

文章编号: 1007-4619(2005)05-0570-06

利用 MODIS 遥感影像获取近地层气温的方法研究

齐述华^{1,2}, 王军邦¹, 张庆员¹, 骆成凤¹, 郑林²

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 江西师范大学 鄱阳湖生态环境与资源研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330027)

摘要: 由于冠层叶片群体效应, 在 1km 的空间尺度上遥感获取浓密植被陆面温度与气温近似相等。根据这个原理对利用遥感手段获取气温进行了尝试, 提出利用 $NDVI T_s$ 空间获取气温的方法, 计算气温空间分布模式, 同时对 Prihodko 和 Goward 提出的气温遥感获取模型 (简称 PG 模型) 进行试验并与 $NDVI T_s$ 空间法进行了对比。根据 Parton 和 Logan 提出的气温尺度转换模型, 利用气象站观测最高气温和最低气温获取 Terra 卫星过境时刻气温作为“测定值”, 对遥感获取的气温进行检验, 得到以下结论: PG 模型计算气温与观测结果相比偏高, 而 $NDVI T_s$ 法计算结果偏低, 但是其总体误差范围相当, 大约为 $+4^{\circ}\text{C}$; 与 PG 模型相比, 尽管 $NDVI T_s$ 空间法获得的气温在精度上对 PG 模型没有多大的改善, 但这种方法能够更加充分利用遥感获取的信息, 而且在计算机运算效率上也有很大的改进, $NDVI T_s$ 空间法相对于 PG 模型具有一定优势。

关键词: 气温; 遥感; MODIS 陆地表面温度; $NDVI$

中图分类号: TP79 P407 **文献标识码:** A

1 引言

气温是描述陆地环境条件的重要参数, 也是气象观测资料中最基本观测项目之一。事实上关于全球气候变暖的报道也是基于历史气温的变化分析提出来的, 因此, 气温是全球变化研究中的一个重要研究对象。由于近地球表面气温控制着大部分陆地表面过程 (如光合作用、呼吸作用及陆地表面蒸散过程等), 因此气温是植物生理、水文、气象、环境等科学很关注的一个重要近地表气象参数, 获取气温的时空分布对于更好地理解陆地表面过程和研究全球变化等都显得非常重要。

然而, 气温受陆地地表特征的影响非常明显, 如高山、水体、植被以及土壤含水量等, 以至表现出很大的空间异质性。目前气温资料基本由气象观测站收集, 但是在不同的地形和不同景观条件下, 一个气象站观测的数据能够代表的范围有很大的差别, 况且在广大的人烟稀少地区布置的气象观测站很稀疏或根本没有气象观测, 以至在进行空间内插的过程中不能够获得满意的气温空间分布, 从而影响模型

的模拟结果。

从区域能量平衡的观点, 遥感获取的陆地表面温度 (Land Surface Temperature, LST) 和气温之间必然存在着能量方面的联系, 影响着陆地表面能量交换的因素主要有植被、地形和土壤湿度等, 因此, 从这些因子中, 寻找遥感获取的 LST 和气温之间的关系也是可能的, 吴可军等^[1] 在利用 NOAA 卫星资料分析城市热岛效应的过程中, 采用 9 点平滑方法将 LST 转换为气温, 该方法在研究城市热岛的过程中可能是合理的, 因为城市在 NOAA 影像中植被覆盖度是很低的, 植被覆盖的空间变异很小。但由 LST 大面积获取气温的过程中, 忽略植被的影响就不合理了。

白天的观测数据表明: LST 和光谱植被指数之间表现显著的负相关, 这个关系在多个植被覆盖类型区和传感器数据都获得相似的结果^[2-5] 这种关系虽然是潜热通量、冠层阻力、土壤湿度等共同作用的结果, 但研究表明即使在很干旱的条件下, 这种关系也是非常显著^[2,4,6]。单叶模拟的结果表明在强太阳辐射、水汽压亏缺大并且干旱的条件下, 单叶的温度要比周围气温高 $5-10^{\circ}\text{C}$ ^[2,8], 但在冠层叶片群体

收稿日期: 2004 02 07 修订日期: 2004 05 26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-02), 国家自然科学基金资助项目 (40271086), 国家科技攻关计划 (2001DFBA0005) 和国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412500) 资助。

