

薛彦广, 高志球, 沙文钰. 2010. 利用简单生物圈模式 SiB2 模拟青藏高原地表能量收支 [J]. 大气科学, 34 (1): 131–142. Xue Yanguang, Gao Zhiqiu, Sha Wenyu. 2010. Modeling of surface energy budget in Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 131–142.

利用简单生物圈模式 SiB2 模拟青藏高原地表能量收支

薛彦广^{1, 2} 高志球² 沙文钰¹

¹ 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用简单生物圈模式 SiB2 模拟了西藏短草大草原安多观测站 1998 年 7 月 15 日至 9 月 10 日期间的地表能量分配、地表有效辐射温度和土壤湿度。季风期, 平均冠层高度和叶面积指数大约分别为 0.05 m 和 0.5。实验地点基本代表了夏季藏北高原大面积特征。所用资料为全球能量与水循环实验 GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) 亚洲季风实验 GAME (Asian Monsoon Experiment) 的西藏观测期间安多观测站微气象实地测量。采用这些资料确定 SiB2 所需要的参数和初始值后, 由该资料中半小时一次的太阳短波辐射、大气长波辐射、水汽压、气温、水平风速和降水驱动 SiB2, 最后将模拟结果与实际测量的湍流通量、地表温度和土壤湿度进行了对比, 进一步检验 SiB2 对季风期间青藏高原稀疏草原地表能量分配的模拟能力。对比结果表明: (1) 当模式低估净辐射 0.2% 时, 模式分别高估感热、潜热和土壤热通量 4%、13% 和 8%; (2) 模式得出的地表温度偏高 5%; (3) 土壤湿度估计合理。总的来说, SiB2 对辐射分量模拟结果的偏差相对较小, 相关程度普遍比感热通量、潜热通量和土壤热通量的模拟结果高。

关键词 SiB2 青藏高原 能量分配

文章编号 1006-9895 (2010) 01-0131-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

Modeling of Surface Energy Budget in the Tibetan Plateau Using Simple Biosphere Model SiB2

XUE Yanguang^{1, 2}, GAO Zhiqiu², and SHA Wenyu¹

¹ Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

Abstract By using Simple Biosphere Model 2 (SiB2), surface energy balance budget, surface effective radiative temperature, and soil moisture were modeled for the GAME/Tibet Amdo site in a Tibetan short grass prairie (Am-do station) from 15 July through 10 September 1998. During the monsoon period the mean canopy height and the leaf area index were 0.05 m and 0.5, respectively. The study site represented the prevailing conditions of the northern Tibetan Plateau. The model was initialized and driven by using in situ measurements. The forcing data consist of the short-wave solar radiation, atmospheric long-wave radiation, vapor pressure, air temperature, horizontal wind speed, and precipitation. The model outputs of radiation components, turbulent heat fluxes, surface effective radia-

tive temperature, and soil moisture were compared against direct measurements. Results show that: (1) SiB2 overestimated sensible, latent, and soil heat fluxes by 4%, 13%, and 8% respectively when it underestimated net radiation by 0.2%; (2) surface effective radiative temperature was underestimated by 5%; and (3) soil moisture was estimated reasonably. In general, radiation components simulated by SiB2 were more closer to measurements than heat fluxes with high degree of correlation.

Key words SiB2, the Tibetan Plateau, energy balance budget

1 引言

青藏高原地形高大、地表复杂、地理位置独特,该地区的陆-气相互作用(包括:水分交换、能量收支和 CO_2 的输送)对我国气候有重要影响,因此,青藏高原与大气之间能量、动量和 CO_2 的交换已经成为气候研究的热点之一(李家伦等, 1999, 2000; 周明煜等, 2000; 马耀明等, 2000; 吕建华和季劲钧, 2002a, 2002b; 张宇和吕世华, 2002; Ma et al., 2003; Duan and Wu, 2005; Hong and Kim, 2008; Ma et al., 2008)。由于青藏高原陆-气相互作用在亚洲夏季季风的爆发、维持和消亡中具有重要作用(Krishnamurti and Ramanathan, 1982; Chen et al., 1985; Qian et al., 2003), 1998 年, 全球能量和水循环实验 GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) 亚洲季风实验 GAME (Asian Monsoon Experiment) 在青藏高原实施, 即 GAME/Tibet。该实验获取的观测资料为进一步研究青藏高原能量分配和模式检验提供了基础。我国科学家同步进行了 TIPXE 试验, 取得了一系列成果(周明煜等, 2000; Bian et al., 2002, 2003)。

精确描述陆-气交换物理过程有利于改善大气环流模式 GCM (General Circulation Models) 的湍流通量参数化方案, 从而提高预报效果。1986 年, Sellers et al. (1986) 研发了简单生物圈模式 SiB (Simple Biosphere Model)。SiB 综合考虑了辐射平衡、湍流能量输送, 以及土壤温度、湿度之间的关系。1996 年, 在 SiB 基础上, Sellers et al. (1996a, 1996b) 研发了 SiB2 (Simple Biosphere Model 2), 并将其引入 GCM。与 SiB 相比, SiB2 有以下几点改进: (1) 将植被的两层处理方案改为单层处理方案; (2) 引入了光合-水传导子模式, 进一步描述了 CO_2 和水汽在植被内部与外部大气之间的传输过程; (3) 提出了通过卫星资料反演计算模式所需的三个重要参数: 光合作用有效辐射比 (FPAR)、总

叶面指数 (L_T) 和绿色冠层比 (N); (4) 模式根据全球植物生理形态将 SiB 中的 12 种植被类型简化为 9 种; (5) 模式充分考虑下垫面植被在大气-土壤之间物质、能量循环中的作用, 将反照率、蒸腾和粗糙度等相关学科概念有机结合起来, 强调对土壤-植被-大气相互作用复杂过程的描述。

Gao et al. (2004) 使用 SiB2 模拟了 GAME/Tibet 实验那曲 Bujiao (BJ) 站的地表能量分量、地表有效辐射温度和土壤湿度, 并将模拟结果与实测数据进行了比较。Hong and Kim (2008) 使用 GEWEX 的 GAME/Tibet 数据检验了两个具有代表性的陆面模式: SiB2 和 Noah。结果表明, 辐射耦合在研究青藏高原的地表能量平衡中起到关键作用; 对陆面模式中的地表反射率和发射率的精确描述, 有利于提高模式对青藏高原辐射平衡和水循环模拟能力。

观测中的能量不平衡是近年来野外观测试验所遇到的一个比较突出的问题(马耀明等, 2000; Gao et al., 2003a)。由于青藏高原地区地形地貌的复杂性和近地层气象观测仪器的限制, 各站点的能量分配特征存在差异。目前, 尚未有对安多站点能量分配的研究, 因此, 本文利用简单生物圈模式 SiB2 模拟 1998 年 GAME/Tibet 加强观测期间安多观测站的能量分配, 通过将 SiB2 模式的模拟结果与观测资料比较, 进一步检验 SiB2 对季风期间青藏高原稀疏草原地表能量分配的模拟能力。

