

何志强, 沈新勇, 王英舜, 等. 2011. 利用简单生物圈模式 SiB2 模拟锡林浩特草原地表湍流通量 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 353-368. He Zhiqiang, Shen Xinyong, Wang Yingshun, et al. 2011. Modeling of the surface turbulence fluxes over a typical steppe prairie in Inner Mongolia, China by using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2) [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 353-368.

利用简单生物圈模式 SiB2 模拟锡林浩特草原 地表湍流通量

何志强^{1,2} 沈新勇¹ 王英舜³ 高志球²

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3 内蒙古自治区锡林浩特国家气候观测台, 锡林浩特 026000

摘要 利用简单生物圈模式 SiB2 模拟了 2007 年 7 月 1 日至 9 月 30 日期间锡林浩特草原的地表能量分配、CO₂ 通量、地表有效辐射温度和土壤湿度。采用锡林浩特国家气候观测台野外试验基地实地测量资料确定 SiB2 所需要的参数和初始值后, 由该资料中 30 min 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、CO₂ 通量、地表有效辐射温度和土壤湿度进行了对比。结果表明: 1) 模式分别高估净辐射、潜热通量和土壤热量通量 1.1%、10% 和 5%, 低估感热通量 6%; 2) 模拟的 7 月和 8 月 CO₂ 通量和观测值有较好的一致性, 9 月低估 CO₂ 通量 14.2%; 3) 模式得出的地表有效辐射温度白天低估、晚上高估; 4) 土壤湿度模拟合理。

关键词 SiB2 典型草原 能量分配 CO₂ 通量

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0353-16 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Modeling of the Surface Turbulence Fluxes over a Typical Steppe Prairie in Inner Mongolia, China by Using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2)

HE Zhiqiang^{1,2}, SHEN Xinyong¹, WANG Yingshun³, and GAO Zhiqiu²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Xilinhot National Climate Observing Station, Xilinhot 026000

Abstract Surface energy distribution, CO₂ flux, surface effective radiative temperature, and soil moisture over a typical steppe prairie in Inner Mongolia, China from 1 July to 30 September 2007 were simulated by using Simple Biosphere model 2 (SiB2). Based on the surface flux monitoring system data, the model was initialized and driven by using short-wave solar radiation, atmospheric long-wave radiation, vapor pressure, air temperature, wind speed,

收稿日期 2009-09-18 收到, 2011-03-21 收到修定稿

资助项目 “十一五”国家科技支撑计划重点项目 2008BAC40B05-03, 国家重点基础研究发展计划项目“我国东部沿海城市带的气候效应及对策研究”(2010CB428500), 中国科学院“百人计划”, 国家自然科学基金项目 41075039, 江苏省青蓝工程 (2009)

作者简介 何志强, 男, 硕士, 主要从事大气边界层研究。E-mail: zhiqiang.he1983@gmail.com

and precipitation. Then the simulated and observed turbulent flux, surface effective radiative temperature, and soil moisture were compared. The results show that: 1) SiB2 overestimated net radiation, latent heat flux, and soil heat flux by 1.1%, 10%, and 5%, respectively, and it underestimated sensible heat flux by 6%. 2) The simulated CO₂ fluxes in July and August were consistent with the observation. But the model underestimated the CO₂ flux in September by 14.2%. 3) Surface effective radiative temperature was underestimated (overestimated) in the day (night). 4) Soil moisture was estimated reasonably.

Key words SiB2, typical steppe prairie, energy distribution, CO₂ flux

1 引言

陆面过程主要通过地气之间的湍流、动量、热量、水汽和 CO₂ 交换影响天气与气候 (Zhang et al., 1996; Collatz et al., 2000; Bounoua et al., 2002; Defries et al., 2002; Chen et al., 2003; 涂钢等, 2006)。气候模拟结果对地表能量分配的日变化和季节变化尤为敏感 (Dickinson et al., 1991; Rowntree, 1991)。陆面过程对区域和中尺度大气模式模拟至关重要 (Chen and Dudhia, 2001; Sridhar et al., 2002)。陆地表面是地球气候系统的重要组成部分, 陆地下垫面状况及其与大气的相互作用在很大程度上决定了陆地表面的能量和水分循环, 从而影响区域以及全球气候及其异常 (刘少锋和林朝晖, 2005)。草原约占地球自然植被面积的 32% (Adams et al., 1990), 欧亚大草原是全球最大的草原地区, 这部分草原位于半干旱温带大陆性气候区 (Hao et al., 2007)。草原生态系统对气候变化有明显的响应。目前这一区域气候变化显现出的结果是冬季变暖、春季干旱 (陈佐忠等, 2003)。内蒙古典型草原是欧亚大陆温带草原的重要一部分, 是中国最大的草原地区 (Hao et al., 2007)。因此该地区的陆气相互作用 (包括水分交换、能量收支和 CO₂ 的输送) 对我国气候有重要影响。内蒙古典型草原与大气之间能量、动量和 CO₂ 的交换已经成为气候研究的热点之一 (符淙斌和温刚, 2002; 朱治林等, 2002; Hao et al., 2008; Ketzer et al., 2008; Chen et al., 2009; Gao et al., 2009; Miao et al., 2009)。

精确描述陆气交换物理过程有利于改善大气环流模式 (General Circulation Model, GCM) 的湍流通量参数化方案, 从而提高预报效果。在

GCM 网格区域基础上, Sellers et al. (1986) 建立了简单生物圈模式 (Simple Biosphere model, SiB), 它是一维土壤-植被-大气模式, 该模式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, 并把全球植被分为 12 种类型 (Sellers et al., 1996a)。

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) 将两层植被处理方案改为单层处理方案; 2) 引入了光合-水传导子模式, 真实描述了 CO₂ 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的植被指数 (Simple Ratio vegetation index, SR) 来计算模式所需的 3 个重要参数: 光合作用有效辐射比 (Fraction of Photosynthetic Active Radiation, FPAR)、总叶面积指数 (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 (见表 1); 5) 模式充

表 1 SiB 和 SiB2 的植被类型
Table 1 Vegetation classification schemes used in SiB and SiB2

