

文章编号: 1000-0240(2012)02-0296-08

基于 MODIS LST 产品估算青藏高原地区的 日平均地表温度

欧阳斌, 车涛*, 戴礼云, 王增艳

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 地表温度是衡量地-气界面热状况的重要指标, 在冻土制图、城市热岛效应等研究领域有重要应用。MODIS 数据只提供了每日 4 次过境的瞬时温度值, 而实际应用中往往需要日平均地表温度。对实测 0 cm 温度数据进行分析后, 发现其日变化曲线呈分段函数特性, 白天按正弦曲线变化, 夜间则呈线性下降。据此提出对白天和晚上的数据进行分段拟合的方案, 并与已有的两种拟合方法作对比验证。地面验证工作包括两个方面: 一是模拟的验证, 按卫星过境时间从逐小时的实测 0 cm 数据中挑出 4 个瞬时值, 将上述拟合方法应用于这 4 个瞬时值, 得到拟合的日平均温度, 再同 24 h 的算术平均值比较。结果表明: Sin-Linear 法精度最高, 平均误差在 1 K 以内; 其二是地面对 MODIS 的验证, 将 3 种方法应用于 MODIS 数据, 再与地面平均值比较, 3 种方法中 Sin-Linear 法误差最小, 且具有最好的线性相关, R^2 超过 0.9。

关键词: 地表温度; MODIS; 青藏高原; 日平均

中图分类号: P423.3 **文献标识码:** A

0 引言

地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 是地-气界面热状况的指示器, 其与上覆空气温度之间的差异直接影响地表的感热和潜热通量, 进而影响地表的能水平衡, 因而在气候、农业、生态、水文等领域有广泛的应用^[1-2]。实际当中人们更感兴趣的是日平均地表温度, 例如, 计算冻土的冻结因子和融化因子, 进行冻土分类和制图^[3-4]; 计算农作物生长期的累积度日数 (积温), 预测开花期和成熟期, 监测病虫害^[5]; 在城市地区, 还可用于计算建筑物受冻指数和热岛效应的研究^[6]。青藏高原是世界上高海拔多年冻土分布最广的地区, 近年来, 一些线性工程 (如青藏铁路、青藏公路) 在施工过程中对地表进行热扰动, 已在可观测的水平上引起下伏多年冻土的升温^[7]。因此, 对整个青藏高原的温度进行周期性监测显得十分必要。庞强强等^[8]

利用实测地面温度, 结合数字高程模型, 计算高原冻土区的冻结与融化指数, 得到其活动层的活动层厚度分布图; 肖瑶等^[9]利用观测场实测资料, 计算了藏北高原多年冻土区 2 种不同植被下垫面的能量收支各分量, 并对季节变化特征和主要影响因素进行了分析。

地面气象台站可在单点上连续观测地表温度, 但由于其分布的稀疏和不均匀性, 加上受复杂地形的影响, 各种空间插值算法的结果往往误差很大, 使得我们很难获取空间上连续并且精度可靠的 LST 数据^[10]。遥感观测在很大程度上弥补了这一不足, 尤其是 MODIS 传感器, 它在时间和空间分辨率之间有很好的折衷, 光谱分辨率也较高, 其宏观、动态、快速的观测数据很适合进行从局地到全球的研究^[11]。事实上, MODIS 地表温度产品主要存在两个缺点: 一是它在同一地区每天只有 4 次过境, 并不能获得全天的连续观测数据; 二是在有云

收稿日期: 2011-09-03; 修订日期: 2011-12-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-312); 国家自然科学基金项目 (40971188; 40601065) 资助
作者简介: 欧阳斌 (1986—), 男, 湖南郴州人, 2009 年毕业于西南交通大学, 现为硕士研究生, 主要从事冰冻圈遥感研究。

E-mail: sword.rose@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 车涛, E-mail: chetao@lzb.ac.cn

的情况下, 它观测的是云顶温度而非地表温度. 因此 MODIS 地表温度数据从四个瞬时值到日平均值的拟合工作显得尤为重要.

Neteler^[12] 基于直方图和温度梯度, 用体积样条插值的方法对 MODIS 缺失数据进行重建, 并在此基础上计算年平均地表温度和范围, 平均的地表温度日较差, 最暖月的最大温度以及最冷月的最低温度等气候参数; Colombi 等^[13] 将高程, 纬度和季节考虑为影响地表温度日变化的主要变量, 对瞬时 LST 和日平均 LST 进行相关分析, 用经验的方法估算日平均值, 该方法只用到 Terra 星一天两次的观测数据, 拟合精度还有待提高; Sun 等^[14] 利用静止气象卫星的高时间分辨率, 提取 LST 日变化特征曲线, 并将之应用于 AVHRR(与 MODIS 相似, 一天两次观测)数据的拟合中. 以上各方法或者只对日平均 LST 进行了粗略的估计, 或者只利用了一天两个时刻的数据, 缺乏对地表温度日变化曲线较为细致的刻画.