2 资料来源和方法

本文所用资料是 1998 年 GAME/Tibet 加强观测期间安多站的实测数据。选取时间范围为 1998 年 7 月 15 日至 9 月 10 日。安多观测站位于 (32.15°N , 91.38°E), 海拔 4700 m, 高出 BJ 观测点 (4500 m) (Gao et al., 2004) 约 200 m。四周开阔平坦, 地表为高度约 0.05 m 的高原草甸, 其地形和下垫面的特性基本代表了夏季藏北高原大面积特征。

涡度相关方法计算湍流通量的公式为:

$$H = \rho c_p \overline{w'\theta'} = -\rho c_p u_* \theta_*, \quad (1)$$

$$L_e = L \rho \overline{w'q'} = -L \rho u_* q_*, \quad (2)$$

其中, H 是感热通量, L_e 是潜热通量, ρ 为空气密度, c_p 为空气定压比热容, L 为水汽相变潜热, w' 、 θ' 和 q' 是垂直风速、水平风速、温度和湿度的脉动量, “-” 表示在一定时间间隔内求平均, 安多观测站资料为 30 min 平均, u_* 、 θ_* 和 q_* 分别为摩擦速度、位温尺度和特征比湿。

地表土壤热量通量 (G_0) 按如下计算:

$$G_0 = G_1 + C_g \Delta z \partial T_s / \partial t, \quad (3)$$

其中, G_1 为地表 0.05 m 深度处测得的土壤热量通量; $C_g (1.47 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$ 是土壤的体积热容量; T_s 是由厚度为 0.05 m 的浅土层平均温度; Δz 为土壤厚度, 取为 0.05 m。

净辐射 R_n 为:

$$R_n = R_{ds} + R_{dl} - R_{os} - R_{ol}, \quad (4)$$

其中, R_{ds} 和 R_{dl} 分别是向下短波辐射和长波辐射, R_{os} 和 R_{ol} 分别是向上短波辐射和长波辐射。

为确定通量测量对应的区域, 本文对印痕 (Footprint) 作了分析 (见图 1)。测站上风方向不同距离的地表对测量的湍流通量影响不同, 可用累积归一化贡献函数 $C_F(\chi_L)$ 表示如下:

$$C_F(\chi_L) = e^{-U(z-d)/(k u_* \chi_L)}, \quad (5)$$

其中, χ_L 是观测点上风方向上的距离; z 是仪器高度, 为 2.5 m, $k (\approx 0.40)$ 是卡曼常数, u_* 是摩擦

速度, d 是零平面位移高度, 根据安多观测场地实际情况, 本文取 $d = 0$, U 是粗糙度高度到测量高度的平均水平风速, 可由下式确定:

$$U = \frac{\int_{d+z_0}^z u(z) dz}{\int_{d+z_0}^z dz} = \frac{u_* \{ [\ln(z-d)/z_0] - 1 + z_0/(z-d) \}}{k [1 - z_0/(z-d)]}, \quad (6)$$

其中, $u(z)$ 为高度 z 的水平风速, z_0 是空气动力学粗糙度。我们根据 Martano (2000) 的方法, 估算得到 $z_0 = 0.001 \text{ m}$ 。

由图 1 可见, 该高度上测量的 90% 通量来自上风方向 1500 m 的范围内, 印痕 (Footprint) 通量对上风方向距离观测仪器约 60 m 处的地表最为敏感。

3 实验设计

3.1 参数设置

SiB2 对参数设置非常敏感, 1998 年, Colello et al. (1998) 检验了 SiB2 对高草类大草原整个生长期内的温度变化、能量分配和 CO_2 通量变化的模拟能力。如果采用 SiB2 隐含参数值, SiB2 分别高估感热通量和潜热通量约 5% 和 12%; 当根据实际情况调整 SiB2 参数, 则 SiB2 准确地模拟出了地表能量收支的日变化。安多站的参数由实测和经验估计得到。根据 SiB2 植被类型的划分 (Sellers et al., 1996b), 安多站的植被类型属于类型 6, 即短草草原; 土壤类型属于类型 4, 即砂粘土。

根据测量数据, 短草的顶部和底部平均高度分别为 0.05 m 和 0.005 m。总土层的深度为 1.5 m, 三个土壤层次定义为地表层、根区和补给区。温度也根据实测数据进行了调整, 调整后的参数设置见表 1。

3.2 强迫数据

SiB2 需要输入 6 个气象强迫要素: 向下太阳短波辐射、向下大气长波辐射、水汽压、气温、风速和降水。我们选取的时段 (即 7 月 15 日 ~ 9 月 10 日) 包含了 1998 年的季风和后季风时期。观测资料详见 GAME/Tibet 网站 (<http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/tibet/data/iop/pbltower/graph/amd.html>), 这里不再给出安多测站 6 个气象强迫变量的时间序列, 只对输入 SiB2 的这 6 个气象强迫量做简要说明。

这一时期向下短波辐射的最大值 (平均值) 为

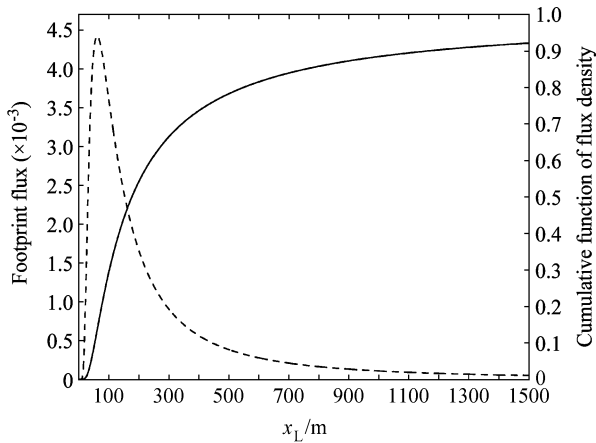


图 1 中性层结条件下, 印痕通量 (虚线) 和累计通量贡献 (实线) 图

Fig. 1 Footprint flux (solid) and contribution of the cumulative flux (solid) according to Equation (5) for neutral stability during the experiment period

表 1 调整后的 SiB2 参数设置

Table 1 Modified parameters used in SiB2

参数名	参数说明	数值
Z_2	冠层顶高度	0.05 m
Z_1	冠层底高度	0.005 m
V	冠层覆盖比	0.1
D_r	根深	0.3 m
s_6	半阻碍温度参数	288 K
L_T	冠层总叶面指数	0.5 m
N	绿色冠层比	0.43
z_0	冠层粗糙度长度	0.001 m
D	冠层零平面位移	0.035 m
C_1	总体边界层阻抗系数	42 s/m
C_2	土壤和植被层之间的阻抗系数	80

表 2 SiB2 初始化参数设置

Table 2 Initial condition used in SiB2

初始化参数	初始化值
冠层温度	282 K
地表温度	282 K
土壤深层温度	284 K
冠层体腔温度	282 K
观测高度气温	282 K
表层土壤湿度	0.35
根区土壤湿度	0.35
交换区土壤湿度	0.35