SiB		SiB2	
类型	植被种类	类型	植被种类
1	常绿宽叶林	1	常绿宽叶林
2	落叶宽叶林	2	落叶宽叶林
3	宽叶和针叶林	3	宽叶和针叶林
4	常绿针叶林	4	常绿针叶林
5	落叶针叶林	5	落叶针叶林
6	针宽叶林和地被植物	6	短植被/C4 草地
7	地被植物	6	短植被/C4 草地
8	宽叶灌木地被植物	6	短植被/C4 草地
9	裸土上宽叶灌木	7	裸土上宽叶灌木
10	矮树和灌木	8	矮树和灌木
11	无植被裸土	6	短植被/C4 草地
12	冬小麦	9	农田/C3 草地

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; 6) 加入了一个融雪水方法, 当表面平均雪盖很少或正在减少时这就避免了快速上升的热通量和表面反照率的跳跃。

1998 年, Colello et al. (1998) 利用 SiB2 模式对温带草原生态系统的能量、水汽和 CO_2 通量进行了模拟, 提出了土壤中水和热不同扩散率的计算表达, 并指出植被和土壤的生理过程控制着地表能量的交换, CO_2 净通量是生理过程中一个非常敏感的诊断量。2004 年, Gao et al. (2004) 使用 SiB2 模拟了全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究 [the Global Energy and Water cycle EXperiment (GEWEX) Asian Monsoon Experiment on the Tibetan Plateau, GAME/Tibet] 那曲的 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。2008 年, Prihodko et al. (2008) 对复杂陆面模式 (SiB2.5) 进行了敏感性、不确定性试验, 并提出一套随时间变化的独立参数。Hong and Kim (2008) 使用 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。

目前, 尚未有对半干旱温带大陆性典型草原能量分配和 CO_2 通量的模拟研究, 因此, 本文利用简单生物圈模式 (SiB2) 模拟锡林浩特典型草原的能量分配、 CO_2 通量、地表温度和土壤湿度。通过将 SiB2 模式的模拟结果与观测资料比较, 进一步检验 SiB2 对内蒙古典型草原地表能量分配和 CO_2 通量的模拟能力。

2 资料来源和方法

2.1 研究地概况

锡林浩特国家气候观象台野外试验研究基地 (44.14°N, 116.31°E) 海拔 1160 m, 距内蒙古锡林浩特市东北 25 km。试验研究基地占地面积

1000 hm^2 , 属温带典型草原区, 地处国际地圈生物圈计划 (International Geosphere - Biosphere Program, IGBP) 的国际样带中国东北样带 (NorthEast China Transect, NECT) 之内 (张新时和周广胜, 1997), 是锡林浩特典型草原的中心地带。该试验基地的地形和下垫面特性基本代表了内蒙古典型草原大面积特征, 其区域的气候类型为温带半干旱大陆性季风气候, 四季明显, 日照充沛。春季风大雨少, 蒸发旺盛; 夏季温暖, 雨热同季; 秋季短促, 气温骤降; 冬季寒冷漫长。年均气温为 275.65 K, 1 月平均气温 254.85 K, 7 月平均气温 293.85 K, 历年平均日照时数 2932 h, 无霜期 90~110 d, 年均降水量约 273 mm。土壤主要为典型栗钙土, 主要植物种类有克氏针茅 (*Stipa kryloyii*)、羊草 (*Aneurolepidium chinense*)、糙隐子草 (*Cleistogenes serotina*)、知母 (*Anemarrhena asphodeloides Bunge*)、矮葱 (*Allium anisopodium Regel*)、冷蒿 (*Artemisia frigida willd*) 等。在非生长季, 下垫面均为植物立枯物及残落物; 生长季由天然植被覆盖, 天然牧草生长高度在 0.2~0.6 m 左右, 年均覆盖度为 40%~60%, 产量约为 1289 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本次模拟实验选取时间范围为 2007 年 7 月 1 日至 9 月 30 日。由于降水资料在野外试验研究基地没有测量, 采用的降水资料是距该站 24.6 km 的国家气候观象台的资料。

数据采集使用开路涡度相关通量监测系统。该系统由三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell Scientific Inc.), CS7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (Li-Cor, USA) 和 CR5000 数据采集器 (Campbell Scientific Inc.) 组成。三维超声风速仪主要测量高频风分量 (如 u 、 v 和 w), CS7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪传感器测量 CO_2 和水汽的绝对密度; CR5000 数据采集器主要是测控、运算及数据存储, 仪器采样频率为 10 Hz, 由数据采集器自动存储 30 min 原始数据, 并用 1G PCMCIA 卡储存, 每 25 天换卡备份数据。仪器采用 12 V 电瓶供电。

监测场围栏内面积为 $1.68 \times 2.44 \text{ km}^2$, 在监测场设立了 100 m 近地面层大气要素监测塔, 塔上安装了 2、4、10、20、30 m 温度和湿度 (Vaisala, HMP45C) 等相关大气要素传感器。开

路涡度相关通量监测系统安装在监测塔北 3 m 处, 安装高度为 4 m。土壤热通量由 2 块土壤热通量板 (HFT-3, Campbell Scientific Inc.) 测量。土壤温度分别在土壤中 8 个不同深度测量 (地表, 0.05、0.10、0.15、0.20、0.40、1.0、1.8 m)。向上、向下的长短波辐射分量由 Kipp&Zonen 公司的辐射仪测量, 安装高度为 2 m。除仪器出现故障、检修或因天气、供电等原因出现的数据缺测外, 各监测要素将长期同步连续进行。

监测数据由于受到天气因素、环境条件以及仪器本身的属性限制等影响, 在分析监测资料前, 先进行资料质量控制, 去掉不合理或因仪器出现故障、天气等原因产生的异常数据, 并进行数据订正插补。