本文对地面实测的 0 cm 温度数据进行详细考察后, 发现其日变化曲线呈分段函数的特性, 白天以正弦函数的形式变化, 夜间则以线性函数的形式下降, 因此提出一种新的分段函数拟合方法. 地面观测 0 cm 温度和 MODIS 观测 LST 的区别在于: 前者是土壤表层的温度, 由温度探头直接测得; 后者是存在各种地面覆盖类型时的表观温度(如有植被就是植被冠层温度), 由热红外辐射反演得到. 但本文所探讨的规律和方法, 在二者之间具有一定适用性, 因此可将它应用于 LST 数据, 并对其精度进行了验证.

1 数据

1.1 MODIS 地表温度数据

美国 EOS 计划的 Terra 和 Aqua 两颗卫星分别于 1999 年和 2002 年发射升空, 其上搭载的 MO-

DIS 中分辨率成像光谱仪具备 16 个热红外波段的观测能力. 由于地表发射率在 31 和 32 两个波段相对稳定, 利用它们受大气吸收的影响不同, 可经分裂窗算法反演得到地表温度产品^[15]. LST 产品在两种情况下会出现较大误差: 1) 在云层边缘, 用于掩膜的 Mask 产品不能十分精准地划定云与非云的界限; 2) 在干旱/半干旱地区, 直接由地面类型推算而来的地表发射率通常会有一定高估^[16].

本文采用空间分辨率为 1 km 的 L3 级地表温度产品(M* D11A1), 空间范围是整个青藏高原地区(74°~104° E, 25°~40° N). 文件以 HDF-EOS 格式存储, 共 12 个波段, 本研究需要用到的波段包括白天和晚上的温度波段, 数据采集的时间波段, 以及用于质量控制的 QC 波段. 尽管下载的 MODIS 地表温度数据已经用云掩膜产品进行了去云处理, 仍须对其进行质量控制. QC 波段被存为 8 位的字节型, 每两位一段分成 4 个标识, 其中第 3 个标识用于指示温度精度^[17]. 分别用 1 K、2 K、3 K 的精度进行质量控制后, 统计一年当中可用天数的情况, 如图 1 所示.

从图 1 可以看到, 用 2 K 精度控制后的数据量远多于 1 K 精度, 而 3 K 精度的数据量和 2 K 差不多. 综合考虑数据精度和控制后的数据缺失情况, 决定使用 2 K 精度进行质量控制, 从而得到去云的、精度为 2 K 的地表温度数据.

1.2 地面台站数据

地面观测的 0 cm 温度数据由 CAMP-TIBET 科学技术研究项目提供, 时间分辨率为 1 h, 是 1 h 中连续观测(每 5 s 观测 1 次)的平均值. 数据经过人工目视检查, 去除了极端值, 异常值和长时间无变化值. 具有 0 cm 温度观测的站点共 6 个, 其经纬度、高程和下垫面类型见表 1. 所有站点使用 2003 年数据, 由于 ANN1 站 2003 年 9 日之前无数据, 所以使用 2003 年 9 月至 2004 年 8 月数据.

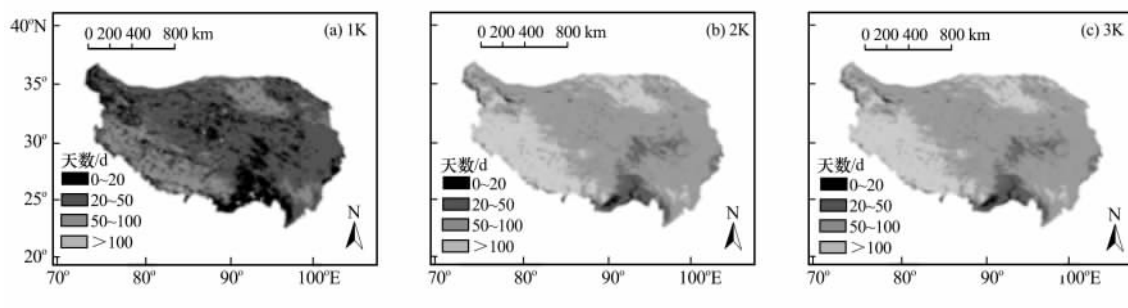


图 1 分别用 1 K(a), 2 K(b)和 3 K(c)精度进行质量控制后一天有 4 次可用数据的天数统计

Fig. 1 Number of days with four valid data per day after quality controlling on 1 K (a), 2 K (b) and 3 K (c)

表 1 6 个地面站点的经纬度、高程及下垫面类型
Table 1 Longitude, latitude, altitude and underlying surface type of the six ground stations