1221.6 W/m² (246.34 W/m²), 向下长波辐射的最大值(平均值)为 354.2 W/m² (296.76 W/m²)。参考高度(2.85 m)的水汽压、气温和风速的平均值分别为 7.32 hPa、280.45 K 和 2.82 m/s。

季风期内,降水比较充沛,且降水量较大。反映在水汽压上,降水时段水汽压很大,平均值比晴天要大 10% 左右。向下短波辐射日变化显著,最大值为 1221.6 W/m²,平均值为 246.3 W/m²;向下长波辐射日变化较小,平均值约 354.2 W/m²,总体上存在雨天大于晴天的特点,尤其在极小值时段表现很明显。由于夜间地表较强的辐射冷却作用,晴天近地层气温最低值(270.9 K)明显小于阴天(272.3 K)。季风期以后,随着降水的停止,从 9 月 5 日开始,向下长波辐射、水汽压和气温显著减小,平均分别比雨季小 23%、39%、40%。

3.3 初始化

SiB2 中有 8 个量需要设置初值,分别是:冠层

温度、地面温度、土壤深层温度、冠层体腔温度、观测高度气温、表层土壤湿度、根区土壤湿度和深层土壤湿度。这些初始值需要根据观测值设定,具体设置见表 2。

4 结果与讨论

当辐射与能量平衡分量小于 -100 W/m² 时,仪器的误差与地表能量分量的大小相当,妨碍了地表能量平衡的研究(Gao et al., 2004)。因此,本节主要分析观测的感热和潜热通量大于 -100 W/m²,同时忽略了降水期间的比较资料。

4.1 辐射平衡分量

图 2~4 分别描绘测量和模拟的净辐射、向上长波辐射和向上短波辐射的时间序列。为使图清晰起见,我们将模拟时间(1998 年 7 月 15 日~9 月 10 日共 57 天)分成三个时段,每个时段 19 天。图 2~4 显示出模拟结果很好地体现了辐射分量的日变化。图 5 给出了测量和模拟的净辐射、向上长波辐射和向上短波辐射散点分布,可看出模拟结果与观测值的分布非常集中。平均而言,净辐射被低估 0.2% (如图 5a 所示),相关系数为 1.0。图 3 和图 5b 显示向上长波辐射被高估 13%,相关系数为 0.96。图 4 和图 5c 说明向上短波辐射被低估 4%,相关系数达到 0.99。

(1) 净辐射 由(4)式可知,净辐射由四个辐射分量计算得到,即向下的短波和长波分量以及向上的短波和长波分量。SiB2 模拟了两个向上的分量,并由这两个分量和两个向下的测量分量计算得到净辐射。

当收入辐射大于支出的辐射时,净辐射为正;反之,净辐射为负。夜间地面不断向近地层大气发射长波辐射,所以夜间净辐射为负值。地表净辐射的日变化非常明显,白天为正值,晚上为负值,即白天地表净得到能量,而晚上则是净损失能量。

(2) 地面向上长波辐射 地面向上长波辐射 R_{ol} 可以表示为

$$R_{ol} = \epsilon \sigma T_0^4, \quad (7)$$

其中, ϵ 为地表比辐射率, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, T_0 为地表温度。由(7)式可知,地面向上长波辐射与地表温度的变化相一致。在地表性质大致相似的情形下,地表温度的大小决定了地面向上长波辐射的强弱。因此,尽管高原地区夏季白天的地表

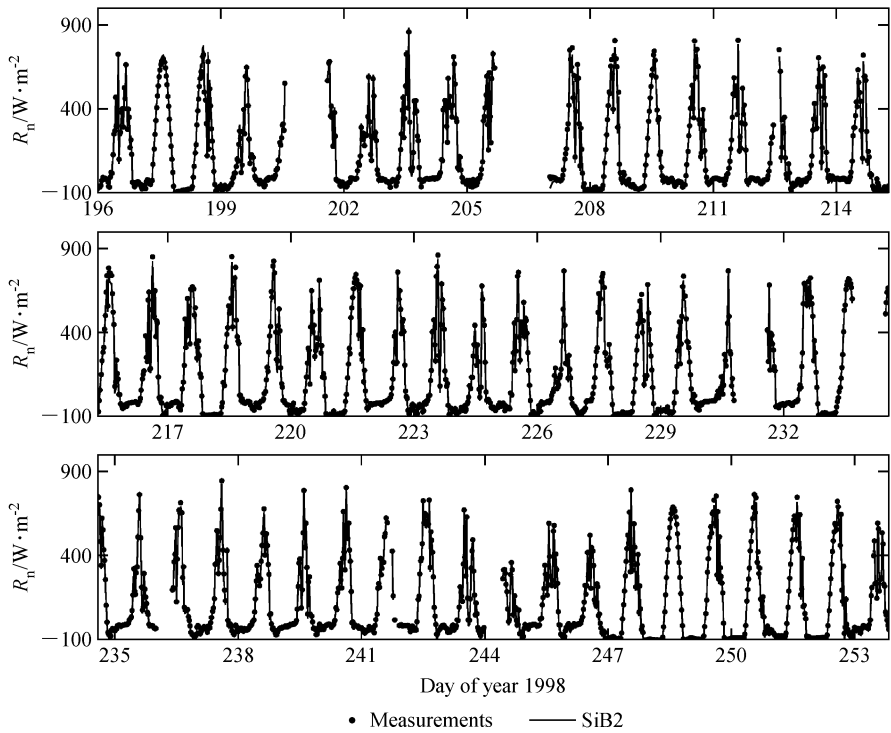


图 2 SiB2 模拟与实地观测净辐射 (R_n) 随时间的变化
Fig. 2 Evolution of net radiation (R_n) modeled using SiB2 against direct measurements