2.2 通量计算

实际观测中, 感热通量 (H) (Kaimal and Finnigan, 1994)、潜热通量 (L_E) (Kaimal and Finnigan, 1994) 和 CO_2 通量 (F_c) (Desai et al., 2008) 计算公式为:

$$H = \bar{\rho} c_p \overline{w'T'}, \quad (1)$$

$$L_E = l \bar{\rho} \overline{w'q'}, \quad (2)$$

$$F_c = \overline{wc'}, \quad (3)$$

其中, $\bar{\rho}$ 、 c_p 和 l 分别表示测量高度处大气平均密度 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、大气比定压热容 (单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 和汽化潜热 (单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。 w' 、 T' 、 q' 和 c' 分别表示垂直风速 w (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、气温 T (单位: K)、比湿 q (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 CO_2 浓度 c (单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的脉动量。锡林浩特观测站的资料为 30 min 平均。

地表土壤热量通量 (G_0) 按如下计算:

$$G_0 = G_1 + C_g \Delta z \partial T_s / \partial t, \quad (4)$$

其中, G_1 为地表 0.1 m 深度处测得的土壤热量通量; C_g ($1.30 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) 是土壤的体积热容量 (Van Wijk, 1963); T_s 是厚度为 0.05 m 的浅土层平均温度; Δz 为土壤厚度, 取 0.05 m; t 为时间 (单位: s), 取时间步长 1800 s。

净辐射 R_n 为

$$R_n = R_{ds} + R_{dl} - R_{os} - R_{ol}, \quad (5)$$

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。

为定量确定通量测量对应的区域, 本文利用 Schmid (1994) 方案 (http://www.indiana.edu/~climate/SAM/SAM_FSAM.html [2009-07-01]) 做 footprint 分析。观测的通量源区为上风方向上的椭圆, 其大小取决于风向、风速、测量高度和地表粗糙度, 源区随风速减少 (增加) 而缩短 (拉长)。源区代表的是使用涡动协方差方法在草原生长季节的观测, 这是我们最关注的。

L 为 Monin-Obukhov 长度, 通过计算其值为 -62.8 m 。粗糙高度利用 Martano (2000) 的计算方法求得。在草原生长时期, 植被冠层顶部为 0.6 m, 零平面位移为 0.4 m, 动力学粗糙高度 z_0 为 0.0163 m。在观测仪器的上风方向和侧风方向上有一个椭圆区域表明: 观测仪器 4 m 高度上测量的 90% 通量来自上风方向 155 m 的范围内, footprint 通量对上风方向距离观测仪器 45 m 处 (如图 1 所示) 的地表最为敏感, 从该点往外 10%~90% 的椭圆是仪器观测到的来自上风方向通量值的源区分布。 $p=90\%$ 的椭圆说明仪器观测到的各个通量 90% 来自该区域, 其中在最中心的椭圆区域 ($p=10\%$) 是仪器观测资料中最敏感的地区, 在整个观测期间应该尽量减少人为的干扰和影响, 以保证资料的准确性。

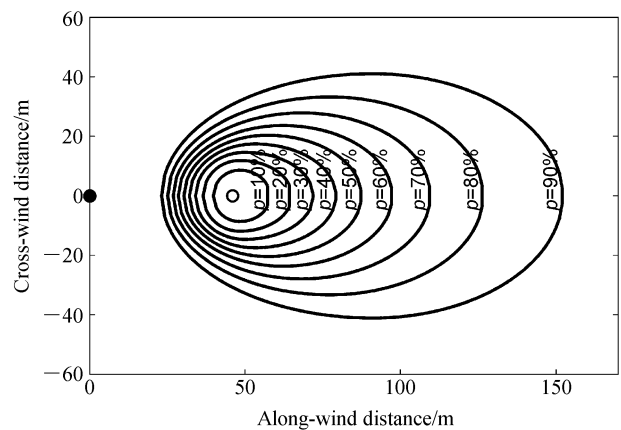


图 1 整个生长时期部分月份 (7~9 月) 观测高度为 4 m 时 90% 的通量源区分布。● 代表观测仪器, ○ 为上风方向距离观测仪器 45 m 处

Fig. 1 Distribution of 90% flux source areas at the measurement height of 4 m for part of the entire growth period (Jul to Sep). ● denote apparatus, ○ denote 45-m away from the apparatus in the upwind direction

3 试验设计

3.1 参数设置

SiB2 中的大多参数体现了植被的基本物理和生物特性，如辐射传输模式中叶子的反照率和传输率、土壤子模式中的水文参数等。SiB2 对参数设置非常敏感，Colello et al. (1998) 检验了 SiB2 对高草类大草原整个生长期间的温度变化、能量分配和 CO_2 通量变化的模拟能力，先后使用 SiB2 隐含参数值和根据实际情况调整后的参数值作了对比，发现调整后的 SiB2 参数能够准确地模拟出地表能量收支的日变化。内蒙古锡林浩特典型草原的参数由实测和经验估计得到。根据 SiB2 植被类型的划分，该植被类型属于类型 6 (Sellers

et al., 1996b)，即短草草原。土壤类型属于类型 2 (Sellers et al., 1996b)，即砂土。

根据测量数据，短草的顶部和底部平均高度分别为 0.6 m 和 0.01 m。观测期间的土壤植被叶面积指数约为 0.7 (杜占池等, 2001)。总土层的深度为 1.5 m，3 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 (见表 2)。

3.2 强迫数据

SiB2 模式中共有 6 个强迫变量，分别为向下短波辐射、向下长波辐射、水汽压、气温、观测高度上的风速和降水量。选取的时段 (即 7 月 1 日至 9 月 30 日) 为典型草原的生长期 (Hao et al., 2007)。图 2 为野外实验基地的 6 个气象强迫变量的时间序列。这一时期向下短波辐射的最大值 (平均值) 为 $1102.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($239.18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)，