站点	经度/N	纬度/E	海拔/m	下垫面类型
ANNI	31.25°	92.17°	4480.0	平坦裸地
BJ	31.37°	91.90°	4509.2	裸地
D105	33.06°	91.94°	5038.6	裸地
D110	32.69°	91.87°	4984.8	草地
Gaize	32.30°	84.05°	4416.0	平坦裸地
MS3478	31.93°	91.71°	4619.5	草地

2 拟合日平均值的方法

估算日平均地表温度的方法大致可分为两类, 其一是抓住和日平均地表温度显著相关的变量, 如最大值, 最小值等, 利用这些变量对平均值进行估计; 其二是提取地表温度的日变化曲线, 并对其进行建模, 用函数进行刻画. 下面先介绍两种已有的拟合方法, 再详细介绍本文提出的新方法, 其后将对这 3 种方法得到的日平均地表温度进行比较和分析.

2.1 最大最小温度平均法(Max-Min)

在精度要求不高的情况下, 日平均地表温度可用一天当中最高温度和最低温度的平均值来进行估计, 而 Aqua 星一天两次过境分别是当地时间下午 1:30 和夜间 1:30, 接近最高温度和最低温度的时刻. 这样, 日平均地表温度可简单地表示为^[18]:

$$T_{\text{mean}} = (T_1 + T_2)/2 \quad (1)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为 Aqua 一天 2 次过境的地表温度值.

2.2 余弦和正弦分段函数法(Cos-Sin)

Sun 等^[11]利用 GOES(地球静止轨道气象卫星)的高时间分辨率(20 min), 提取地表温度的日变化曲线, 认为在白天按余弦曲线发展, 晚上则呈正弦曲线变化, 并获取日出时刻和峰值温度时刻等信息, 将星下空间分辨率为 9 km 的影像重采样到 AVHRR 的 1 km 分辨率, 从 AVHRR 一天 2 次的地表温度值拟合得到日平均值:

$$\begin{cases} T_1(t) = T_0 + T_a \sin(\pi + 2\pi \cdot \frac{t}{p_n}), & t < t_{\text{sunrise}} \\ T_2(t) = T_0 + T_a \cos(2\pi \cdot \frac{t - t_m}{p_d}), & t > t_{\text{sunrise}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_m 为峰值温度时刻; t_{sunrise} 是日出时刻, 它们

可以从 GOES 影像中获得, 继而求得白天时长 p_d 和夜晚时长 p_n ; T_0 为日平均温度; T_a 为振幅, 它们是待求量, 用 AVHRR 两个时刻的温度代入即可求得这两个未知量. 该方法同样适用于 Terra 星两个时刻的温度值.

2.3 正弦和线性分段函数法(Sin-Linear)

本方法基于这样一条假设: 尽管地面站点观测和遥感卫星观测存在尺度上的差异, 但地面数据呈现出来的一些总体规律和基本特征, 对 MODIS 数据的拟合具有指导意义. 为了消除随机误差的影响, 获取数据的整体规律, 对表 1 所示 6 个地面站点相同时刻的 0 cm 温度进行季节平均. 将各站点 4 个季节 24 个时刻的地表温度绘成时间序列图, 如图 2 所示.

从图中可以看到, 尽管不同站点不同季节的 0 cm 温度存在数值上的差异, 但总体上呈现分段函数的特性, 在白天按正弦曲线变化, 晚上则呈线性下降, 因此将日变化曲线表述为:

$$\begin{cases} T(t) = A \cdot \sin[\omega(t - t_0)] + B, & t \in (t_1, t_2) \\ T(t) = at + b, & t \in (t_2, t'_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_1 和 t_2 是正弦函数和线性函数的临界时刻, 与日出和日落时间有关, 即 $t_1 = t_{\text{rise}} + \text{shift}$, $t_2 = 24 - t_1$, shift 因子是临界时刻与日出时刻之间的偏移量, 可由实测数据的统计结果确定.

正弦函数有 4 个参数: A 为振幅; ω 为角频率, 与周期有关; t_0 和 B 分别是水平方向(时间)和垂直方向(温度)的偏移量. 线性函数的两个参数 a 和 b 分别是斜率和截距. 设一天当中最高温度出现的时间为 T_{max} , 则 t_1 到 T_{max} 为半个周期, 角频率 $\omega = \pi / (T_{\text{max}} - t_1)$, x 方向的偏移量 $t_0 = (t_1 + T_{\text{max}}) / 2$. 若已知日出时刻 t_{rise} , 峰值时刻 T_{max} 以及 shift 因子, 则白天的正弦函数和晚上的线性函数都只剩下两个未知参数, 用 MODIS 的 4 个瞬时值分别代入, 即可将曲线固定下来. 这样, 日平均地表温度可由以下积分求得:

$$T_{\text{mean}} = \left[\int_{t_1}^{t_2} (A \cdot \sin(\omega(t - t_0)) + B) dt + \int_{t_2}^{t'_1} (at + b) dt \right] / 24 \quad (4)$$