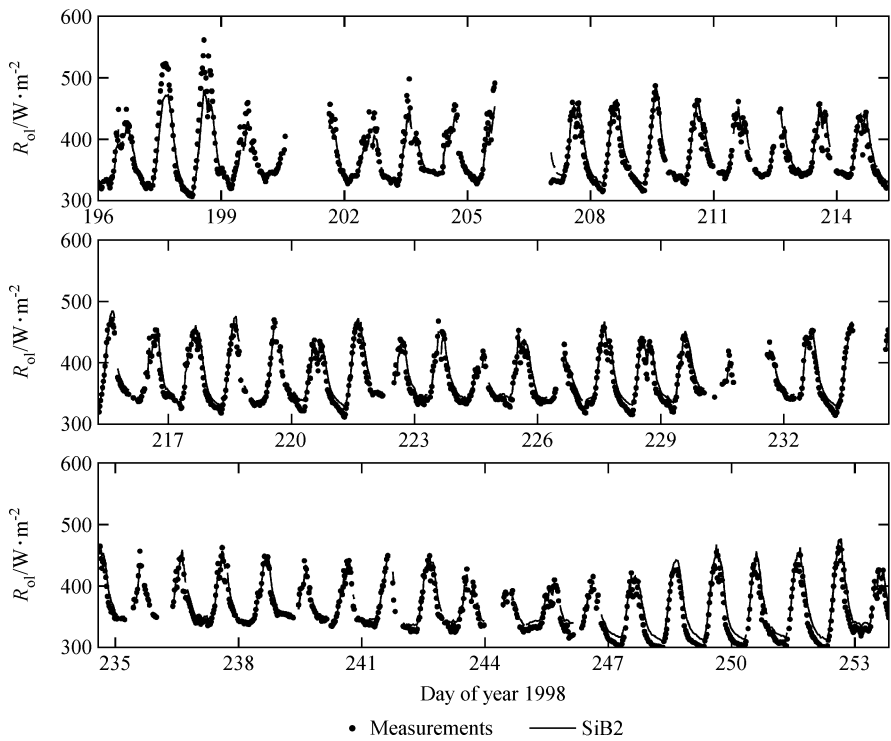


图 3 同图 2，但为向上长波辐射 (R_{ol})
Fig. 3 Similar to Fig. 2, but for upward long-wave radiation (R_{ol})

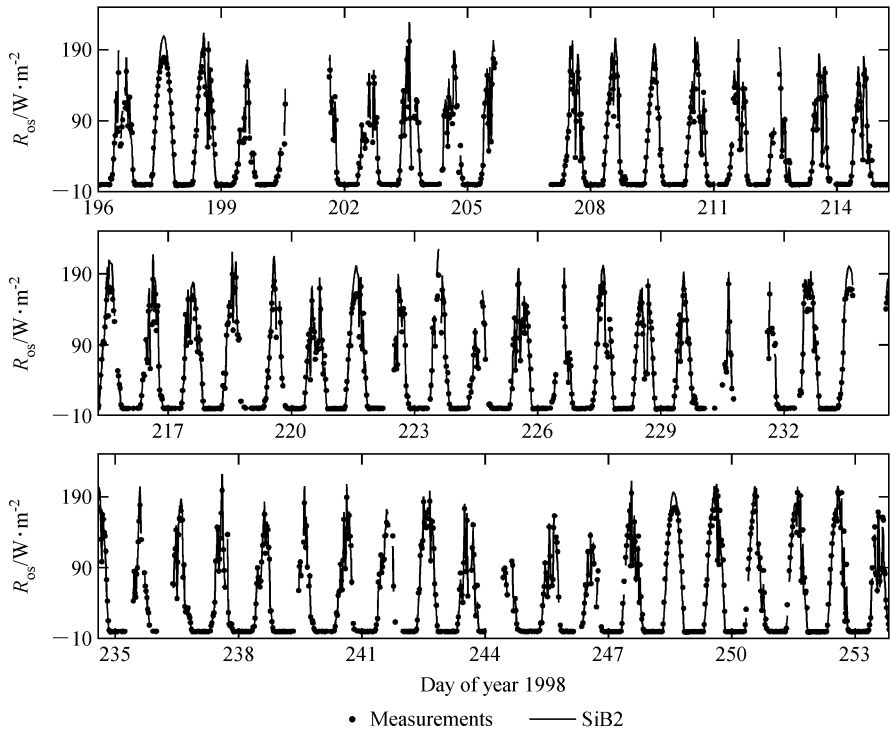


图 4 同图 2, 但为向上短波辐射 (R_{os})

Fig. 4 Similar to Fig. 2, but for upward short-wave radiation (R_{os})

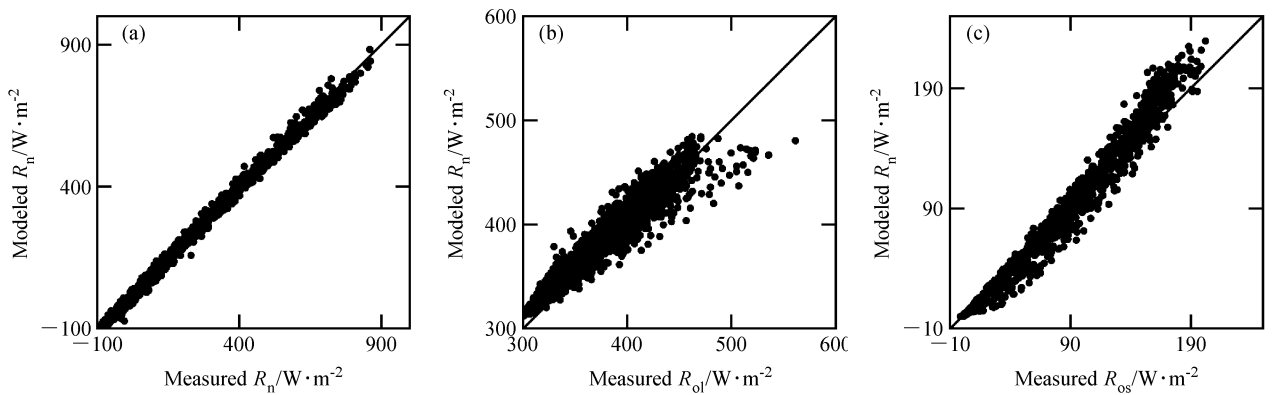


图 5 SiB2 模拟与实地观测 (a) 净辐射 (R_n)、(b) 向上长波辐射 (R_{ol}) 和 (c) 向上短波辐射 (R_{os}) 的散点分布

Fig. 5 Scatterplots of (a) net radiation (R_n), (b) upward long-wave radiation (R_{ol}), and (c) upward shortwave radiation (R_{os}) against direct measurements

温度很高, 但它的日较差大, 即夜间地表温度较低, 造成夜间高原地区地面向上长波辐射较小。而在平原地区, 由于白天与夜间地表温度的变化不是很大, 即使白天地面向上长波辐射可能会略低于高原地区, 但夜间地面向上长波辐射始终保持在比高原地区高的水平上, 因而就日总量而言, 高原地区的地面向上长波辐射要低于平原地区。由图 3 可以看出, 地面向上长波辐射的日变化明显, 大致范围

为 $300 \sim 680 \text{ W/m}^2$, 与大气向下长波辐射不同的是, 地面向上长波辐射在太阳升起后稍有一些变化, 但变化幅度不大, 大约 100 W/m^2 左右, 相对于太阳向下短波辐射, 变化幅度不到 10% 。

(3) 地面向上短波辐射 安多站地面上为高原草甸覆盖, 地面向上短波辐射有明显的日变化规律。晚上由于没有太阳向下短波辐射, 致使地面向上短波辐射为零, 而日出以后, 地面向上短波辐射

开始慢慢提升。图 4 显示了安多站在季风前后的变化，可以看出：这一地区的地面向上短波辐射值在 $0\sim200\text{ W/m}^2$ 。

4.2 能量平衡分量

图 6~8 分别表示直接测量和 SiB2 模拟得到的感热通量 (H)、潜热通量 (L_e) 和土壤热通量 (G_0)