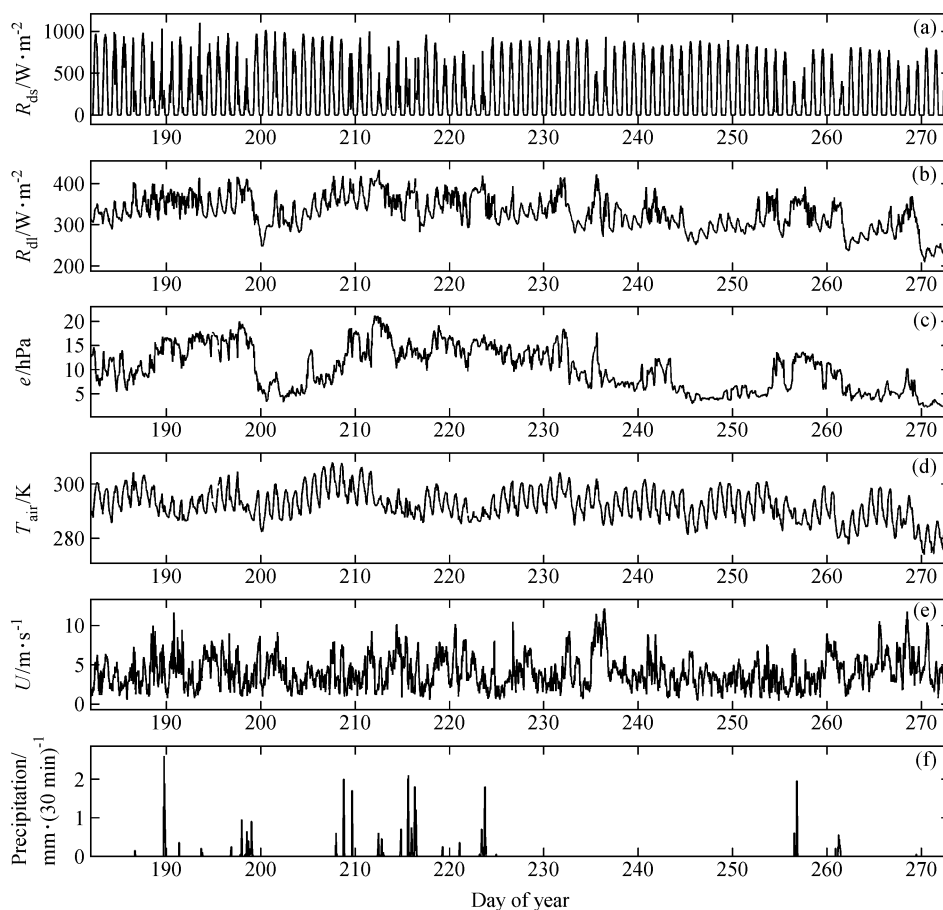


图 2 SiB2 气象强迫变量 2007 年的时间序列：(a) 向下的短波辐射 (R_{ds})；(b) 向下的长波辐射 (R_{dl})；(c) 水汽压 (e)；(d) 空气温度 (T_{air})；(e) 水平风速 (U)；(f) 降水量

Fig. 2 Temporal variations of the atmospheric forcing quantities of 2007 used by SiB2: (a) Short-wave downward radiation (R_{ds}); (b) long-wave downward radiation (R_{dl}); (c) vapor pressure (e); (d) air temperature (T_{air}); (e) horizontal wind speed (U); (f) precipitation

表 2 调整后的 SiB2 参数设置
Table 2 Modified parameters used in SiB2

名称	参数说明	值
Z_2	冠层顶高度	0.6 m
Z_1	冠层底高度	0.01 m
V	冠层覆盖比	0.6
D_r	根深	0.8 m
s_6	半阻碍温度参数	328 K
L_T	冠层总叶面指数	0.7 m
N	绿色冠层比	0.8
z_0	冠层粗糙度长度	0.016 m
D	冠层零平面位移	0.4 m
C_1	总体边界层阻抗系数	$7.0 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$
C_2	土壤和植被层之间的阻抗系数	230

向下长波辐射的最大值（平均值）为 $433.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($327.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。参考高度（4.0 m）的水汽压、气温和风速的平均值分别为 10.05 hPa、292.13 K 和 $3.98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6 个气象强迫变量中向下的短波辐射和气温都表现出明显的日变化，其

他变量则表现出弱的日变化特征。在我们的对比分析中，降水期间的资料将会排除。

3.3 初始化

SiB2 模式中有 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、冠层空间温度、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。这些初值都是根据观测值设定的，具体见表 3。

表 3 SiB2 初始化参数设置
Table 3 Initial parameter values used in SiB2

参数	初始值
冠层温度	285 K
地表温度	285 K
土壤深层温度	287 K
冠层空间温度	285 K
观测高度气温	285 K
表层土壤湿度	0.35
根区土壤湿度	0.30
深层土壤湿度	0.50

