

定量遥感专栏

近地表气温遥感反演方法综述*

冷佩¹, 廖前瑜^{1, 2*}, 任超², 李召良¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西桂林 541004)

摘要:【目的】在农业研究中, 近地表气温是影响作物发育速度的关键因子。尤其是在全球气温变暖趋势下, 对区域尺度气温进行实时监测具有十分重要的科学意义和实用价值。文章对目前常用近地表气温遥感反演方法进行回顾和总结, 对未来近地表气温遥感反演方向进行展望。【方法】随着遥感技术的不断发展, 遥感近地表气温反演已成为目前获取高时间/空间分辨率区域气温的最有效方法。该文采用文献综述的方法, 回顾和总结了近年来国内外近地表气温遥感反演研究进展, 将其归纳为4类: 大气廓线外推方法、地表温度—植被指数方法、基于数据统计的方法以及基于地表能量平衡的方法。最后对这些方法的优缺点进行评述和展望。【结果】近地表气温主要受辐射、湍流及平流等多种因素影响。因此, 准确获取近地表气温十分困难。尽管目前已有多个行之有效的遥感反演方法, 但这些方法大多依赖地面辅助数据, 尤其是在有云情况下, 由于无法有效获取诸如地表温度和地表反照率等气温反演的重要参量, 目前的方法很难得到有效应用。【结论】国内外学者针对近地表气温遥感反演开展了大量研究, 但是目前仍然缺乏独立于地面辅助数据的普适性方法。建议未来在有云条件和不同地形条件下大气辐射传输过程以及大气流动对气温影响的量化建模等方面加强研究, 以提升近地表气温遥感反演精度和适用性。

关键词: 近地表气温; 大气廓线; TVX; 数据统计; 地表能量平衡

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190101

0 引言

近地表气温是指在近地表(一般指距地面2 m处高度)观测的大气温度。近地表气温作为描述地表大气环境的重要指标, 控制着自然系统中大多数的生物和物理过程^[1-2], 是各种地表过程模型, 如地表蒸散发模型^[3-4]、水文模型^[5]、土壤—植被—水分系统动力模型^[6]等的重要驱动参数。在全球气温变暖的大背景下, 区域气温的持续攀升导致了生态环境的改变和气象灾害频发, 尤其是对农业生产的可持续发展产生了重大影响^[7-10]。因此, 准确估计近地表气温在地球表面空间上的连续分布对全球农业发展具有重要意义。

收稿日期: 2019-01-10

※ 第一作者简介: 冷佩(1986—), 博士、副研究员。研究方向: 农业定量遥感。Email: lengpei@caas.cn

通信作者简介: 廖前瑜(1994—), 硕士研究生。研究方向: 农业定量遥感。Email: qianyuliao@yahoo.com

* 基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019012)

气温是表征空气冷热的物理量。近地表气温的变化主要受到辐射、湍流和平流等多种因素影响^[11]。目前,分布在世界各地的气象站能够提供较为精确而连续时间序列的近地表气温数据,然而在稀疏空间分布的站点气温信息无法描述近地表气温在连续空间上的异质性。对于没有气象站点的地区,传统方法大多通过距离最近的有限的气象站气温观测数据插值得到^[12-18]。相比传统观测,遥感方法可以获取区域尺度的近地表气温影响因子,具有实时性、区域性、经济适用性等无可替代的优势。遥感技术的广泛应用为获取区域尺度近地表气温提供了强大的数据支撑。因此,众多学者围绕近地表气温遥感反演进行了大量研究,并已形成了众多基于遥感数据或与遥感数据结合的区域气温反演方法,这些主要可以归纳为 4 类:大气廓线外推方法、地表温度—植被指数方法(Temperature Vegetation Index, TVX)、基于数据统计的方法以及基于地表能量平衡的方法。该文系统回顾近地表气温遥感反演算法模型及最新研究进展,为相关领域获取区域近地表气温提供借鉴,对近地表气温遥感反演模型未来发展方向进行展望。