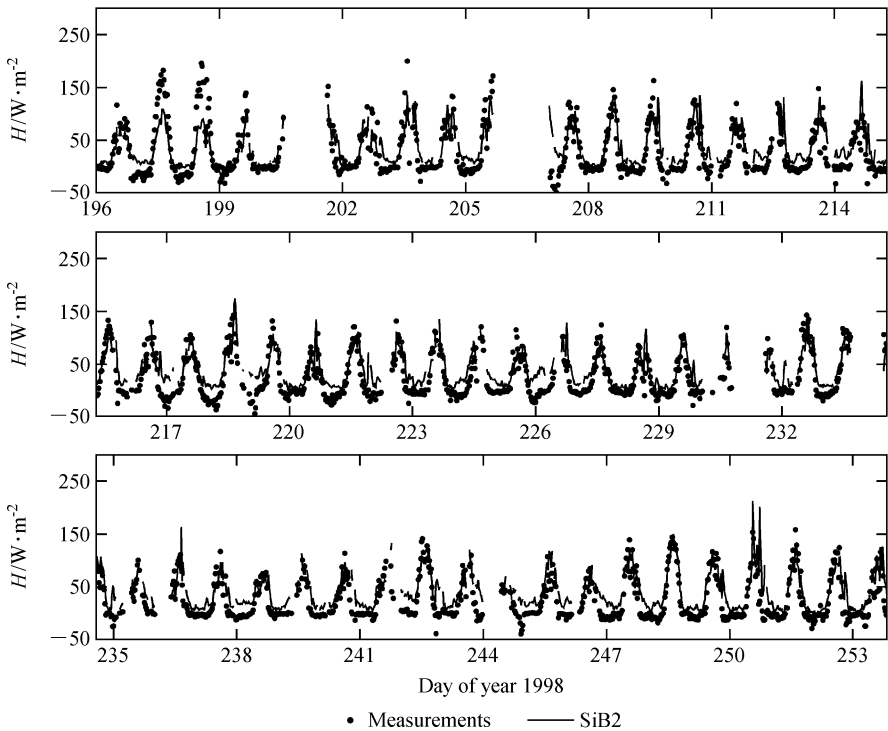


图 6 SiB2 模拟与实地观测感热通量 (H) 随时间的变化
Fig. 6 Evolution of sensible heat flux (H) modeled using SiB2 against direct measurements

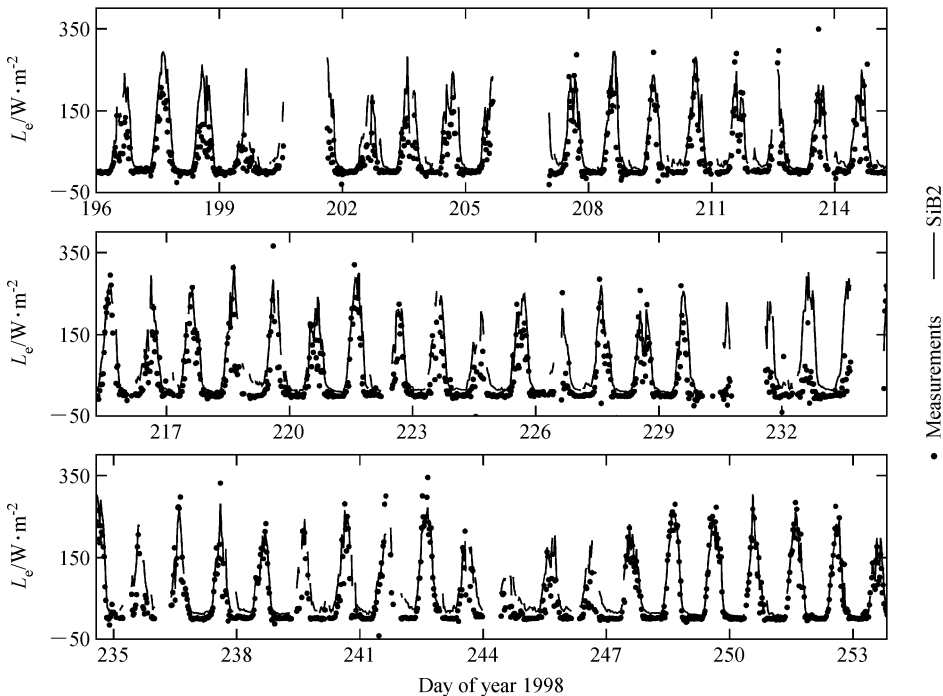


图 7 同图 6，但为潜热通量 (L_e)
Fig. 7 Similar to Fig. 6, but for latent heat flux (L_e)

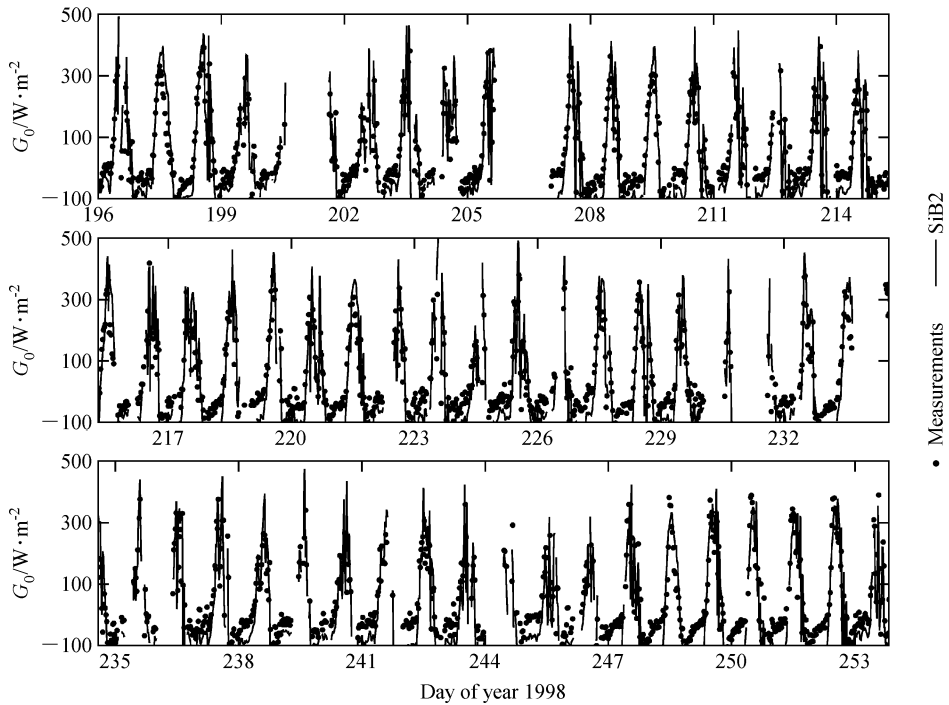


图 8 同图 6，但为土壤热通量 (G_0)

Fig. 8 Similar to Fig. 6, but for soil heat flux (G_0)