因此, 日出时刻、峰值时刻以及 shift 因子的确定十分关键, 下面分别对它们进行求解或估算. 影响日出地方时的两个最主要因素是纬度和日期, 已

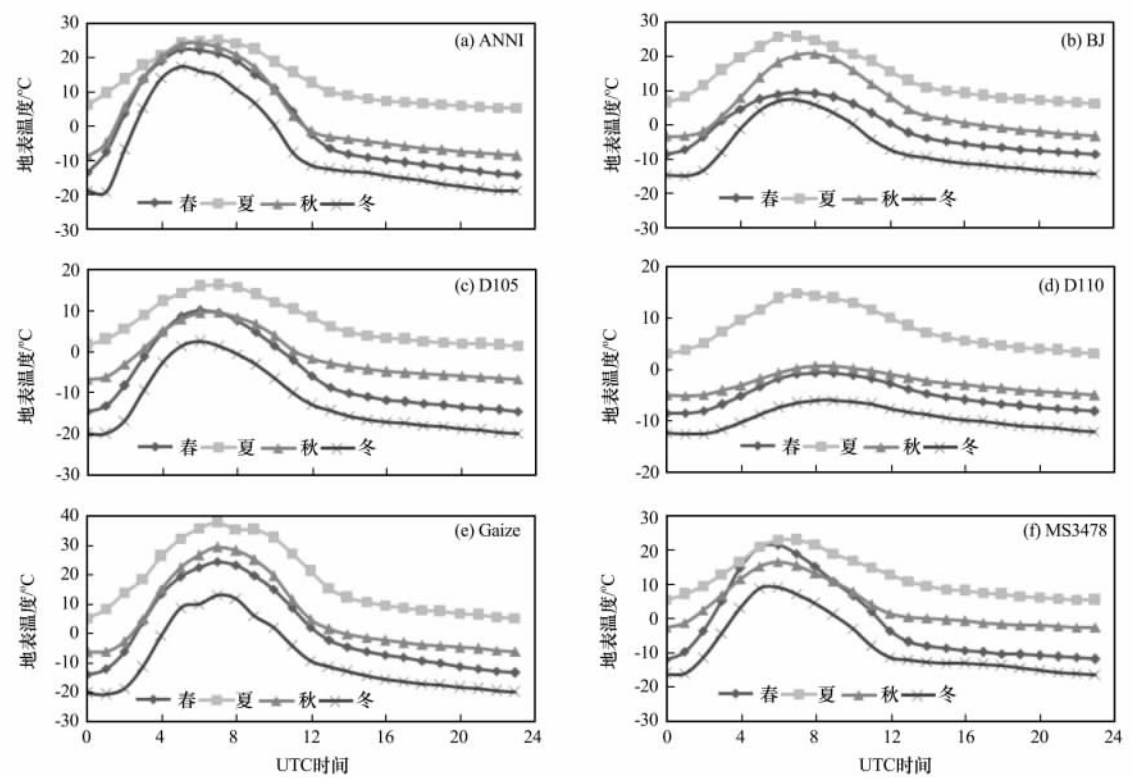


图 2 各站点不同季节的 0 cm 温度日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations of 0 cm temperature at different sites and in different seasons

知影像的投影信息，可由行列号算得地理纬度 φ ，由日期可求得太阳直射地球的赤纬 δ ，则日出时间 $t_{\text{rise}} = \arccos(\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta)$ 。对 6 个站点 2003 年每一天的峰值时刻进行统计，结果见图 3。