1 近地表气温遥感反演方法

1.1 大气廓线外推方法

大气廓线外推方法建立在同一垂直面空气温度是连续变化的假设之上。在此假设基础之上,通过绝热递减率(Adiabatic Lapse Rate, ALR)插值得到近地表气温。近地表气温与 ALR 之间的关系可以表示为:

$$T_a = ALR \times (H - H_0) + T_0 \quad (1)$$

式(1)中 T_a 为近地表气温, H 为地面海拔高度, H_0 为大气廓线离地面最近的气压层高度, T_0 则为 H_0 点对应的气温。

目前,MOD07_L2 是较为常用的基于大气廓线外推方法反演近地表气温的数据源。MOD07_L2 可提供全球每日分布在 20 个垂直大气压水平上(1 000、950、920、850、780、700、620、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10、5 hPa)的大气温度剖面数据,具有较高水平空间分辨率(5 km),但是这些数据仅限于晴空条件下。因此,在使用 MOD07_L2 大气廓线参数时,需要对云干扰像元进行掩膜处理和质量控制。Bisht 等^[19]利用垂直气压水平 1 000 hPa 下的空气温度作为近地表气温。然而 Tang 等^[20]认为由于海拔高度的变化,利用气压水平 1 000 hPa 下的空气温度替代近地表气温显然是不合适的,并提出了通过大气流体静力学的方法获取近地表气温。Cosgrove 等^[21]基于 MOD07_L2 产品开发了一个简单的大气廓线外推参数化方法,将 ALR 设定为每公里上升 6.5℃ 或者下降 6.5℃。因此,根据 ALR 的假设似乎能够获取晴空下垂直面上任意高度的空气温度。然而固定的 ALR 假设并不能准确地估计区域尺度的近地表气温,因为 ALR 在空间分布上是变化的;除此之外,ALR 还存在日变化、显著的季节变化和年变化^[22]。因此,基于 ALR 是常数的假设仅仅适用于均一下垫面和特定的气压水平区域^[23]。Zhu 等^[24]基于 MOD07_L2 产品大气廓线利用最接近地表的两个气压层和所对应的空气温度逐像元计算 ALR,然后通过地表气压插值得到一个气温,并利用估算得到的气温与地表温度

2019年2月

(Land Surface Temperature, LST) 取平均得到晴空下地面 2 m 的气温, 最后将晴空下的气温和 MOD06_L2 产品的 LST 建立线性回归关系, 有云情况下根据回归系数得到有云条件下地面 2 m 的气温, 全天候气温反演结果均方根误差范围为 2.4~3.3℃。Famiglietti 等^[25] 基于 MOD07_L2 大气廓线利用地表大气压非线性内插得到近地表气温, 并将结果与全球范围内 109 个地面气象站观测数据进行了对比验证, 平均均方根误差为 3.47℃。大气廓线外推的方法原理简单, 不需要地面辅助数据就能得到精度较高的晴空下近地表气温。有云条件下则需要其他的遥感数据建模估算。

1.2 地表温度—植被指数方法

1989 年 Nemani 等^[26] 人首次提出地表温度—植被指数特征空间模型。图 1 为 TVX 示意图。由于浓密植被和周围空气的热容接近, TVX 方法估算近地表气温是基于遥感图像植被全覆盖时的地表温度近似等于该地点空气温度的假设。因此, LST 随着植被覆盖度的增加趋近于该点的空气温度, 即使不发生蒸发, 全植被覆盖冠层的辐射温度也与冠层内空气温度保持平衡^[1, 27]。基于此, TVX 方法能够成功地应用于空气温度的估算有两个限制条件^[28-31]: (1) 在晴空条件下具有较为稳定的大气条件; (2) 地表在一定范围内满足土壤水分均一的条件。TVX 模型由于其物理原理明确, 模型简单, 不需要辅助数据的特点, 被广泛应用于区域近地表气温的估算。Zhu 等^[29] 将植被指数与地表温度的负相关系数阈值降至 0.1 后, 成功地利用 TVX 方法从 MODIS 陆地产品中提取出了日最高气温和日最低气温, 均方根误差为 3.79℃。Renaud 等^[32] 基于 TVX 模型估算了城市植被气温, 均方根误差范围在 3.34~6.23℃。