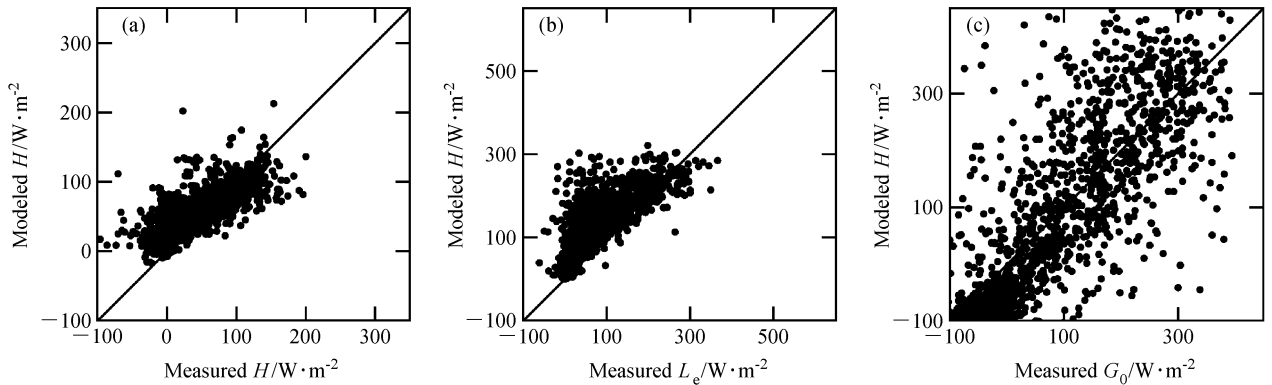


图 9 SiB2 模拟与实地观测 (a) 感热通量 (H)、(b) 潜热通量 (L_e) 和 (c) 土壤热通量 (G_0) 的散点分布图

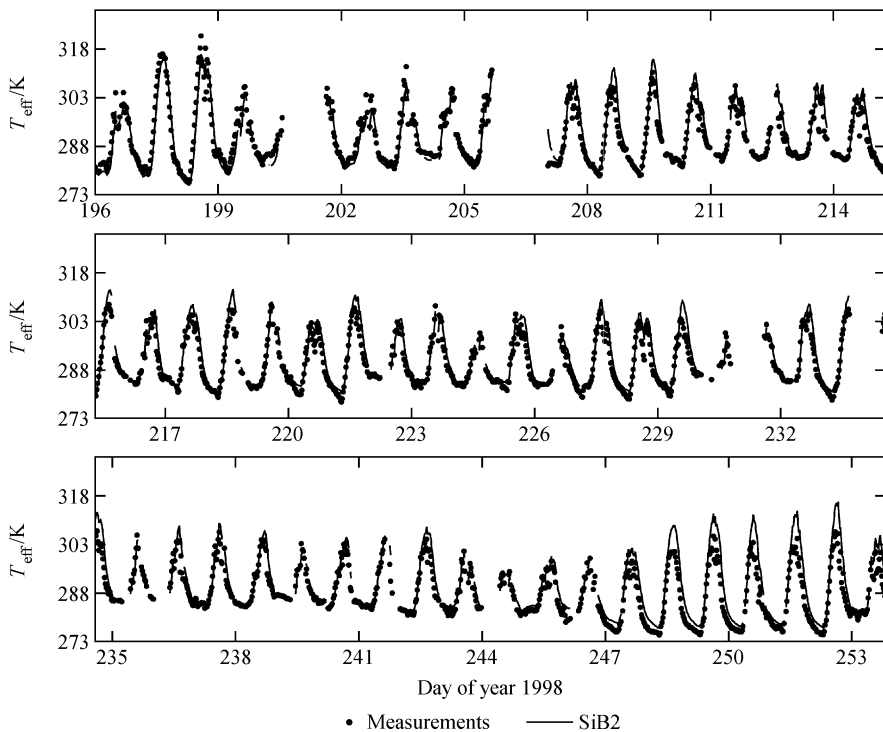
Fig. 9 Scatterplots of (a) sensible latent flux (H), (b) latent heat flux (L_e), and (c) soil heat flux (G_0) modeled using SiB2 against direct measurements

时间序列。SiB2 模拟和测量的感热通量、潜热通量和土壤热通量日变化趋势一致，相关系数为 0.86、0.82 和 0.92。模拟的感热通量、潜热通量和土壤热通量相对于直接测量值的分布见图 9，SiB2 分别高估感热通量、潜热通量和土壤热通量约 4%、13% 和 8%。

从图 6、7 可看出，感热通量和潜热通量日变化明显，季风爆发前 (DOY 199)，地表比较干燥且草甸比较低，感热通量和潜热通量基本相当。模拟和观测的潜热通量演变趋势一致，变化范围是 $-60 \sim$

360 W/m^2 。季风期间，降水使地表变得湿润，潜热通量增大，占主导地位。

地表和浅层土壤热通量由许多因素决定，包括太阳辐射、土壤成分、土壤含水量和植被覆盖等。图 8 给出了模拟和测量的土壤热通量，两条曲线的形状和相位十分接近，模拟和测量的平均值分别为 195 W/m^2 和 183 W/m^2 ，相差 12 W/m^2 (占测量值的 6.6%)，模拟和测量峰值分别为 465 W/m^2 和 420 W/m^2 。

图 10 同图 6, 但为地表有效辐射温度 (T_{eff})Fig. 10 Similar to Fig. 6, but for surface effective radiative temperature (T_{eff})

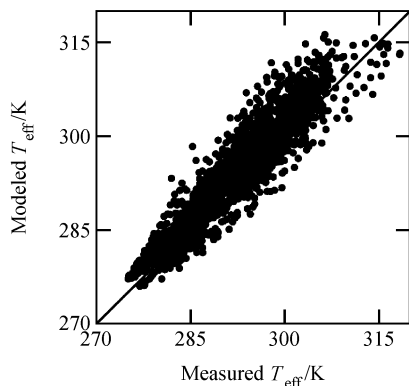
4.3 地表有效辐射温度和土壤湿度

当已知向上长波辐射, 地表有效辐射温度可由 (7) 式计算得到。图 10 显示了 SiB2 模拟和由测量向上长波辐射计算得到的地表有效辐射温度 (T_{eff}) 的时间序列。很明显 SiB2 模拟与测量地表有效辐射温度日变化趋势一致, 模拟与测量的地表有效辐射温度分布见图 11, 模式高估地表有效辐射温度 5%, 相关系数达到 0.96。

图 12a 显示了在 0~0.1 m 表层上直接测量和由 SiB2 在土壤表层 (0~0.02 m)、根区 (0.02~0.30 m) 和补给区 (0.30~1.0 m) 三层模拟出的土壤湿度的时间序列; 图 12b 是降水的时间序列。可以看出: (1) 直接测量和模拟的土壤湿度对降水反应敏感; (2) 根区的测量结果与模拟的结果接近一致; (3) 季风期以后, 随降水的减少, 裸土的蒸发和冠层的蒸腾作用, 模拟和测量的土壤湿度都逐步减少; (4) SiB2 模拟的土壤表层、根区和补给区的平均湿度分别为 0.44、0.52 和 0.41, 与测量的平均湿度 0.42 非常接近。