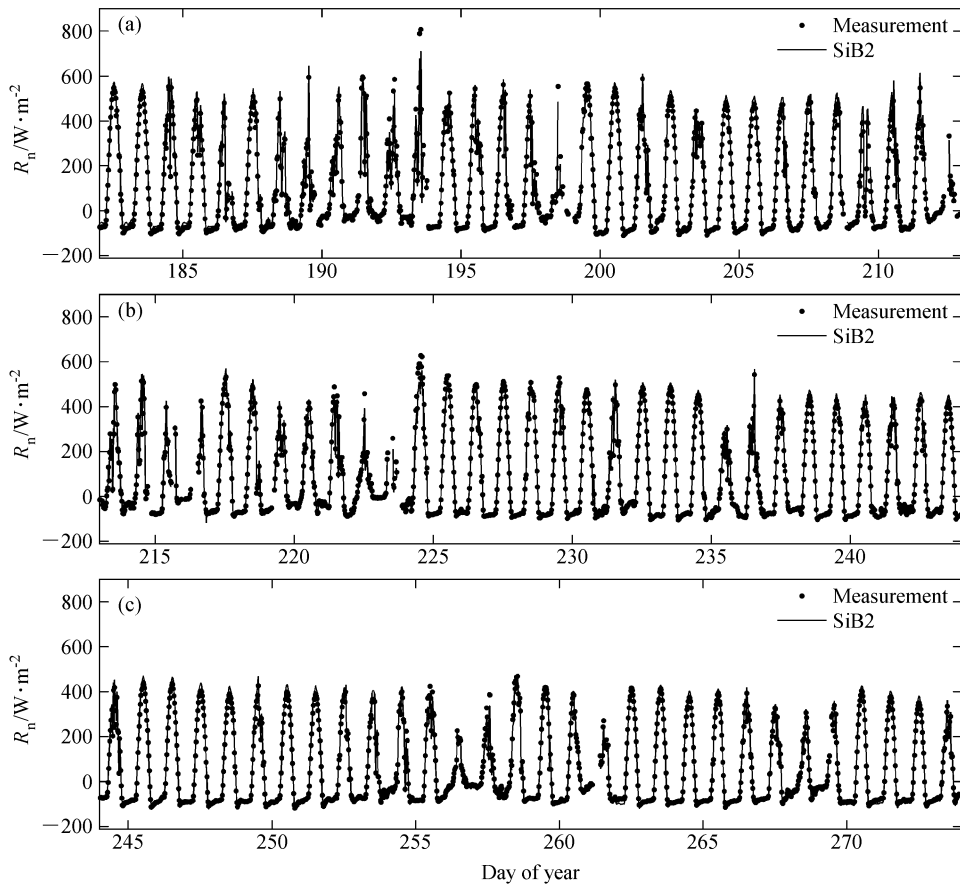


图 3 SiB2 模拟与实地观测净辐射 (R_n) 的变化: (a) 第 182~212 天; (b) 第 213~243 天; (c) 第 244~273 天

Fig. 3 Variations of the net radiation (R_n) measured and modeled by SiB2: (a) days 182–212; (b) days 213–243; (c) days 244–273

4 结果与讨论

选定 7~9 月为模拟周期, 其中剔除了降水期间的资料。同时根据 Gao et al. (2004) 提出的: 当辐射与能量平衡分量小于 $-100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 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。在本节分析湍流量感热和潜热资料时, 主要分析其值大于 $-100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的情况。

4.1 辐射平衡分量

4.1.1 净辐射

由公式 (5) 可知, 净辐射由 4 个辐射分量计算得到。由图 3 可见, 在典型草原生长旺盛期, 模拟的冠层平均净辐射在白天 (夜间) 为 $235.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($-65.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 测量值为 $228.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($-63.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。净辐射在 $-100 \sim$

$800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间变化, 由于夜间地面不断向近地层大气发射长波辐射, 因此夜间净辐射为负值。净辐射的日变化特征非常明显, 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。净辐射被高估 1.1%, 相关系数为 0.99。

4.1.2 地面向上长波辐射

地面向上长波辐射 (R_{ol}) 可以表示为:

$$R_{ol} = \epsilon \sigma T_0^4, \quad (6)$$

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。由公式 (6) 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向上长波辐射的强弱。由图 4 可以看出, 地面向上长波辐射的日变化明显, 大致范围为 $300 \sim 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 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

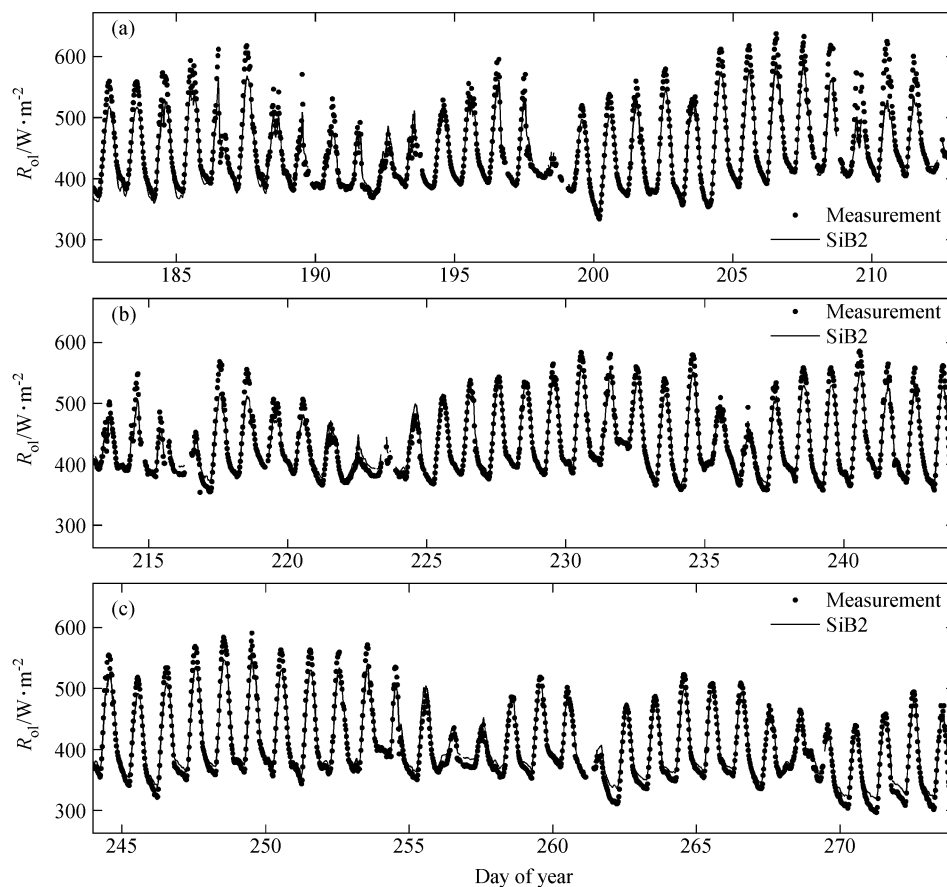


图 4 同图 3, 但为向上的长波辐射 (R_{ol})

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the upward long-wave radiation (R_{ol})

化幅度不大, 为 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 相对于太阳向下短波辐射, 变化幅度不到 7%。白天模拟的向上长波辐射平均比观测值低 1%, 与此同时夜晚向上的长波辐射被高估 0.03%。出现此原因可能与水汽有关, 在降水期间高低估现象明显, 晴好天气向上的长波辐射模拟与实测有很好的 consistency。向上长波辐射白天低估 1%, 夜晚高估 0.03%, 相关系数为 0.98。

4.1.3 地面向上短波辐射

野外实验基地下垫面为半干旱温带大陆性典型草原, 地面向上短波辐射有明显的日变化规律, 同时受天气情况影响较大, 在多云和阴雨天气时, 向上的短波辐射日变化较弱, 白天最大值与晴天最大值相差约 $30 \sim 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于晚上没有向下的短波辐射, 致使地面向上短波辐射为 0, 而日出以后, 地面向上短波辐射开始提升。图 5 很好