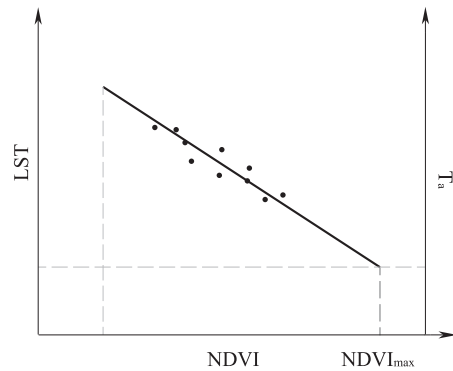


图 1 TVX 示意图
Fig.1 TVX configuration

TVX 方法估算近地表气温一般是通过建立像元阵列的 NDVI 和 LST 回归关系, 然后外推求得理论植被全覆盖情况下的 LST, 最后求得各个像元的近地表气温。关系式如下:

$$LST = a_i + b_i \times NDVI \quad (2)$$

$$T_a = a_i + b_i \times NDVI_{max} \quad (3)$$

式 (2)、(3) 中 LST 为地表温度, NDVI 为归一化植被指数, a_i 和 b_i 分别为每个移动窗口内的 LST 和 NDVI 线性回归系数的截距和斜率, T_a 为近地表气温, $NDVI_{max}$ 为理论植被全覆盖植被指数。

1.3 基于数据统计的方法

1.3.1 单因子统计模型

单因子统计模型是基于空气温度和地表温度的高度相关性, 通过建立空气温度和遥感数据地表温度的线性回归关系求得气温。Chen 等^[33] 建立了基于 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 静止气象卫星反演的地表温度和地面站点实测空气温度的线性回归关系, 统计结果显示地表温度和空气温度之间平均相关系数为 0.87,

估算的空气温度标准方差为 1.57°C 。侯英雨等^[34]基于 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 卫星的地表温度与观测空气温度的相关关系,建立了稀疏植被下垫面不同高程范围的空气温度单因子统计模型,经检验反演结果绝对误差在 $1.5\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 之间。单因子统计模型可以表述为:

$$T_a=f(LST) \quad (4)$$

该方法的优点在于模型简单,输入参数少。然而其回归系数依赖于建模数据的获取时间和地点,无法推广到区域尺度。Lin 等^[35]的研究表明在不同地形和不同时刻条件下,空气温度和地表温度的关系是变化的,在解释复杂地形表面能量通量的时空变化时必须考虑相关的环境因子。因此,仅考虑地表温度对空气温度的影响的统计模型并不适用于所有时刻和区域的空气温度估算。

1.3.2 多因子统计模型

多因子统计模型考虑了多个空气温度的影响因子建立线性或非线性模型求解空气温度。影响空气温度的因素主要可归类为两类:(1)地理变量包括海拔、纬度和离海岸线距离等;(2)物理变量(遥感变量)包括地表温度、植被指数和地表反照率等。多因子统计模型可以表述为:

