈云浩,孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147 - 154.
Sun Hao, Chen Yunhao, Sun Hongquan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 147 - 154. (in Chinese with English abstract)
- [3] 覃志豪,高懋芳,秦晓敏,等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 64 - 71.
Qin Zhihao, Gao Maofang, Qin Xiaomin, et al. Methodology to retrieve land surface temperature from

- MODIS data for agricultural drought monitoring in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(4): 64 - 71. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘云, 孙丹峰, 宇振荣, 等. 基于 NDVI-Ts 特征空间的冬小麦水分诊断与长势监测[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 147 - 151.
Liu Yun, Sun Danfeng, Yu Zhenrong, et al. Water deficit diagnosis and growing condition monitoring of winter wheat based on NDVI-Ts feature space[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(5): 147 - 151. (in Chinese with English abstract)
- [5] 毛克彪, 覃志豪, 施建成. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(8): 703 - 707.
Mao Kebiao, Qin Zhihao, Shi Jiancheng. The Research of Split-Window Algorithm on the MODIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(8): 703 - 707. (in Chinese with English abstract)
- [6] 毛克彪, 施建成, 覃志豪, 等. 一个针对 ASTER 数据同时反演地表温度和比辐射率的四通道算法[J]. *遥感学报*, 2006, 90(4): 593 - 599.
Mao Kebiao, Shi Jiancheng, Qin Zihao, et al. A four-channel algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from ASTER data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 90(4): 593 - 599. (in Chinese with English abstract)
- [7] 徐剑波, 赵凯, 赵之重, 等. 利用 HJ-1B 遥感数据反演西北地区近地表气温[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 145 - 153.
Xu Jianbo, Zhao Kai, Zhao Zhizhong, et al. Estimation of near-surface air temperature from HJ-1B satellite data in Northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(22): 145 - 153. (in Chinese with English abstract)
- [8] Mao Kebiao, Tang Huajun, Wang Xiufeng, et al. Near-surface air temperature estimation from aSTER data using neural network[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(20): 6021 - 6028.
- [9] Duan S B, Li Z L, Tang B H, et al. Generation of a time-consistent land surface temperature product from MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 339 - 349.
- [10] Qin Z H, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719 - 3746.
- [11] McMillin L M. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 5113 - 5117.
- [12] Sobrino J A, Caselles V. A methodology for obtaining the crop temperature from NOAA-9 AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(12): 2461 - 2475.
- [13] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces[J]. *Remote Sensing*, 1990, 11(3): 369 - 393.
- [14] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892 - 905.
- [15] Qin Z, Dall'Olimo G, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA advanced very high resolution radiometer data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D19): 22655 - 22670.
- [16] Mao K, Qin Z, Shi J, et al. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(15): 3181 - 3204.
- [17] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 980 - 996.
- [18] Wan Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 59 - 74.
- [19] Schueler C F, Lee T F, Miller S D, et al. VIIRS constant spatial-resolution advantages[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(16): 5761 - 5777.
- [20] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(2): 256 - 266.
- [21] 甘甫平, 陈伟涛, 张绪教, 等. 热红外遥感反演陆地表面温度研究进展[J]. *国土资源遥感*, 2006, 18(1): 6 - 11.
Gan Fuping, Chen Weitao, Zhang Xujiao, et al. The progress in the study of thermal infrared remote sensing for retrieving land surface temperature[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006, 18(1): 6 - 11. (in Chinese with English abstract)
- [22] Coll C, Wan Z, Galve J M. Temperature-based and radiance-based validations of the V5 MODIS land surface temperature product[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D20): D20102.

Retrieval land surface temperature from visible infrared imager radiometer suite data

Xia Lang^{1,2}, Mao Kebiao^{1,2}, Ma Ying², Sun Zhiwen³, Zhao Fen¹

(1. National Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;