地显示出 7~9 月草原生长期的不同阶段: 7 月和 8 月向上的短波辐射白天峰值超过 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 为草原生长期的鼎盛期; 9 月该峰值逐渐减小到 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下, 为草原的生长后期 (Hao et al., 2007)。平均而言, 向上短波辐射被低估 1.7%, 相关系数达到 0.99 (见图 6c)。

4.2 能量平衡分量和 CO_2 通量

从图 7 和图 8 可看出, 感热通量和潜热通量日变化明显, 感热通量占总体能量分配的主导, 其变化范围在 $-50 \sim 350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。潜热通量在草原生长旺盛期 (7 月和 8 月) 峰值达到 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 在生长后期 (9 月) 潜热通量范围为 $0 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 由于土壤处于半干旱状态, 潜热通量的大小受降水影响极其敏感, 峰值可达 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于该野外观测试验基地缺少降水资料的观测, 同时考虑到 SiB2 模式强迫数据的需要, 采用的降水资料

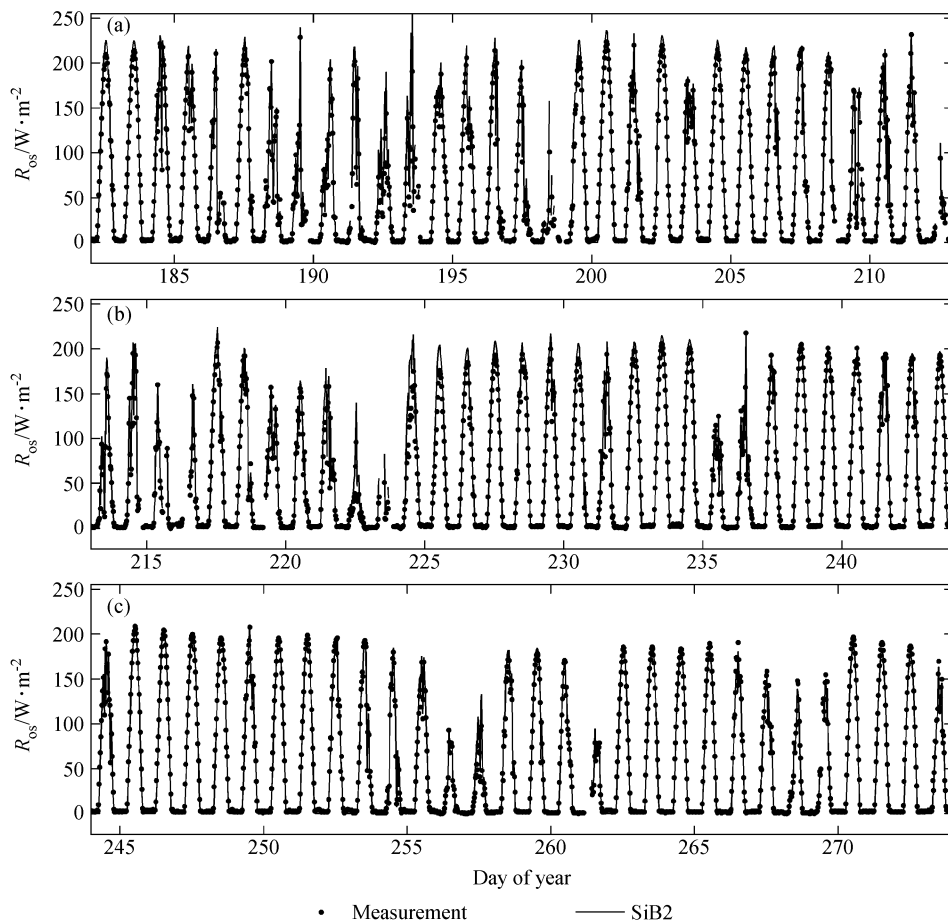


图 5 同图 3, 但为向上的短波辐射 (R_{0s})

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the upward short-wave radiation (R_{0s})

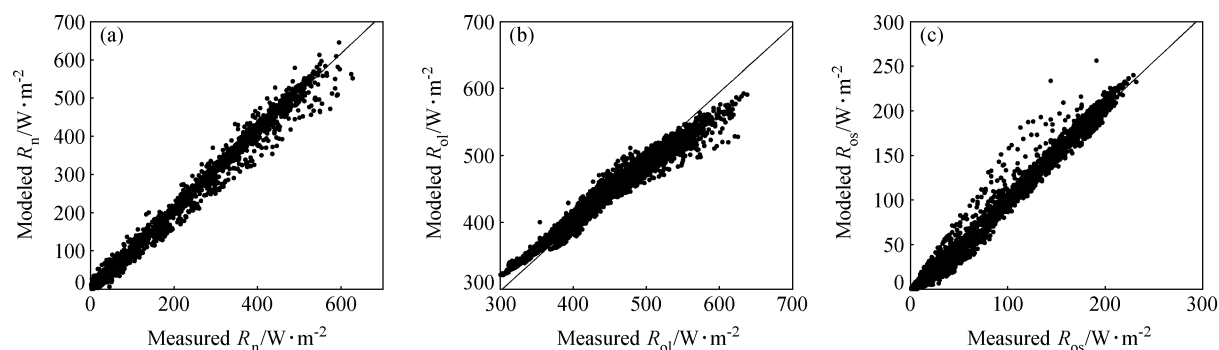


图 6 SiB2 模拟与实地观测 (a) 净辐射 (R_n)、(b) 向上的长波辐射 (R_{ol}) 和 (c) 向上的短波辐射 (R_{os}) 散点分布

Fig. 6 Scatterplots of (a) net radiation (R_n), (b) upward long-wave radiation (R_{ol}), and (c) upward short-wave radiation (R_{os}) measured and modeled by SiB2