$$T_a=f(LST, NDVI, Albedo, h\cdots) \quad (5)$$

式(5)中 *Albedo* 为地表反照率, *h* 为高程。

Kawashima 等^[36]在单因子统计模型基础之上,引入了 NDVI,通过平均地表温度和归一化植被指数的二元线性回归分析得到了气温,反演标准误差在 $0.47\sim 1.05^{\circ}\text{C}$ 。Cristóbal 等^[37]发现结合遥感变量(地表温度、地表反照率和植被指数)和地理变量(海拔、纬度和太阳辐射)的空气温度模型要比单纯地理模型和单纯遥感模型精度要高,混合模型日尺度气温反演结果的平均均方根误差为 1.75°C ,月尺度和年尺度的气温反演结果平均均方根误差为 1°C 。徐伟燕等^[38]考虑了地表温度、植被指数、水汽压、地表反照率及高程 5 个影响因子建立多元线性回归模型估算近地表气温,反演结果均方根误差为 2.31°C ,同时对其分白天和夜晚进行了检验,发现夜间精度比白天高。白琳等^[39]利用地表温度、植被指数、差异水体指数、地表反照率、不透水面盖度和高程 6 个影响因子,将随机森林方法应用于近地表气温的反演,反演结果的均方根误差为 1.06°C ,发现多因子的随机森林方法比单纯的多元线性回归模型精度高。Jang 等^[40]将通过 AVHRR 的 5 个波段反演得到的反射率和亮温数据,结合地理变量作为神经网络的输入层来反演空气温度,结果显示隐层节点数为 22 时精度最高,均方根误差为 1.79°C ,有 95% 的样本误差在 3°C 以内。Chenour 等^[41]采用地理加权回归方法比较了单变量和多变量模型的精度,结果显示采用地表温度、植被指数、高程、坡度及反照率的地理加权回归方法进行大气估算精度最高,平均均方根误差为 0.62°C ,平均相关系数为 0.99。大量的研究表明多因子的统计模型精度要比单因子的统计模型高。但是可移植性仍然较差,而且并不能反映湍流和平流对空气温度的影响。

1.4 基于地表能量平衡方法

忽略平流的影响,根据能量平衡方程可以建立近地表气温的表达式:

2019年2月

$$T_a = T_0 - H \frac{r_a}{\rho C_p} \quad (6)$$

式(6)中, T_a 为近地表气温, T_0 为空气动力学温度, H 为显热通量, ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热, r_a 为空气动力学阻抗。由于空气动力学温度在实际中难以获取, 因此通常假设地表温度等于空气动力学温度。空气动力学温度与地表温度之间的差异会随着植被覆盖度降低而变大, 这一假设应用在稀疏植被下垫面和裸土下垫面时会带来较大的误差^[42-43]。

Pape 等^[44] 基于能量平衡方程, 并结合地面实测的气象数据和遥感数据求解得到近地表气温, 均方根误差在 0.37~1.02℃ 之间, 但是其仅仅考虑了能量闭合系统内的湍流影响和辐射影响。然而, 在实际情况中地表能量平衡方程通常是不闭合的, 平流作用也会对气温产生影响。Zhang 等^[45] 提出了一个基于能量平衡思想估算区域气温的算法 (Advection-Energy Balance for Surface Air Temperature Algorithm, ADEBAT), 同时考虑了局部驱动力和平流的影响, 对于区域内每一个待反演像元, 寻找距离其最近的满足有温差和风速风向相近条件的两个气象站点估算平流因子, 结果均方根误差在 0.2~0.42 K。Liu 等^[46] 通过反距离加权插值改进了 ADEBAT 算法的平流因子。Zhu 等^[47] 提出了一种基于地表能量平衡算法 (Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL) 的晴空气温反演方法, 通过对极端像元 (水面像元和干燥裸土像元) 的迭代计算, 建立地表温度和气温的线性关系, 利用 MODIS 数据反演得到的结果均方根误差为 1.7℃, 利用 Landsat8 数据反演得到的结果均方根误差为 2.6℃。

2 近地表气温遥感反演方法优缺点比较

大气廓线外推方法简单易行, 可操作性强, 不需要地面辅助数据就可以获取晴天条件下的区域气温, 但是其结果精度相对于其他 3 种方法仍然有待提高。有云条件下, 可以通过已获取的晴空下空气温度和地表温度建立回归关系求得云干扰下的空气温度^[24]。与此同时, 面临的另外一个问题是通过热红外并不能获取云干扰下的地表温度数据, 实际上, 与空气温度建立回归关系的地表温度是使用统计或时空插值方法填充获取的, 仅仅是理论无云条件下的地表温度近似值, 而不是实际观测的云下地表温度^[48]。大气廓线外推方法由于其特点, 得到了广泛应用, 特别是在复杂陆地过程模型中, 常常将大气廓线外推方法获取的空气温度作为输入参数之一^[20, 23]。