3. Space Star Technology Company Limited, Beijing 100086, China)

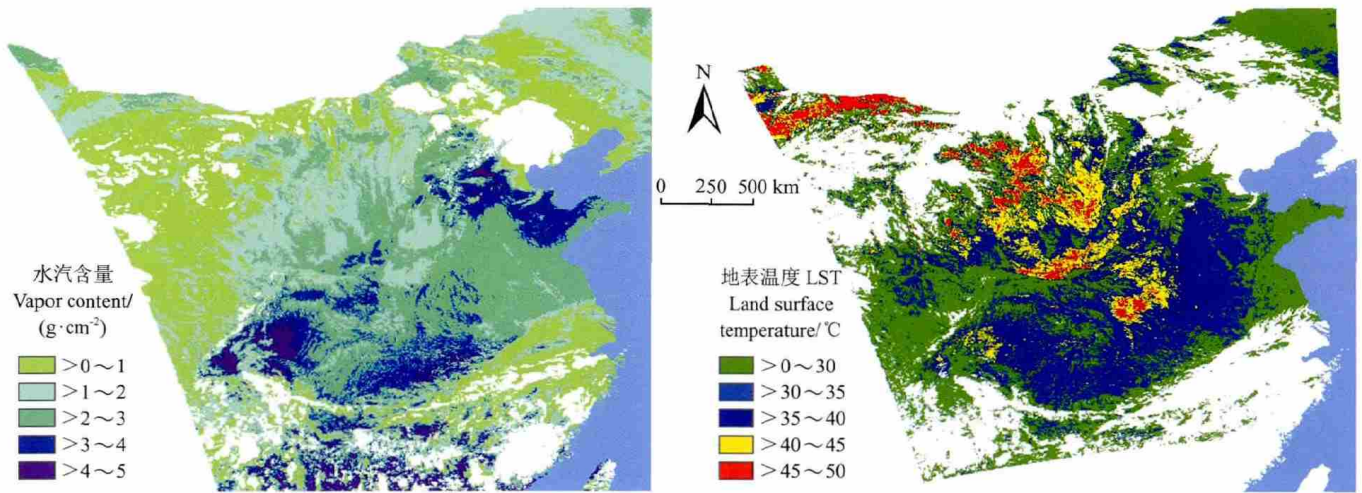
Abstract: The land surface temperature is a basic parameter which had been widely used in agriculture drought monitoring, crop monitoring and the yield forecasting model. In this study, we developed a split-window algorithm to retrieve land surface temperature from VIIRS (visible infrared imager radiometer suite) data which can overcome the lack of the water channel. The key parameter of water vapor content required by algorithm is obtained from MODIS data which is board on an Aqua satellite, and the emissivity computed from international geosphere biosphere program (IGBP) global vegetation classification. The character of the VIIRS data was briefly introduced and the method of estimation of the transmittance of atmosphere and emissivity of the VIIRS M15 and M16 channels also been discussed. Then, a VIIRS data imaging on June 4, 2013 has been chosen to verify the accuracy of the algorithm. By comparison with the global surface summary of day (GSOD) data, the result indicates that the method we proposed can retrieve the land surface temperature in china very well. Comparison with the MODIS LST data in the grain producing area with a surface temperature greater than 45 shows that the precision of the algorithm is high and the retrieval error is less than 1 K. Finally, the accuracy assessment of the method was performed with the moderate resolution transmission 4 (MODTRAN4) program. The water vapor content is set to 1.0 g/cm², 2.2 g/cm², 3.4 g/cm², the surface temperature is 295 K, 310 K, 325 K, and the land type of dry soil and green vegetation with the emissivity of 0.963, 0.984 (VIIRS M15) and 0.974, 0.992 (VIIRS M16), respectively. The simulation analysis indicates the accuracy of this algorithm is greater than 1 K with the root mean square (RMS) errors 0.516 K and the average error 0.447 K. The much higher accuracy of the method confirms the application of the algorithm in agricultural information from VIIRS data is available.

Key words: remote sensing; temperature; water vapor; sensors; visible infrared imager radiometer suite (VIIRS); retrieval; moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS)

(责任编辑：张俊芳)

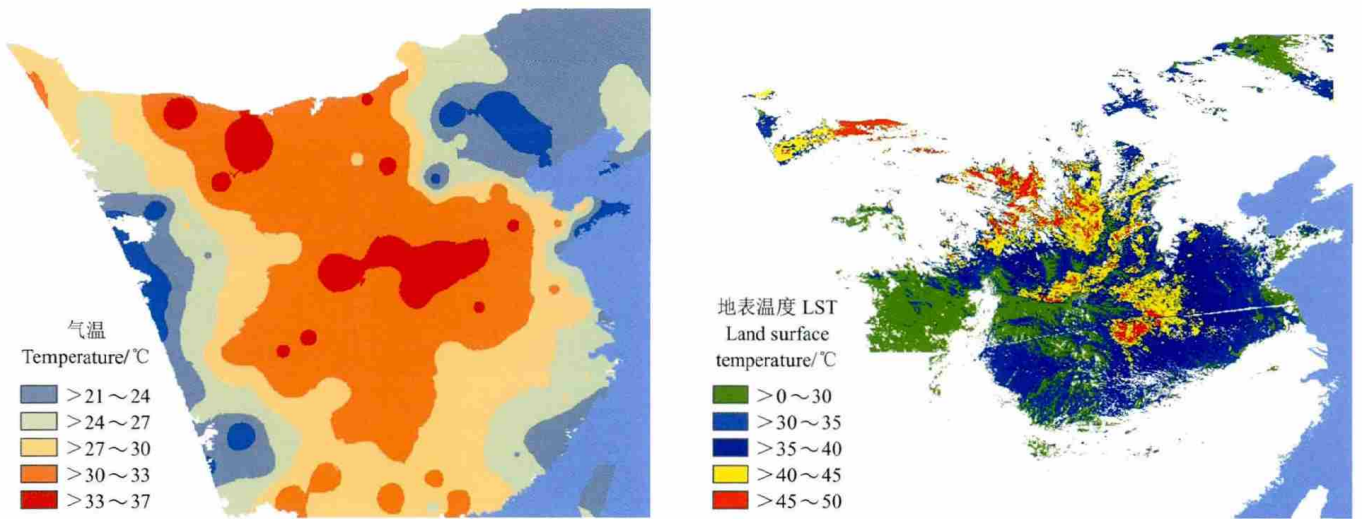
夏 浪等. 基于可见光红外成像辐射仪数据的地表温度反演 (图 2)

Xia Lang, et al. Retrieval land surface temperature from visible infrared imager radiometer suite data



a. 从 Aqua MODIS 获取的 VIIRS 水汽数据
a. VIIRS vapor data gets from Aqua MODIS MYD05_L2

b. 本研究反演地表温度
b. Land surface temperature retrieve from this study



c. 当天下午 14:00 (北京时间) 时平均气温
c. Average air temperature at the surface (2 m height) at 14:00
(Beijing time)

d. Aqua MODIS 地表温度产品
d. LST of MODIS MYD11_L2 product

注: 浅蓝色区域为海洋, 白色为云。

Note: Light blue area stands for ocean, white stands for cloud.

图 2 VIIRS 实例数据应用分析

Fig.2 Application analysis of VIIRS data