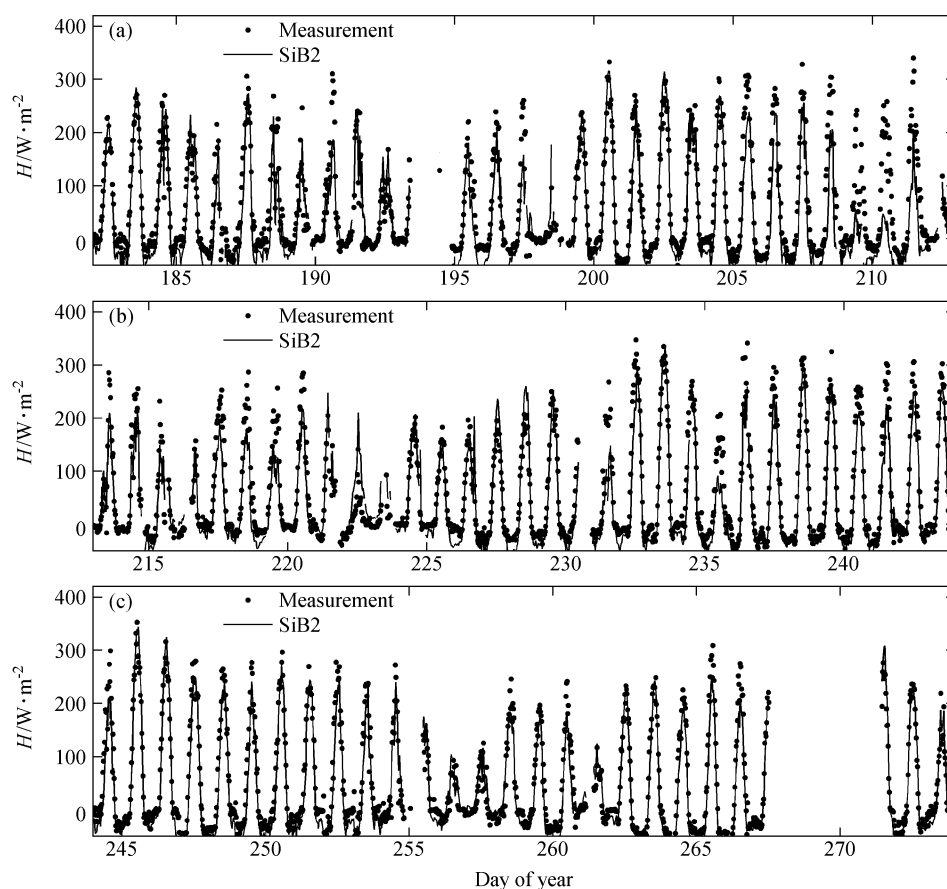


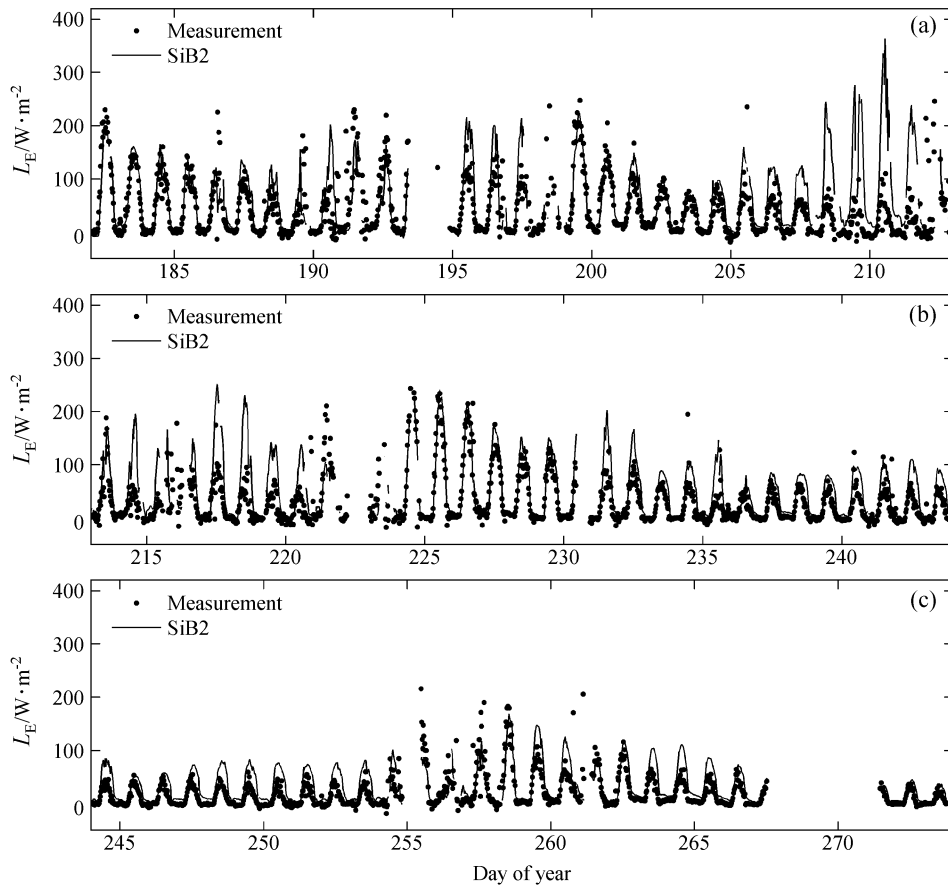
图 7 同图 3，但为感热通量 (H)

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for the sensible heat flux (H)

是距该野外观测试验基地 24.6 km 的锡林浩特国家气候观测台的数据，所以在一些时间段模拟出来的潜热通量与实际观测有些不一致，如 7 月下旬和 8 月初。但对于 7 月初、8 月中旬和 9 月中旬所出现的大范围降水时段，该模式模拟的潜热通

量较好。8 月底至 9 月底潜热通量模拟的结果普遍高估 10%，主要是因为草原受到季节变化的影响，土壤植被有所改变，而模式模拟期间的参数（如植被覆盖率、叶面积指数等）没有改变。

地表和浅层土壤热通量由许多因素决定，包

图8 同图3, 但为潜热通量 (L_E)Fig. 8 Same as Fig. 3, but for the latent heat flux (L_E)

括太阳辐射、土壤成分、土壤含水量和植被覆盖等。图9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(8月和9月)。由于仪器的安装使得土壤植被被破坏, 导致7月土壤热通量的观测不能真实反映出原来的土壤和植被的状况。8月初植被恢复, 土壤热通量和观测资料有很好的-致性, 相关系数达到0.86。8月和9月的模拟和测量峰值分别为 $210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $205 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