TVX 方法的成功应用建立在两个假设条件下: (1) 地表温度和植被指数之间存在很强的负相关关系; (2) 全植被冠层的温度与冠层内的空气温度处于平衡状态。然而, 研究表明 TVX 方法虽然依赖于地表温度和植被指数之间的负相关关系, 但是这种依赖关系并不十分敏感, 相关系数阈值可低至 0.1^[28]。TVX 方法的一个关键是求得 $NDVI_{max}$, 研究表明 $NDVI_{max}$ 随着研究区和卫星图像的不同而变化^[1], 一般通过地面辅助数据和遥感数据之间的经验关系来判定 $NDVI_{max}$ 。而且当该方法应用于低植被覆盖度区域和裸土区域时, 由于移动窗口内的地表温度和植被指数变化范围较小而导致构成的线性关系变得

随机。因此，TVX 方法不适用于低植被覆盖度或非植被覆盖下垫面。尽管 TVX 方法得益于简单的模型和输入，但 $NDVI_{max}$ 的经验性大大限制了 TVX 模型的估算精度和实际应用。

数据统计类的方法是基于地面观测数据和遥感数据建立空气温度与其影响因子的一种线性或非线性的经验关系。该方法原理简单，需要大量的输入数据，结果精度受到输入数据的影响。由于地面气象站点的疏密程度影响，可移植性差是这类模型的最大特点。随着计算机技术的发展和大数据时代的到来，数据统计模型有了较大的发展，逐渐向更加复杂的非线性算法发展^[39]。基于数据统计的方法由于其简单的原理，常常被引入到其他 3 种气温反演模型中用来提高气温的反演精度。

基于地表能量平衡的方法估算气温则具有良好的普适性和物理基础，并且具有较高的反演精度。但是模型复杂，参数过多导致而容易造成误差传递和累积，且具有遥感难以获取的地面参数，如风速、空气动力学阻抗和空气动力学温度等。在实际情况中，地表能量平衡通常都是不闭合的，需要考虑湍流和平流的影响。因此，地表能量平衡模型通常需要地面辅助数据计算湍流因子和平流因子对其结果进行校正，限制了其在大区域范围上的应用。

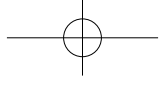
表 1 给出了上述 4 类近地表气温遥感方法的对比。总的来说，每种方法都有各自的优缺点。然而，目前还没有一种方法既能够独立于（或较少依赖于）地面辅助数据而又具有普遍适用性。

表 1 不同近地表气温遥感反演方法对比
Table 1 Comparison of methods for estimating near-surface air temperature

方法	优点	缺点	精度 (°C)	主要参考文献
大气廓线外推方法	简单易行；不需要辅助数据	不适用于有云情况下；精度较低	2.4~3.47	Zhu 等 ^[24] (2017) Famiglietti 等 ^[25] (2018)
地表温度—植被指数方法	少量输入；模型简单	不适用于低植被覆盖和裸土区域； $NDVI_{max}$ 具有经验性	3.34~6.23	Zhu 等 ^[29] (2013) Renaud 等 ^[32] (2018)
数据统计方法	原理简明；便于操作	可移植性差；需要大量观测数据	0.62~1.75	Cristóbal 等 ^[37] (2008) Mohammadi 等 ^[41] (2018)
地表能量平衡方法	普适性强，具有清晰的物理意义	需要大量数据包括一些遥感难以获取的数据	0.2~2.6	Zhang 等 ^[45] (2015) Zhu 等 ^[47] (2017)