作者简介: 齐述华 (1973—) 男, 博士, 现为江西师范大学地理与环境学院副教授, 主要研究方向为农业遥感和生态环境遥感。

效应作用下,许多研究者认为在一定的范围内,选择高植被覆盖度像元的 LST 作为气温的估计值是可行的^[3-9],但是当所选择的范围内根本就没有这样像元的条件下,这种方法就不再适用。

Prhodko 和 Goward 等^[10]假设气温与浓密植被冠层温度近似的基础上,结合可见光反射率和热辐射信息,通过温度植被指数 (TVX) 的方法,根据气温的空间自相关分析的结果,利用空间分辨率为 1 km NOAA 图像的 13×13 像元窗口中的植被指数和 LST 的负线性关系外推求得在代表植被完全覆盖下 $NDVI$ (0.86) 的 LST , 作为气温的估计值,并与实际测定的温度进行对比获得了较好的结果。下文将 Prhodko 和 Goward 提出的气温遥感获取方法简称为 P-G 模型。

P-G 模型局限在固定观测站点时间序列上的验证,并没有得到同一时相气温的空间分布。根据作者的尝试,要利用这种方法获得大区域的气温空间分布还是存在一定的困难,比如在中国的沙漠地区,在 13×13 个像元中的 $NDVI$ 值都是很小的,在 $NDVI T_s$ 空间中聚集在一个地方,难以获得 $NDVI$ 和 T_s 之间的负相关关系;在植被覆盖度极高的森林地区,由于 $NDVI$ 很高,在 $NDVI T_s$ 空间中同样不能够获得满意的负相关关系;雪盖、部分云覆盖或水体像元都具有很低 $NDVI$ 和 LST 值,导致获得的 $NDVI$ 和 T_s 的关系呈正相关,这是不合理的,去除这些像元参与回归又会导致没有足够的数据点。本文在依然假定气温与浓密植被冠层温度近似的基础上,对 P-G 模型进行了试验,提出利用 $NDVI T_s$ 空间获取气温的方法,试图克服 P-G 模型存在的缺点。

2 原理

在图 1 所示的典型 $NDVI T_s$ 空间中,旱边和湿边的延长线将有一个交点,连接 $NDVI T_s$ 空间中的任何一点和干湿边交点,获得直线方程,该直线斜率能够反映土壤水分状况^[11],根据该直线方程计算代表完全植被覆盖条件下的 $NDVI$ (0.86) 的 T_s 作为近地层气温,按照这样的方法,如果像素在 $NDVI T_s$ 空间中同一条直线上,这些像素点具有相等气温。

根据 Parton Logan^[12]模型,利用气象观测站发布的最高气温、最低气温及其观测站经纬度、日序等计算卫星过境时刻的气温值,并以此气温值作为地面观测值对遥感获取的近地层气温进行验证分析。Kahn 等^[13]利用在澳大利亚 CSIRO 试验站观测的

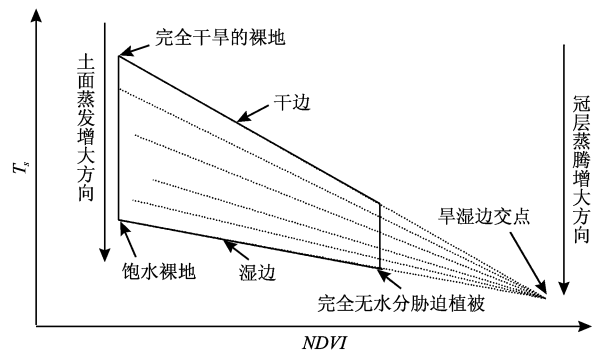


图 1 $NDVI T_s$ 空间示意图

Fig 1 The Sketch map for $NDVI T_s$ space

每小时气温对 Parton Logan 法做了检验,并得到广泛的应用^[14-15]。本文根据 Parton Logan 模型,利用国家气象局发布的最高气温和最低气温计算 Terra 卫星过境 10:30 时刻的气温作为观测值,对遥感获取的气温值进行比较。