从图 3 可以看出，天数相对峰值时刻呈正态分布，期望为 13:00，由于 MODIS 影像任意像元任一天的峰值时刻无法获得，因此统一采用其数学期望。

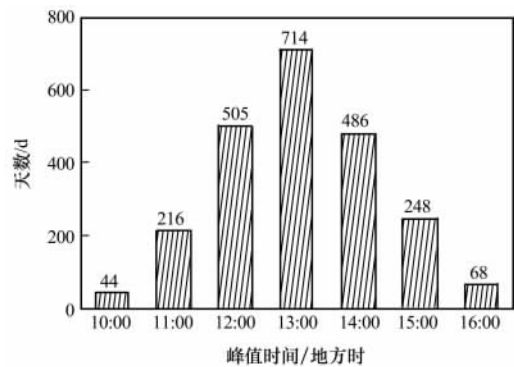


图 3 峰值时刻-天数柱状图

Fig. 3 Histogram of tmax versus number of days

对于 shift 因子的确定，可利用实测数据通过迭代进行估计。先假设 $\text{shift} = 0$ ，即认为日出时刻就

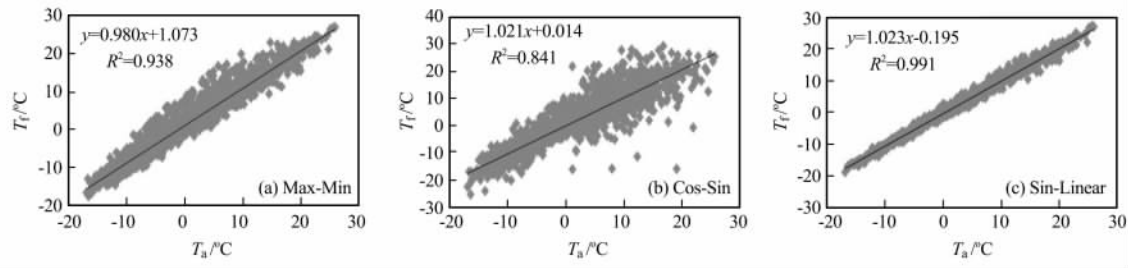
是分段函数的临界点，然后从地面逐小时的温度数据中挑出四个 MODIS 过境时刻的数据，按 $\text{shift} = 0$ 进行拟合得到 F_{mean} ；另一方面，对 24 个时刻的温度进行算术平均可得到 A_{mean} ，计算二者之间的均方根误差 RMSE。然后将 shift 从 -2 到 2 进行调节，步长为 0.05 h，当 RMSE 达到最小时，可以得到一个最优的 $\text{shift} = 1.35$ 。

3 结果讨论与分析

3.1 方法的检验

为了测试 3 种方法的拟合能力，进行以下模拟实验：1) 从地面逐小时的温度测量值中选出能满足要求的瞬时数据，如 Max-Min 法可选择 Aqua 卫星两个过境时刻(13:30 和 1:30)的数据，另外两种方法亦然，将 3 种方法分别应用于所选出的瞬时数

表 2 6 个地面站点的年平均绝对误差							
Table 2 Annual mean absolute errors of the six ground sites							
方法	ANNI	BJ	D105	D110	Gaize	MS3478	平均
Max-Min/K	4.54	1.28	1.89	0.65	1.94	3.10	2.23
Cos-Sin/K	3.32	2.89	2.54	1.76	3.29	3.74	2.92
Sin-Linear/K	0.68	0.75	0.68	0.41	0.91	0.86	0.72

图 4 三种拟合方法所得 T_i 与 T_a 的散点图Fig. 4 Scatter diagrams of T_i versus T_a resulted from the three methods

据, 得到拟合的日平均温度 T_i ; 2) 对 24 个时刻的温度观测值作简单的算术平均得 T_a ; 3) 计算二者之间的年平均绝对误差 (表 2), 以误差大小作为评价拟合能力的指标。

从表 2 可以看到, Max-Min 法与 Cos-Sin 法得到的日平均温度误差大都在 2 K 以上, 而 Sin-Linear 法则全部在 1 K 以内。从所有站点总的平均误差来看, Sin-Linear 法的拟合误差最小, Max-Min 次之, Cos-Sin 最差。将 3 种拟合方法得到的日平均值 (T_i) 和算术平均值 (T_a , 共 6 个站点 \times 365 d) 绘成散点图 4。

由图 4 可看出, 3 种方法得到的趋势线均接近 1:1 的直线, 其中 Max-Min 法 (图 4a) 中的点多分布于趋势线左上方, 即拟合值较算术平均值有偏高的趋势, 这可能由于晚上 1:30 并未达到最低温度, 而造成结果偏高; Cos-Sin 法 (图 4b) 在温度较低时

拟合误差较小, 而在温度升高时逐渐增大, 且出现较大粗差, 体现了方法的不健壮性; 而 Sin-Linear 法 (图 4c) 中的点都集中在趋势线附近, 拟合效果最好。从离散程度 (线性相关系数 R^2) 来看, Sin-Linear 最小, Max-Min 次之, Cos-Sin 离散程度最大。

3.2 MODIS 数据的拟合结果与验证

在用 3 种方法对 MODIS LST 数据进行拟合之前, 有必要对其瞬时观测的精度进行一个全面的评价。因此我们先用地面数据对 4 个卫星过境时刻的地表温度进行了验证。不同站点的误差情况如表 3 所示, 散点图如图 5 所示。

表 3 显示 MODIS LST 较地面观测的 LST 有偏低趋势, 除 D110 外, 其他各站点平均低 2~4 K。图 4 中白天两个时刻的散点图相似, 在低温时 MODIS LST 较地面观测 0 cm 温度偏高, 高温时偏低。晚上两个时刻亦相似, 低温高温时都偏低, 绝