3 结论与展望

该文系统回顾和总结了近地表气温遥感反演的研究进展，并将这些方法归纳为 4 类：大气廓线外推方法、地表温度—植被指数方法（TVX）、基于数据统计的方法以及基于地表能量平衡的方法。前 3 种方法是基于空气温度和其他变量之间的经验关系，易于理解



2019年2月

和使用;而地表能量平衡模型则依赖于空气温度的物理形成机制,较为复杂,需要大量输入数据,具有良好的可移植性和通用性。综合目前国内外近地表气温遥感反演的发展现状,对近地表气温遥感反演算法未来的发展方向做出展望。

(1)在晴空条件下,上述4类方法都有一定适用性。然而现有的气温遥感反演算法除了大气廓线外推方法之外,其余3类方法一般都依赖地面观测数据与遥感数据共同求解。距离通过纯遥感数据反演得到高精度的全球气温还有一定的距离。同时TVX方法和基于地表能量平衡的方法不适用于低植被覆盖区域和裸土区域。未来应该加强不同地形条件下的大气辐射传输过程研究。此外,晴空条件下,地表温度的遥感反演技术已较为成熟,而地表温度与近地表气温密切相关。考虑到静止气象卫星具有较高的时间分辨率,而现有气温反演算法较少考虑地表温度日变化信息。因此,将地表温度和其他地表参数的日变化信息引入气温反演中,有可能是提高晴空条件下气温反演精度的有效途径。

(2)在云覆盖情况下,目前仅有数据统计方法适用。面临的主要困难是在有云条件下,无法获取地表温度、地表反照率以及植被指数等诸多气温反演的重要量。这也是定量遥感领域面临的巨大挑战之一。尽管目前已经发展了大量估算云下地表参数的算法,但大多数是基于时间和空间的插值填充获取的,并不能反映实际云覆盖条件下的地面真值。微波由于能穿透云层的特点,被广泛应用于获取云下地表参数。因此,作者认为未来应该加强有云条件下的辐射传输过程研究,发展利用微波遥感数据获取区域尺度近地表气温的方法。

(3)无论是在晴空还有云覆盖条件下,现有的近地表气温遥感反演算法基本上忽略了平流对空气温度的影响,然而在实际中平流对空气温度的影响是显著的。平流因子可以描述为关于风速的函数,但是目前还没有可行的风速反演方法。现有的算法大多通过地面观测气温与方程求解气温之间的差分估算平流因子。因此大气流动对气温影响的量化建模是今后近地表气温遥感反演能否摆脱地面辅助数据,建立可靠的普适气温反演模型的关键。

参考文献

- [1] Nieto H, Sandholt I, Aguado I, et al. Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: calibration and validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(1): 107~116.
- [2] Prihodko L, Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(3): 335~346.
- [3] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2005.
- [4] Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(2): 161~167.
- [5] Yates D, Sieber J, Purkey D, et al. WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 2005, 30(4): 487~500.
- [6] Chartzoulakis K, Psarras G. Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 106(2/3): 147~157.
- [7] 张秀云,姚玉璧,杨金虎,等.中国西北气候变暖及其对农业的影响对策. *生态环境学报*, 2017(9): 1514~1520.