3 数据处理

数据来自美国 LP DAAC (Land Process Distributed Active Center) 的 MODIS 数据植被指数和 LST 产品,其中植被指数产品为 16 天合成的, LST 是每天的数据。在 MODIS 数据产品处理软件 MRT 的支持下,将覆盖全中国范围的 EOS HDF 文件拼接和重采样到 Albers 投影。本文利用了 2002 年第 150 152 154 155 161—166 等 10 天的遥感数据和气温观测数据,并主要以第 150 天的数据研究结果进行讨论。

图 2、图 3 分别是 P-G 模型和 $NDVI T_s$ 空间法计算气温空间分布的过程,在计算气温的过程中,考虑到积雪的像素点对 $NDVI T_s$ 负相关及 $NDVI T_s$ 空间中湿边的影响,将海拔高于 4500 m 的像素点作为无效数据点。此外 P-G 模型中有效斜率范围是根据多个 13×13 掩膜范围内 $NDVI$ 和 T_s 关系进行试验获得的。

4 结果与讨论

4.1 P-G 模型

以第 150 天的数据为例,图 4 是 2002 年第 150 天白天 LST 空间分布,图 5 是由 P-G 法获得的气温分布,图中白色区域为受云影响或海洋地区的没有数据区。这是使 13×13 窗口内有效像素点数目减

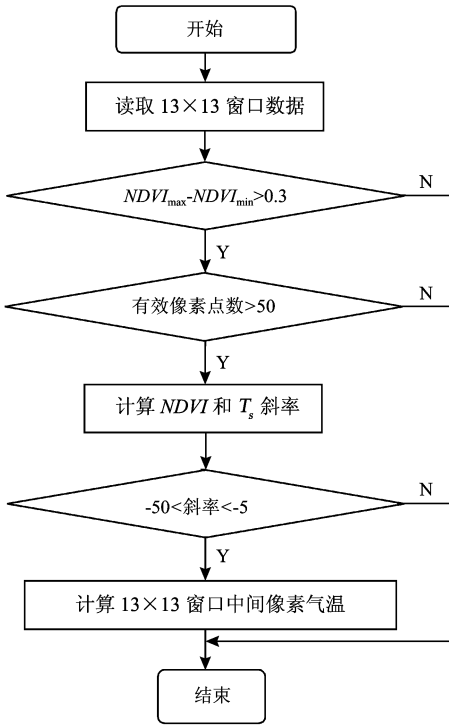


图 2 P-G 模型计算气温流程

Fig 2 The flow chart for Ta estimating with P-G method

少的主要原因,此外,对于无 LST 的像素点也无法获得其气温值。图 5 是由 P-G 模型计算第 150 天的气温分布。由图 4 图 5 可以看出即使在能够获得 LST 的像素点,或者由于 13×13 窗口的像素点在 $NDVI$ T_s 空间中集中,从而不能获得该像素点的气温值,或者由于窗口内有效像素太少而不足,而不能获得 $NDVI$ 和 T_s 之间的负相关关系,造成大量具有 LST 的像素点不能够获得气温值,引起信息资源的浪费。