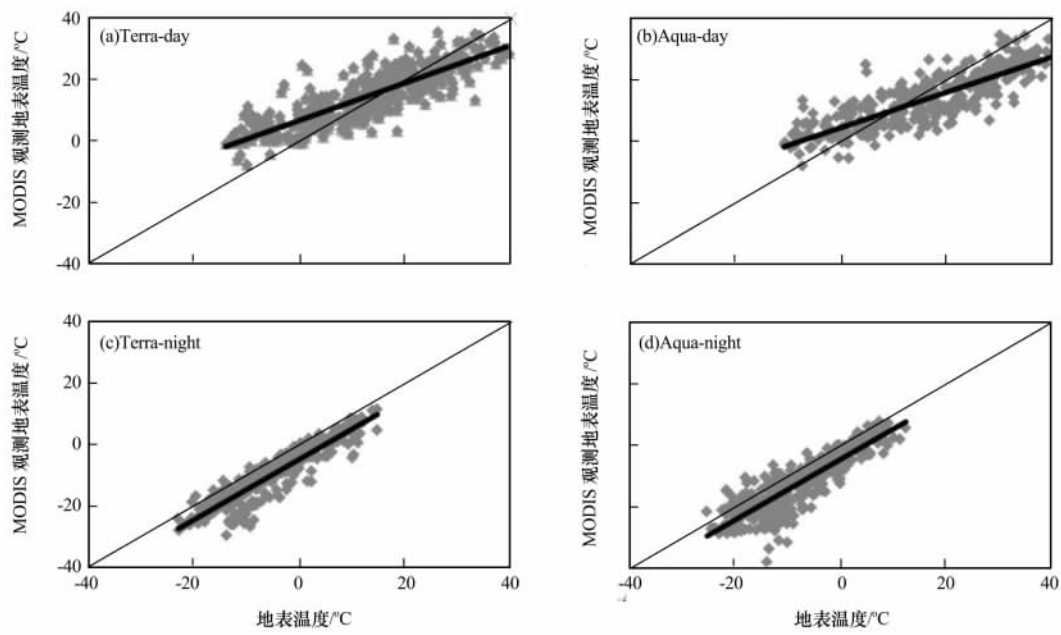


图 5 MODIS 观测 LST 与地面观测 0 cm 温度的散点图

Fig. 5 Scatter diagrams between MODIS LST and ground-observed LST

表 3 各地面站点 4 个过境时刻的瞬时观测误差
Table 3 Errors of instantaneous observations
on the four passing times of satellites

温度/K	ANNI	BJ	D105	D110	Gaize	MS3478	平均
Aqua-day	-5.5	-1.79	-0.81	7.04	-9.35	-3.02	-2.24
Terra-day	-5.96	6.46	2.14	10.68	-2.41	-3.40	1.25
Terra-night	-0.19	-6.71	-4.36	-8.84	-3.27	-4.04	-4.57
Aqua-night	-1.5	-6.85	-4.22	-8.85	-2.16	-4.29	-4.65
平均	-3.28	-2.22	-2.81	0.01	-4.3	-3.69	-2.55

大部分点落在 1 : 1 直线的右下方. 总体来说晚上的数据质量比白天好. 结合图表来看, 地面观测和 MODIS 观测之间存在明显的系统误差(由尺度效应以及测量手段不同而造成). Sebastian 等^[19]在研究挪威北部地区(亚极地)的 LST 时空变化时曾指出, 由于云检测算法的不完善, 在很多情况下不能将有云像元去除掉, 而此时 MODIS 传感器观测的云顶温度明显低于地表温度, 导致它与地面观测之间存在负的偏差; Langer 等^[20]用 MODIS 数据对西伯利亚冻土进行研究时同样发现这样的现象. 这与本文所得到的结果是相符的.

正如第 2 节所述, Max-Min 法用的是 Aqua 两个时刻的温度, 而这两个时刻 MODIS 观测比地面观测平均偏低 3.45 K; Cos-Sin 法用的是 Terra 两个时刻的温度, 平均偏低 1.66 K; 而 Sin-Linear 法用的是所有 4 个时刻的温度, 平均偏低 2.55 K. 因此, 我们在用 3 种方法拟合得到日平均 LST 后, 对该系统误差分别进行了校正. 最后在得到的日平均值影像上, 找出 6 个地面站点所对应的像元并提取像元值, 与地面 24 h 的算术平均值进行比对, 并计算其年平均绝对误差, 如表 4 所示. 其中, Max-Min 法的误差在 3~5 K 之间, Cos-Sin 法在 2~4 K 之间, 而 Sin-Linear 法除 D110 外, 均在 1~2 K 之间. 将地面观测的平均值与 MODIS 拟合的平均值

表 4 地面站点日均值与 MODIS 拟合日均值的差异
Table 4 Diversities between ground observed
daily mean value and MODIS simulated data

	ANNI	BJ	D105	D110	Gaize	MS3478	平均
Max-Min/K	4.26	3.78	4.69	4.04	4.81	4.32	4.32
Cos-Sin/K	2.54	2.81	3.35	3.20	3.19	3.17	3.04
Sin-Linear/K	1.10	1.43	1.64	2.96	1.27	1.80	1.70

绘成散点图如图 6.