- [8] 郭建平 . 气候变化对中国农业生产的影响研究进展 . 应用气象学报, 2015(1): 1~11.
- [9] 周广胜 . 气候变化对中国农业生产影响研究展望 . 气象与环境科学, 2015(1): 80~94.
- [10] Purkey D R, Joyce B, Vicuna S, et al. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, 2008, 87(S1): 109~122.
- [11] 吴源 . 影响气温的因素 . 地球, 1995, 03: 29~30.
- [12] Liu S, Su H, Tian J, et al. Evaluating four remote sensing methods for estimating surface air temperature on a regional scale. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(3): 803~814.
- [13] 徐永明, 覃志豪, 万洪秀 . 热红外遥感反演近地层气温的研究进展 . 国土资源遥感, 2011(1): 9~14.
- [14] 廖顺宝, 李泽辉 . 气温数据栅格化中的几个具体问题 . 气象科技, 2004(5): 352~356.
- [15] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等 . 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例 . 地球信息科学学报, 2011(4): 539~548.
- [16] 程朋, 任鸿瑞 . 山西高原气温空间插值分析 . 河北师范大学学报 (自然科学版), 2016(1): 73~79.
- [17] 张丽文, 黄敬峰, 王秀珍 . 气温遥感估算方法研究综述 . 自然资源学报, 2014, 29(3): 540~552.
- [18] Sun Y J, Wang J F, Zhang R H, et al. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 80(1): 37~48.
- [19] Bisht G, Venturini V, Islam S, et al. Estimation of the net radiation using MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 52~67.
- [20] Tang B H, Li Z L. Estimation of instantaneous net surface longwave radiation from MODIS cloud-free data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3482~3492.
- [21] Cosgrove B A. Real-time and retrospective forcing in the North American Land Data Assimilation System(NLDAS)project. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22): 8842.
- [22] 孙从建, 李伟, 李新功, 等 . 青藏高原西北部近地表气温直减率时空分布特征 . 自然资源学报, 2018(7): 1270~1282.
- [23] Bisht G, Bras R L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1522~1534.
- [24] Zhu W B, Lú A, Jia S, et al. Retrievals of all-weather daytime air temperature from MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 189: 152~163.
- [25] Famiglietti C A, Fisher J B, Halverson G, et al. Global validation of MODIS near-surface air and dew point temperatures. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(15): 7772~7780.
- [26] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and Thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 276~284.
- [27] Prince S D, Goetz S J, Dubayah R O, et al. Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using advanced very high-resolution radiometer satellite observations: comparison with field observations. *Journal of Hydrology*, 1998, 212: 230~249.
- [28] Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, et al. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 262~274.
- [29] Zhu W B, Lú A, Jia S. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 62~73.
- [30] Goward, Samuel N, Xue Y, et al. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 225~242.
- [31] Vancutsem, Christelle, Ceccato, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 449~465.
- [32] Misslin R, Vaguet Y, Vaguet A, et al. Estimating air temperature using MODIS surface temperature images for assessing *Aedes aegypti* thermal niche in Bangkok, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(9): 537.
- [33] Chen E, Jr L H A, Bartholic J F, et al. Comparison of winter-nocturnal geostationary satellite infrared-surface temperature with shelter-height temperature in Florida. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(4): 313~327.
- [34] 侯英雨, 张佳华, 延昊, 等 . 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度 . 气象, 2010(04): 75~79.
- [35] Lin X, Zhang W, Huang Y, et al. Empirical estimation of near-surface air temperature in China from MODIS LST data by considering physiographic features. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 629~643.
- [36] Kawashima S, Ishida T, Minomura M, et al. Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights. *Collected Papers of Agricultural Meteorology*, 2000, 41(9): 1570~1579.

2019年2月

- [37] Cristóbal J, Ninyerola M, Pons X. Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D13).
- [38] 徐伟燕, 孙睿, 金志凤, 等. 基于 MODIS 数据的近地表气温估算. *气象与环境科学*, 2015, 38(1): 1~6.
- [39] 白琳, 徐永明, 何苗, 等. 基于随机森林算法的近地表气温遥感反演研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(3): 390~397.
- [40] Jang J D, Viau A A, Ancitil F. Neural network estimation of air temperatures from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(21): 4541~4554.
- [41] Mohammadi C, Farajzadeh M, Ghavidel Rahimi Y, et al. Comparison of univariate and multivariate geographically weighted regression for estimating air temperature over Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(13): 360.
- [42] Su Z. The surface energy balance system(SEBS)for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85~99.
- [43] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3/4): 263~293.
- [44] Pape R, Löffler J. Modelling spatio-temporal near-surface temperature variation in high mountain landscapes. *Ecological Modelling*, 2004, 178(3/4): 483~501.
- [45] Zhang R H, Rong Y, Tian J, et al. A remote sensing method for estimating surface air temperature and surface vapor pressure on a regional scale. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 6005~6025.
- [46] Liu S, Su H, Zhang R, et al. Estimating the surface air temperature by remote sensing in Northwest China using an improved advection-energy balance for air temperature model. *Advances in Meteorology*, 2016, 2016: 1~11.
- [47] Zhu S, Zhou C, Zhang G, et al. Preliminary verification of instantaneous air temperature estimation for clear sky conditions based on SEBAL. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(1): 71~81.
- [48] Duan S B, Li Z L, Leng P. A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 107~117.