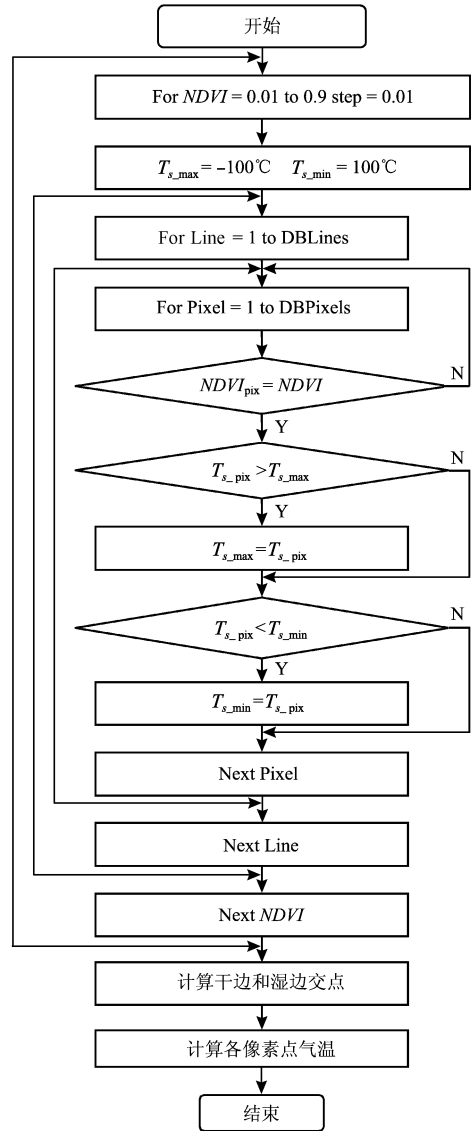


图 3 利用 $NDVI$ T_s 空间计算气温流程

Fig 3 The flow chart for Ta estimating with $NDVI$ T_s space

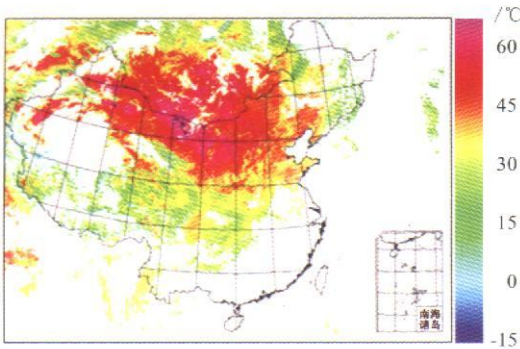


图 4 2002 年第 150 天 LST ($^{\circ}C$) 空间分布

Fig.4 The land surface temperature for the 150th day in 2002 for China

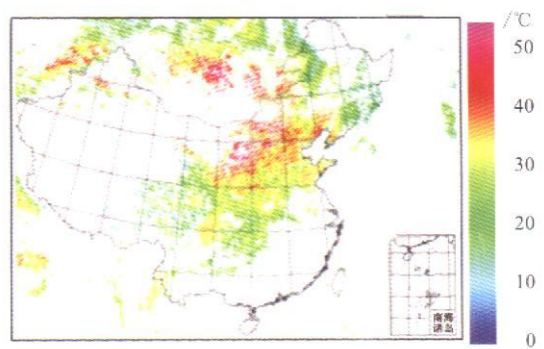


图 5 由 P-G 模型获得的第 150 天气温 ($^{\circ}C$) 空间分布

Fig.5 The air temperature for the 150th day in 2002 for China estimated with P-G method

图 6 中横坐标的测定值是指由最高气温和最低气温利用 Parton-Logan 模型计算的 1Q 30 气温 (严格意义上是准测定值, 下文同此义), 利用该计算值与遥感获取的气温进行对比的结果与 P-G 模型结果一致, 遥感获取的气温总体上大于由地面观测值计算的气温, 估算值总体平均值比测定值偏大 1°C , 平均绝对值误差 (估计值与测定值差的绝对值) 为 3.98°C 。图 7 是 10 天所有 P-G 模型获得的气温与气象站观测值的比较。

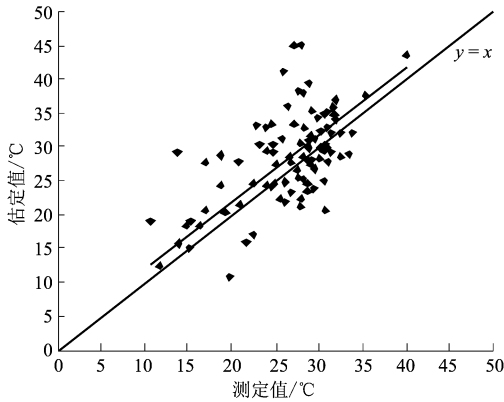


图 6 2002 年第 150 天 P-G 模型获得的气温与气象站观测值的比较

Fig 6 The comparison between estimated air temperature with P-G method and sites measured air temperature for the 150th day in 2002