4.4 统计分析

根据如下三个统计分析计算公式 (Colello et al., 1998)

图 11 SiB2 模拟与实地观测 T_{eff} 的散点分布Fig. 11 Scatterplot of surface effective radiative temperature (T_{eff}) modeled using SiB2 against direct measurements

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i - O_i}{n}, \quad (8)$$

$$\text{SEE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n - 2}}, \quad (9)$$

$$\text{NSEE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2}}. \quad (10)$$

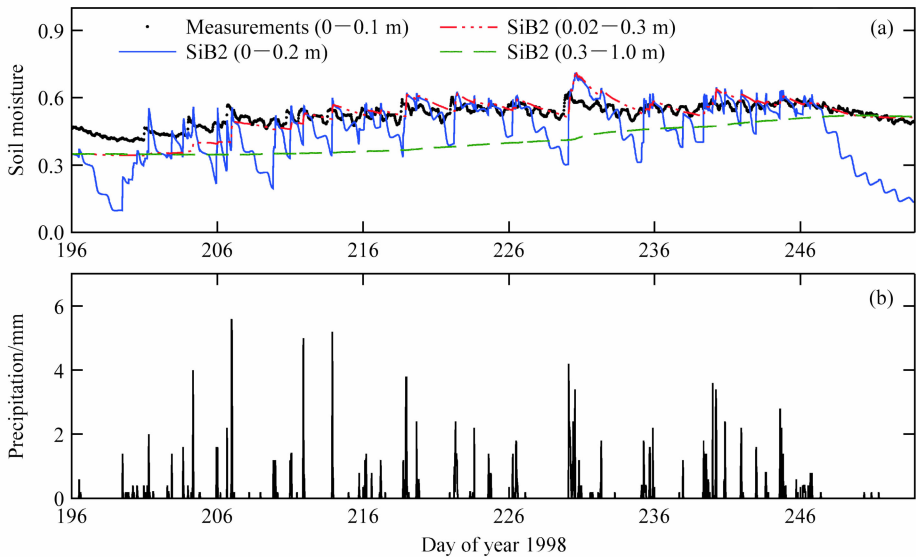


图 12 (a) SiB2 模拟的三层土壤湿度与实地观测随时间的变化; (b) 降水的时间序列
Fig. 12 (a) Evolution of soil moisture in the three layers modeled using SiB2 against direct measurements; (b) evolution of precipitation

表 3 SiB2 模拟和观测的各物理量的偏差、标准误差和相对标准偏差统计分析表

Table 3 Computed Bias, standard error of estimate (SEE), and normalized standard error estimate (NSEE) of physical quantities modeled using SiB2 against direct measurements

	Bias(W/m ²)	SEE(W/m ²)	NSEE
净辐射 R_n	-5.75	12.85	0.05
向上长波辐射 R_{ol}	4.76	12.57	0.04
向上短波辐射 R_{os}	1.16	8.37	0.12
感热通量 H	10.94	26.51	0.57
潜热通量 L_e	24.90	41.43	0.54
土壤热通量 G_0	-20.60	73.44	0.63
地表有效辐射温度 T_{eff}	-1.13	2.96	0.01
土壤湿度 W	-0.01	0.05	0.10

本文将 SiB2 的模拟结果 (M_i) 与实际测量值 (O_i) 进行了对比: 其中 Bias 为偏差, n 是数据点的总数 ($n=2777$), SEE 是估计值的标准误差, NSEE 是相对标准偏差。

对净辐射、向上长波辐射、感热、潜热和土壤热通量按式 (8~10) 中的方法进行了统计分析 (见表 3)。

4.5 地表能量收支

地表能量收支描述为:

$$R_n = H + L_e + G_0. \tag{11}$$

Wilson et al. (2002) 对全球通量观测网络

(FLUXNET) 的 22 个站点进行了能量平衡闭合研究, 发现各通量观测站普遍存在能量不平衡的现象。同样, 很多学者利用 GAME/Tibet 项目获取的资料对地表能量交换的研究表明, 独立测量得到的能量平衡方程的各个分量不能很好地闭合 (Wang et al., 1999; Gao et al., 2000, 2003b; Kim et al., 2000; Tanaka et al., 2001): 感热通量与潜热通量之和仅占地表可用能量的 70% 左右。

图 13 比较了安多站的感热与潜热之和 ($H + L_e$) 与地表可用能量 ($R_n - G_0$), $n=632$ 为总样本 (2777) 剔除降水期间和小于 0 的数据所得。二者之间的相关系数 (r) 为 0.87。正比例函数回归线的斜率 ϵ 为 0.58。这与 Gao et al. (2004) 的研究结果 ($\epsilon=0.7$) 接近。

5 结论

本文利用 SiB2 模拟了 GEWEX 的 GAME/Tibet 安多观测站 1998 年 7 月 15 日至 9 月 10 日期间的净辐射、感热通量和潜热通量、土壤热通量、地表有效辐射温度和土壤湿度, 将模拟结果同实测数据进行了对比, 进一步检验了 SiB2 对季风期间青藏高原稀疏草原地表能量分配的模拟能力。SiB2 模拟的净辐射与测量值比较, 低估 0.2%, 相关系数为 1.0。向上长波辐射被高估计 13%, 相关系数为 0.96。向上短波辐射被低估 4%, 相关系数为

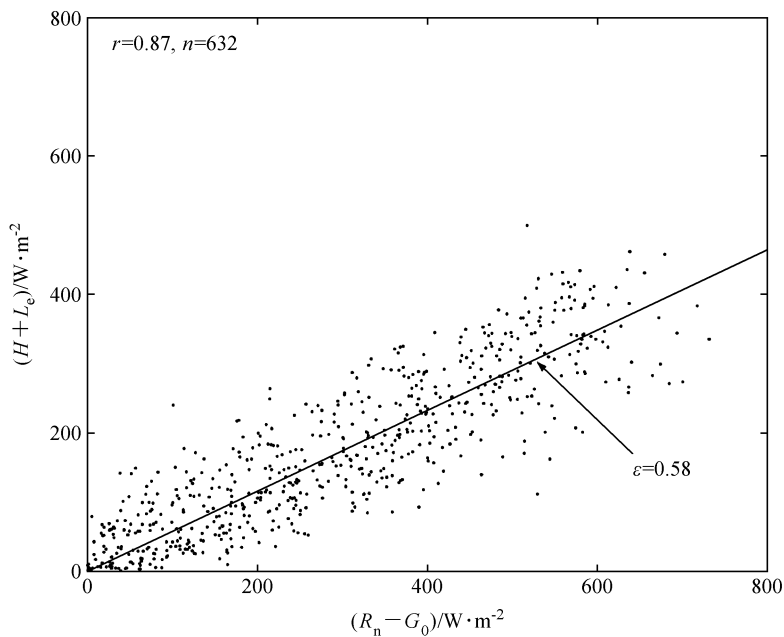


图 13 实地观测的感热与潜热之和 $(H+L_e)$ 与地表可用能量 (R_n-G_0) 的对比分布

Fig. 13 Comparison of the measured $(H+L_e)$ and surface available energy (R_n-G_0)