Max-Min 法的趋势线与 1 : 1 的直线偏离最大, 离散程度中等; Cos-Sin 的趋势线更接近 1 : 1 的直线, 但离散程度最大, 且误差较大的点多出现在高温部分, 这与上小节的验证结果很相似; Sin-Linear 法的各项指标都是最优的, 数据点都靠拢于 1 : 1 的直线, R^2 达 0.94. 分析其中的原因, Max-Min 法具有普适性, 不管在何时何地, 最大最小温度值的时刻都统一采用 Aqua 卫星的过境时刻, 而 Cos-Sin 法具有明显的地域性, 原方法用于北美平原, 将其搬到青藏高原, 受地形地貌甚至气候差异的影响, 其适用性大大降低了; 而 Sin-Linear 法的拟合效果最好, 主要得益于 shift 因子的调节, 它可以把一些其他因素的影响减到最小. 值得注意的是, Sin-Linear 法同样存在地域性, 当用于其他地区(如低海拔的平原)时, 最优的 shift 因子会发生相应的改变, 须重新确定.

4 结论

地表温度是研究地球表面能量平衡时不容忽视的变量, 而日平均 LST 在众多领域都有应用. 遥感观测技术具有宏观、动态、快速等优点, 它在为我们提供空间上连续的 LST 产品的同时, 也存在时间上不连续的缺点, 而简单的算术平均在很多情况下不能满足精度要求. 本文正是针对这一不足, 提出了 Sin-Linear 方法, 将 MODIS 瞬时观测的地表

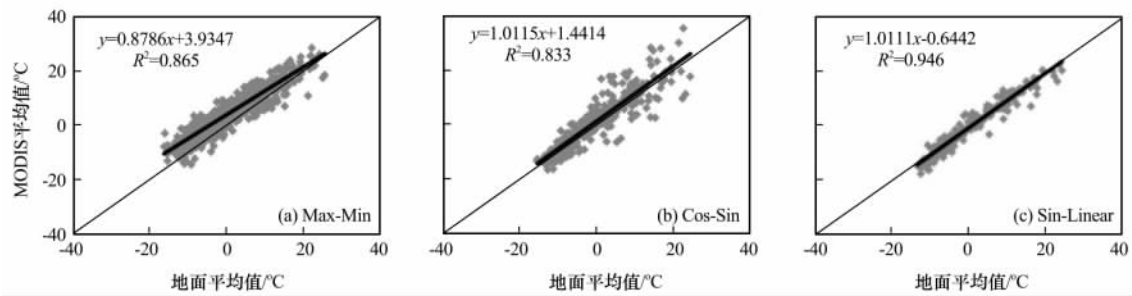


图 6 地面观测日均值与 MODIS 拟合日均值的散点图

Fig. 6 Scatter diagrams between ground observed daily mean value and MODIS simulated data

温度值拟合到日平均地表温度。

通过对地面观测数据的分析我们发现：某时某地的 0 cm 温度日变化曲线可用一个正弦和线性的分段函数来表示。要确定该分段函数的形式，有 3 个重要参数需要确定：日出时刻、峰值时刻和一个 shift 因子。其中，日出时刻因时因地而异，而另外两个参数统一采用相同的值，即峰值时刻为 13:00，shift 因子为 1.35 h。在计算日出时刻时，除了纬度和日期，还有其他因素（如高程）未考虑，这会给日平均值的拟合带来一定误差；另外峰值时刻统一采用其数学期望，也会引入一些偏差。但是经 shift 因子的调节可起到很好的校正作用，上述误差都可以得到一定程度的减小。因此，这是一种经验但不失有效的方法。

选取了两种已有的拟合方法与 Sin-Linear 法进行比较，结果表明，不管是模拟的验证还是地面对 MODIS 的验证，Sin-Linear 法均表现出最小的误差和最好的线性相关。除个别站点外，其拟合误差均在 1~2 K，因为经过质量控制后的 LST 数据精度为 2 K，因此 2 K 以内的拟合误差是可以接受的。由于用来验证的站点数量有限（只有 6 个），因此验证结果可能还不足以说明方法的优劣性，并且该方法在其他地区的适用性还有待进一步的考证。

参考文献 (References):