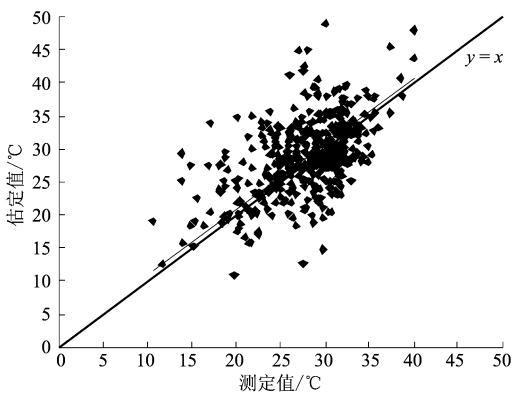


图 7 10 天所有 P-G 模型获得的气温与气象站观测值的比较

Fig 7 The comparison between estimated air temperature from P-G method and from sites measured air temperature for all ten days

4.2 NDVI-T_s 空间法

图 8 是由第 150 天 MODIS LST 和最近 16 天合成的植被指数建立的 NDVI-T_s 空间, 在该空间中剔

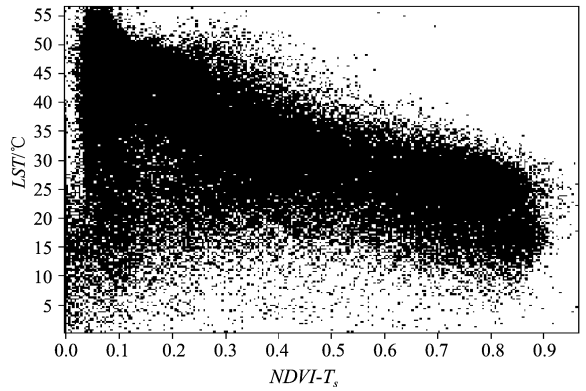


图 8 第 150 天 NDVI-T_s 空间

Fig 8 The NDVI-T_s space for the 150th day in 2002

除了云影响的像素和海拔高于 4500m 的像素点。由 NDVI-T_s 空间中的干边和湿边直线方程求得其交点, 交点处的 NDVI 值往往大于 1, 这与现实情况是不相符的, 不具有任何生物物理意义。计算 NDVI-T_s 空间中的任一数据点和交点的连线上 NDVI = 0.86 时的 LST, 将该温度作为气温的估计值 (图 9)。由图 4 图 9 看出在几乎所有具有 LST 的数据像素能够得到相应的气温值, 相对于 P-G 模型能够更充分利用所获得的信息。图 10 是由 NDVI-T_s 空间计算的 2002 年第 150 天气温与气象站观测气温对比, 图 11 是 10 天所有获得的估计值和气象站观测值的对比。

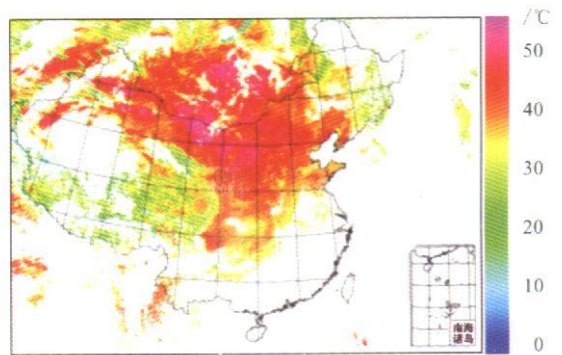


图 9 由 NDVI-T_s 空间计算获得的第 150 天气温 ($^{\circ}\text{C}$) 的空间分布

Fig 9 The air temperature for the 150th day in 2002 for China estimated from NDVI-T_s space

对比 P-G 模型与 NDVI-T_s 空间法结果表明: 与 P-G 模型计算结果相反, NDVI-T_s 空间法估算值总体平均值比观测值偏小 1.8°C , 平均绝对值误差为 3.72°C ; 在我国地形复杂的青藏高原地区和植被覆盖非常单一的沙漠地区, NDVI-T_s 空间法仍能够得

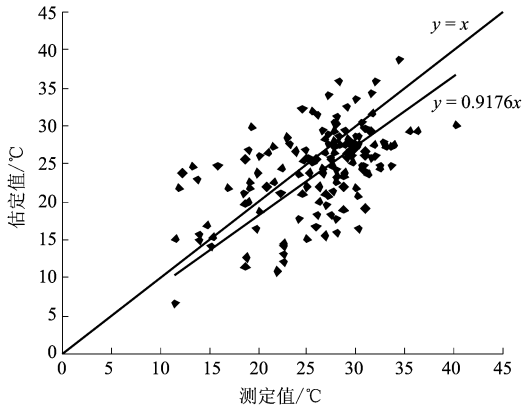


图 10 由 $NDVI T_s$ 空间计算获得的第 150 天气温与气象站观测值的比较

Fig 10 The comparison between estimated air temperature with $NDVI T_s$ space and sites measured air temperature for the 150th day of 2002