0.99。SiB2 模拟和测量的感热通量、潜热通量和土壤热通量时间变化一致，相关系数为 0.84、0.85 和 0.95。SiB2 分别将感热通量、潜热通量和土壤热通量高估 4%、13% 和 8%。SiB2 对安多站净辐射模拟结果与测量值的相对标准偏差为 0.05，小于 Gao et al. (2004) 对那曲地区 BJ 站的净辐射模拟结果与测量值的相对标准偏差（为 0.11）。对感热通量、潜热通量和土壤热通量而言，Gao et al. (2004) 对那曲地区 BJ 站的模拟结果更接近测量值（相对标准偏差分别为 0.30、0.33 和 0.35），本文的模拟结果相对标准偏差较大，分别为 0.57、0.54 和 0.63。总体来说，SiB2 对辐射分量模拟结果的偏差相对较小，相关程度普遍比感热通量、潜热通量和土壤热通量的模拟结果高，这是由于青藏高原安多站地表覆盖率低（约 10%），冠层高度低（0.05 m）使得地表对辐射的衰减少，SiB2 可以较准确地模拟出辐射分量。同时，由于 SiB2 作用方式为大气-植被-土壤，植被的覆盖不充分使 SiB2 不能准确模拟植被冠层所贮热量通量，影响了 SiB2 对感热通量、潜热通量和土壤热通量的模拟结果。而那曲地区 BJ 站的的地表覆盖率约 40%，更符合 SiB2 对地表植被的要求，从而对感热通量、潜热通量和土壤热通量的模拟效果优于本文结果。本文对土壤湿度的估计合理，土壤表层、根区和补给区的

平均湿度分别为 0.44、0.52 和 0.41，平均测量值为 0.42，比那曲地区 BJ 站测量的平均湿度高出 0.1（Gao et al., 2004）。

致谢 感谢 GAME/Tibet 期间中日科学家采集安多观测站微气象数据过程中付出的艰苦努力，感谢两位审稿专家为本文提供了宝贵意见。

参考文献 (References)

Bian L, Gao Z, Xu Q, et al. 2002. Measurements of turbulence transfer in the near-surface layer over the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 102 (2): 281–300.
Bian L, Xu X D, Lu L G, et al. 2003. Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qamdo of the Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (3): 369–378.
Chen L, Reiter E R, Feng Z. 1985. The atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: May–August 1979 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113 (10): 1771–1790.
Colello G D, Grivet C, Sellers P J, et al. 1998. Modeling of energy, water, and CO₂ flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2: May–October 1987 [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (7): 1141–1169.
Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7–8): 793–807.
Gao Z, Wang J M, Ma Y M, et al. 2000. Calculation of near-surface layer turbulent transport and analysis of surface thermal equi-

- librium features in Nagqu of Tibet [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology Oceans and Atmosphere*, 25 (2): 135–139.
- Gao Z, Bian L, Zhou X. 2003a. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D13): 4387–4399.
- Gao Z, Bian L, Wang J X, et al. 2003b. Discussion on calculation methods of sensible heat flux during GAME/Tibet in 1998 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (3): 357–368.
- Gao Z, Chae N, Kim J, et al. 2004. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature, and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2) [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D06): 102–112.
- Hong J, Kim J. 2008. Simulation of surface radiation balance on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (L08): 814–818.
- Kim J, Choi T, Lee H, et al. 2000. Energy partitioning and its imbalance over a prairie site in central Tibetan plateau during GAPE-IOP, 1998 [N]. *Eos Supplement, Transactions of the American Geophysical Union*, 81, 5.
- Krishnamurti T N, Ramanathan Y. 1982. Sensitivity of the monsoon onset to differential heating [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39 (6): 1290–1306.
- 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 1999. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究 [J]. *大气科学*, 23 (2): 142–151. Li Jialun, Hong Zhongxiang, Luo Weidong, et al. 1999. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 23 (2): 142–151.
- 李家伦, 洪钟祥, 孙菽芬. 2000. 青藏高原西部改则地区大气边界层特征 [J]. *大气科学*, 24 (3): 301–312. Li Jialun, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. 2000. An observational experiment on the atmospheric boundary layer in Gerze area of the Tibetan Plateau [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 24 (3): 301–312.
- 吕建华, 季劲钧. 2002a. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 I. 物理通量和参数 [J]. *大气科学*, 26: 111–126. Lü J H, Ji J J. 2002. A simulation study of atmosphere-vegetation interaction over the Tibetan Plateau. Part I: Physical fluxes and parameters [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 26 (1): 111–126.
- 吕建华, 季劲钧. 2002b. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 II. 植被叶面积指数和净初级生产力 [J]. *大气科学*, 26 (2): 255–262. Lü J H, Ji J J. 2002. A simulation study of atmosphere-vegetation interaction over the Tibetan Plateau. Part II: Net primary productivity and leaf area index [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 26 (2): 255–262.
- 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. *大气科学*, 24 (5): 715–722. Ma Y M, Osamu T, Wu X M, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 24 (5): 715–722.
- Ma Y M, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. 2003. Regionalization of surface fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using satellite remote sensing data [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81 (2): 277–293.
- Ma W, Ma Y, Li M, et al. 2008. Estimating surface fluxes over the north Tibetan Plateau area with ASTER imagery [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 5: 1705–1730.
- Martano P. 2000. Estimation of surface roughness length and displacement height from single-level sonic anemometer data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (5): 708–715.
- Qian Y F, Zheng Y Q, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 23 (6): 593–613.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (6): 505–531.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996a. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9 (4): 676–705.
- Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. 1996b. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data [J]. *J. Climate*, 9 (4): 706–737.
- Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al. 2001. Surface energy budget at Amdo on the Tibetan Plateau using GAME/Tibet IOP98 data [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (1B): 505–517.
- Wang J, Kim J, Liou Y, et al. 1999. Energy balance analysis and one-dimensional simulation of land surface processes in a short-grass site of central Tibetan Plateau [C]. *Proceeding of the 1st International Workshop on GAME-Tibet*, Xi'an, China, 11–13, January, 1999, 73–76.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113 (1–4): 223–243.
- 张宇, 吕世华. 2002. 藏北高原陆面过程的模拟试验 [J]. *大气科学*, 26 (3): 387–393. Zhang Yu, Lü Shihua. 2002. An experiment on the northern Qinghai–Xizang Plateau land surface model [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 26 (3): 387–393.
- 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 125pp. Zhou Mingyu, Xu X D, Bian L G, et al. 2000. Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 125pp.