- [1] Crosson W L, Smith E A, Copper H J. Estimation of surface heat and moisture fluxes over a prairie grassland, 4, Impact of Satellite remote sensing of slow canopy variables on performance of a hybrid biosphere model[J]. *Geophys Res*, 1993, **98**: 4979—4999.
- [2] Garratt J R. Observed screen (air) and GCM surface/screen temperatures: Implications for outgoing longwave fluxes at the surface [J]. *Clim*, 1995, **8**: 1360—1368.
- [3] Wang Zhixia, Nan Zhuotong, Zhao Lin. The applicability of MODIS land surface temperature products to simulating the permafrost distribution over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 132—143. [王之夏, 南卓铜, 赵林. MODIS 地表温度产品在青藏高原冻土模拟中的适用性评价[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 132—143.]
- [4] Henry K A, Smith M W. A model-based map of ground temperature for the permafrost regions of Canada[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**: 389—398.
- [5] Hassan Q K, Bourque C P, Meng Fanrui, *et al.* Spatial mapping of growing degree days: an application of MODIS-based surface temperatures and Enhanced Vegetation Index[J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2007, **1**, 013511; doi: 10.1117/1.2740040
- [6] Trana H, Uchiamab D, Ochib S, *et al.* Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *Int*[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, **8**(1): 34—48.
- [7] Lin Zhanju, Niu Fujun, Xu Jian, *et al.* The effect of embankment construction on permafrost in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 1127—1136. [林战举, 牛富俊, 许健, 等. 路基施工对青藏高原多年冻土的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(6): 1127—1136.]
- [8] Pang Qiangqiang, Li Shuxun, Wu Tonghua, *et al.* Simulated Distribution of Active Layer Depths in the Frozen Ground Regions of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(3): 390—395. [庞强强, 李述训, 吴通华, 等. 青藏高原冻土区活动层厚度分布模拟[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(3): 390—395.]
- [9] Xiao Yao, Zhao Lin, Li Ren, *et al.* Seasonal Variation Characteristics of Surface Energy Budget Components in Permafrost Regions of Northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(5): 1033—1039. [肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原腹地高原多年冻土区能量收支各分量的季节变化特征[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(5): 1033—1039.]
- [10] Li Xin, Cheng Guodong, Lu Ling. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(6): 565—573. [李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. *高原气象*, 2003, **22**(6): 565—573.]
- [11] Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, *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—1249.
- [12] Neteler M. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data [J]. *Remote sens*, 2010, **2**: 333—351.
- [13] Colombi A, Michele C D, Pepe M, *et al.* Estimation of daily mean air temperature from MODIS LST in alpine areas[J]. *EARSeLe Proceedings*, 2007, **6**: 38—46.
- [14] Sun D, Pinker R T. Estimation of land surface temperature diurnal cycle from geostationary operational environmental satellite and application to the polar orbiting imager NOAA/AVHRR[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 4895: 137—147.
- [15] 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.
- [16] Wan Zhengming, Zhang Yulin, Zhang Qincheng, *et al.* Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 163—180.
- [17] Wan Zhengming. Collection—5 MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide[R]. ICES, University of California, Santa Barbara, 2009: 1—30.
- [18] Geerts B. Empirical estimation of the monthly-mean daily temperature range [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, **74**: 145—165.
- [19] Wenstermann S, Langer M, Boike J. Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of high-Arctic tundra on Svalbard—implications for MODIS LST based permafrost monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**: 908—922.

[20] Langer M, Westermann S, Boike J. Spatial and temporal variation of summer surface temperatures of wet polygonal tundra in Siberia—implications for MODIS LST based permafrost

monitoring [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114 (9):2059—2069.

Estimating Mean Daily Surface Temperature over the Tibetan Plateau Based on MODIS LST Products

OUYANG Bin, CHE Tao, DAI Li-yun, WANG Zeng-yan

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Land surface temperature (LST) is one of the key factors that indicate the thermal state of the land-atmosphere boundary. It has frequently been applied in many fields such as permafrost mapping and analyzing urban heat island effect. The MODIS LST products merely provide four instantaneous observations every day, whereas, the daily mean LST is often required in practice. In this study, a piecewise function is used to figure out the diurnal circle of ground temperature at the surface. In daytime, the surface temperature takes on the form of a sinusoidal function, while in nighttime it declines almost linearly. Furthermore, two existing methods are reviewed and one new approach (Sin-Linear) is proposed to transfer the instantaneous MODIS LST data to daily mean LST.

In order to validate the new approach, four instantaneous temperature data are selected from the hourly observed 0 cm temperature according to the overpass time of the satellites. Then the three methods are applied to estimate the daily mean LST, which are compared with the arithmetic averaged data of the hourly temperature records. It is found that the Sin-Linear method proposed here has the highest precision, with annual mean error within 1 K. On the other hand, the three methods are applied to the MODIS LST data, and the results are compared with the ground daily averaged data (0 cm). The Sin-Linear method indicates the best consistency with the ground observation, with R^2 greater than 0.9.

Key words: surface temperature; MODIS; Tibetan Plateau; daily mean