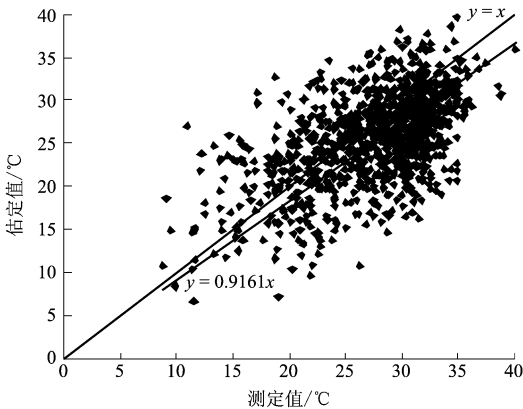


图 11 10 天所有 $NDVI T_s$ 空间计算获得的气温与气象站观测值的比较

Fig 11 The comparison between estimated air temperature from $NDVI T_s$ space and from sites measured air temperature for all ten days

到比较合理的气温值,而按照 P-G 模型,由于不能够得到 13×13 窗口内 $NDVI$ 和 T_s 之间的负相关关系(这是 P-G 模型的理论基础),不能够得到气温值;此外在程序运行效率上,由于计算每个像素点气温的过程中,有一个线性回归的过程,在 P-G 模型中,每次回归有 169 个样本,而 $NDVI T_s$ 法每次回归都是两点确定一条直线,这样 $NDVI T_s$ 法程序的时间复杂度就大大降低,具有更高的运算效率。

4.3 误差来源分析

估计值与测定值之间的偏差可以由以下几方面

的因素引起:(1)由 LST 产品中 LST 的计算偏差引起,1km 的 LST 产品是由劈窗算法计算获得的,据 Wan 等^[16]利用 6 个试验地观测值与劈窗算法计算的结果表明,该算法获得 LST 值的误差为 ± 1 ;(2)也可能是由植被指数的估计误差引起的, Prihodko 和 Goward^[10]发现 $NDVI$ 变化 0.1 就会引起估算的气温 4.2°C 的误差,由于这里采用的植被指数产品是按最大值合成法由 16 天的数据合成的,相对于当天的 $NDVI$ 会有一定偏差;(3)还有可能是由 Parton & Logan 模型的计算过境时间气温的偏差引起的,毕竟气温的日变化常常会表现为非正弦曲线;(4)以 0.86 代表完全植被覆盖浓密植被指数,在不同的植被类型也有不同,这也会影响模型计算结果,此外气温遥感获取模型本身也会是误差的来源之一。

正如 Prihodko 和 Goward^[10]所说的那样,尽管平均误差看起来是比较大,但是与利用一个点上的观测数据代表一定范围所带来的误差相比,后者掩盖了气温的空间变异特性,而且误差上相差也不大。对于广大的人烟稀少地区,遥感的作用是不可替代。因此文中采用的遥感获取气温的方法还是具有一定应用价值的。

5 结 论

文章在分析遥感获取气温的原理基础上,分别利用 P-G 模型和 $NDVI T_s$ 空间计算气温空间分布模式。得到以下结论:利用遥感的方法获取的气温精度约为 $\pm 4^\circ\text{C}$,具有广阔的应用前景;与 P-G 模型相比,尽管 $NDVI T_s$ 空间法获得的气温在精度上对 P-G 模型没有多大的改善,但这种方法能够更加充分利用遥感获取的信息,而且在计算机运算效率上也有很大的改进, $NDVI T_s$ 空间法相对于 P-G 模型具有一定优势。

参 考 文 献 (References)