A review of methods for estimating near-surface air temperature from remote sensing data

Leng Pei¹, Liao Qianyu^{1, 2*}, Ren Chao², Li Zhaoliang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: [**Purpose**] Air temperature is a key factor affecting the growth rate of crops in agricultural study. Under the trend of global warming, it is significant to monitor changes of air temperature in regional scale. The article discusses the current methods for estimating near-surface air temperature from remote sensing data and looks forward to the future development of retrievals methods. [**Method**] With the development of remote sensing science, remote sensing technology has become an effective way for obtaining spatial distribution of air temperature with high temporal-spatial resolution. The article reviews and summarizes the recent research progresses for estimating near-surface temperature from remote sensing measurements. In general, these methods can be roughly catalogued into four types: atmospheric profile method, temperature-vegetation index method, statistical method, surface energy balance method. Finally, the advantages and disadvantages of these methods are evaluated. [**Result**] Air temperature is generally influenced by radiation, turbulence and advection, thus

making it difficult to obtain. Although a number of methods have been developed, most of them rely on auxiliary data whatever the complexity of the model. Moreover, in the case of clouds, many important parameters cannot be obtained such as land surface temperature, land surface albedo and so on. [**Conclusion**] Various parameterization algorithms have been developed to estimate near-surface air temperature from remote sensing observations. However, there is a long way to develop a universal parameterization algorithm without auxiliary data. It is necessary to explore atmospheric radiation transmission under conditions of clouds and different topography. To improve the research of near-surface air temperature method, influence of atmosphere on air temperature should be taken into consideration.

Key words: near-surface air temperature; atmospheric profile method; TVX method; statistical model; surface energy balance method

欢迎订阅《中国农业信息》

《中国农业信息》(双月刊)由农业农村部主管,中国农学会农业信息分会、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所共同主办,是我国目前全方位传播和刊载国内外农业遥感/农业信息科学领域的信息获取、处理、分析和应用服务的理论、技术、系统集成、标准规范等方面最新进展和成果,促进学术交流以及农业信息学科关键技术与产品的创新研发、集成推广和应用示范的综合性科学技术期刊。

主要刊登农业遥感、农业传感器、农业信息智能处理、精准农业/智慧农业、农业监测预警与信息服务系统、农业物联网、智能装备与控制、虚拟农业、人工智能、信息技术标准等方向学科热点领域的最新、最重要的理论研究和应用成果。主要栏目有:农业遥感、智慧农业、综合研究、农业信息技术、农业物联网、专题报道等。目前被中国知网(CNKI)、万方数据、中文科技期刊数据库、中国核心期刊(遴选)数据库等多家数据库收录。

《中国农业信息》为国内外公开发行的刊物,开本为 16 开,彩色四封,读者范围广,影响面大,全国各地邮局均有订阅。每双月 25 号出版,定价为 25.00 元/册,150 元/年。

邮局汇款

收 款 人:《中国农业信息》编辑部

地 址:北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农科院资源所区划楼 315

邮 编:100081

银行汇款

开 户 行:农行北京北下关支行

行 号:103100005063

账 号:11050601040011896

单位名称:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

电 话:(010) 82109628 82109632

传 真:(010) 82109628 82109632

E m a i l : nyxxbjb@caas.cn

邮发代号:2-733

投稿网址:www.cjarrp.com