- [1] Wu K J, Wang X R, Wang S X, et al. An Analysis of Urban Heat Island Effect for Air Temperature Using NOAA Satellite Data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 51(2): 203-208. [吴可军, 王兴荣, 王善型等. 利用 NOAA 卫星资料分析气温的城市热岛效应 [J]. *气象学报*, 1993, 51(2): 203-208.]
- [2] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from Combined Reflected Solar and Emitted Terrestrial Radiation: Preliminary FFE Results from AVHRR Data [J]. *Adv Space Res*, 1989, 9: 239-249.
- [3] Nemani R R, Running S W. Estimation of Regional Surface Resistance to Evapotranspiration from $NDVI$ and Thermal IR

- AVHRR Data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989 **28** (4): 276—283.
- [4] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of Normalized Difference and Surface Temperature Observations over Southeastern Australia [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991 **12** (10): 2021—2044.
- [5] Carlson T N, Capehart W J, Gilles R R. A New Look at the Simplified Method for Remote Sensing of Daily Evapotranspiration [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995 **54**: 161—167.
- [6] Goward S N, Waring R, Dye D *et al*. Ecological Remote Sensing at OTTER: Satellite Macroscale Observations [J]. *Ecological Applications*, 1994 **4**: 322—343.
- [7] Hatfield J L. Canopy Temperatures: The Usefulness and Reliability of Remote Measurements [J]. *Agron. J.*, 1979 **71**: 889—892.
- [8] Smith G A, Ranson K L, Nguyen D *et al*. Thermal Vegetation Canopy Model Studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985 **11**: 2113—2120.
- [9] Carlson T N, Gilles R R, Peny E M. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI Measurements to Infer Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover [J]. *Remote Sens. Rev.*, 1994 **52**: 45—59.
- [10] Prihodko L, Goward S N. Estimation of Air Temperature from Remotely Sensed Surface Observations [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1997 **60** (3): 335—346.
- [11] Qi S H, Wang C Y, Niu Z. A Drought Index Based on Slopes in NDVI-T_s Spaces Used in Monitoring Drought for China [C]. SPIE Proceedings, 2003, Barcelona.
- [12] Parton W J, Logan J A. A Model for Diurnal Variation in Soil and Air Temperature [J]. *Agricultural Meteorology*, 1981 **23**: 205—216.
- [13] Kahla J D, Aleksis H, Daniel B *et al*. The Regional Evaporation Project: Instrumentation and Field Measurements [R]. CSIRO Division of Water Resources, Canberra, ACT, 1987.
- [14] David L B, Jupp T, Tian G L, Tim R, Mčvicař *et al*. Soil Moisture and Drought Monitoring Using Remote Sensing: I. Theoretical Background and Methods Final Report Australia China Joint Science and Technology Commission Project 1992—1997 [R]. EOC Report, 1998.
- [15] Tim R, Mčvicař, David L B, Jupp. Estimating One time of day Meteorological Data from Standard Daily Data as Inputs to Thermal Remote Sensing Based Energy Balance Models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999 **96**: 219—238.
- [16] Wan Z M, Zhang Y L, Zhang Q G *et al*. Validation of Land Surface Temperature Products Retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002 **83**: 163—180.

Study on the Estimation of Air Temperature from MODIS Data

QI Shu-hua^{1,2}, WANG Jun-bang¹, ZHANG Qing-yuan¹, LUO Cheng-feng¹, ZHENG Lin²

(1 The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 The Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract Because of the canopy effect of leaves in canopy, the complex mixture of sunlight partly shaded and fully shaded leaves causes the phenomenon that radiant temperature for dense canopy are equal to the air temperature approximately. And based on the fact we try to retrieve the air temperature from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation with NDVI-T_s space. The air temperature at the time of satellite passing through was estimated from the maximum and minimum air temperature measured in situ with Parton & Logan model and we still named it as “measured” air temperature. Then the results from NDVI-T_s space and P-G method were validated with “measured” air temperature. The results showed that the air temperatures estimated from remotely sensed image with P-G model were higher and the ones from NDVI-T_s space were lower than “measured” averagely. But the remotely sensed air temperature estimated from the two methods is all within about +4°C error compared with the “measured” air temperature. Although the NDVI-T_s space method doesn't improve P-G model from the error scale, the NDVI-T_s space method is superior to P-G model because the former has used the remotely sensed information much fully than P-G model and has higher operation efficiency.

Key words air temperature; remote sensing; MODIS; land surface temperature; NDVI