总体上看, SiB2 模拟和测量的感热通量、潜热通量和土壤热量通量日变化趋势一致, 相关系数分别为0.94、0.73和0.86。模拟的感热通量、潜热通量和土壤热量通量相对于直接测量值的分布见图10, SiB2 低估感热通量6%, 分别高估潜热通量和土壤热量通量约10%和5%。

图11表示直接测量和SiB2模拟得到的 CO_2 通量的时间序列。7月和8月SiB2模拟和测量的

CO_2 通量日变化趋势一致, 白天植被通过光合作用吸收 CO_2 , 表现出为负值, 最大峰值为 $-0.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。夜晚植被呼吸作用释放 CO_2 , 表现为正值。9月模拟的 CO_2 通量低估了14.2%。

4.3 地表有效辐射温度和土壤湿度

当向上长波辐射已知, 地表有效辐射温度 (T_{eff}) 可由公式(6)计算得到。图12显示SiB2模拟和由测量向上的长波辐射计算得到地表有效辐射温度的时间序列, 可以看出SiB2很好地模拟了地表有效辐射温度, 其模拟值与观测值日变化有较好的一致性。图13为模拟值与观测值的比较图, 发现模式模拟的地表有效辐射温度白天低估6%, 夜晚高估1%, 其相关系数达到0.98。

图14a显示了在0~0.1 m表层、0.1~1.0 m中层和1.0~1.8 m深层上直接测量和由SiB2在土壤表层(0~0.02 m)、根区(0.02~0.60 m)

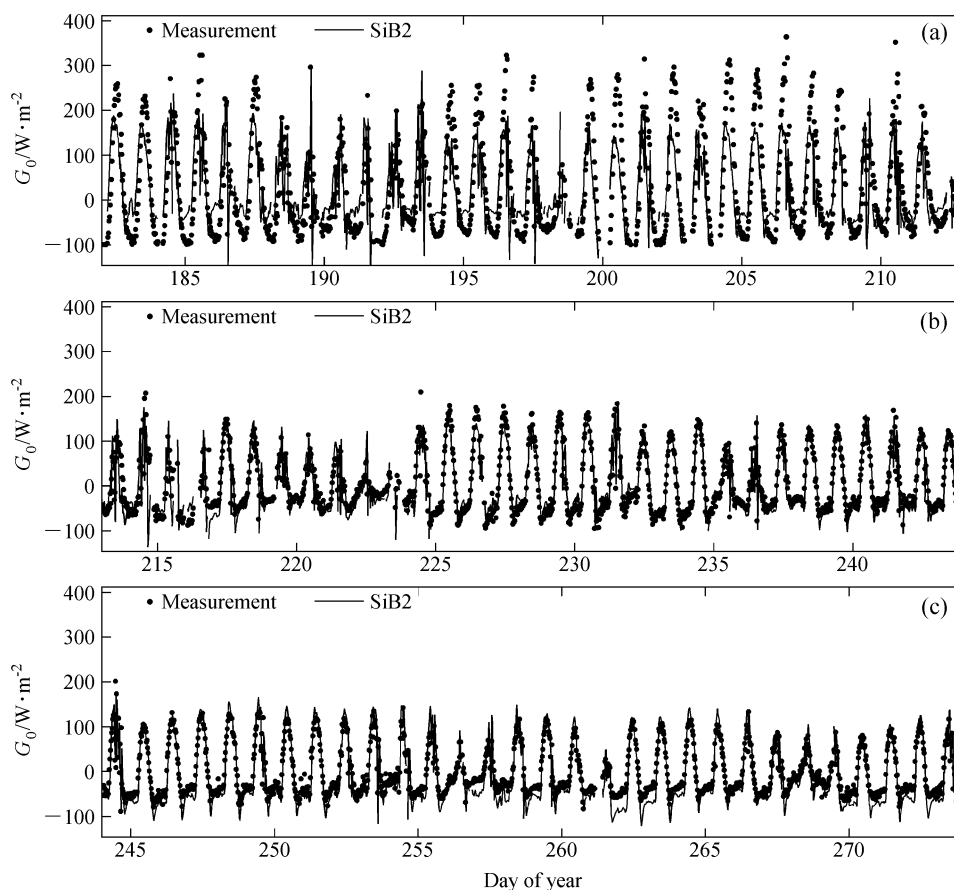


图 9 同图 3，但为土壤热量通量 (G_0)

Fig. 9 Same as Fig. 3, but for the soil heat flux (G_0)

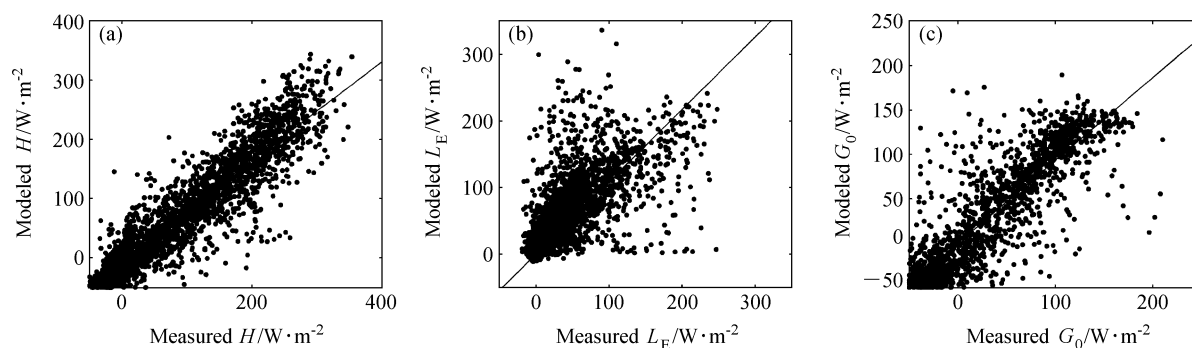


图 10 SiB2 模拟与实地观测 (a) 感热通量 (H)、(b) 潜热通量 (L_E) 和 (c) 土壤热量通量 (G_0) 的散点分布

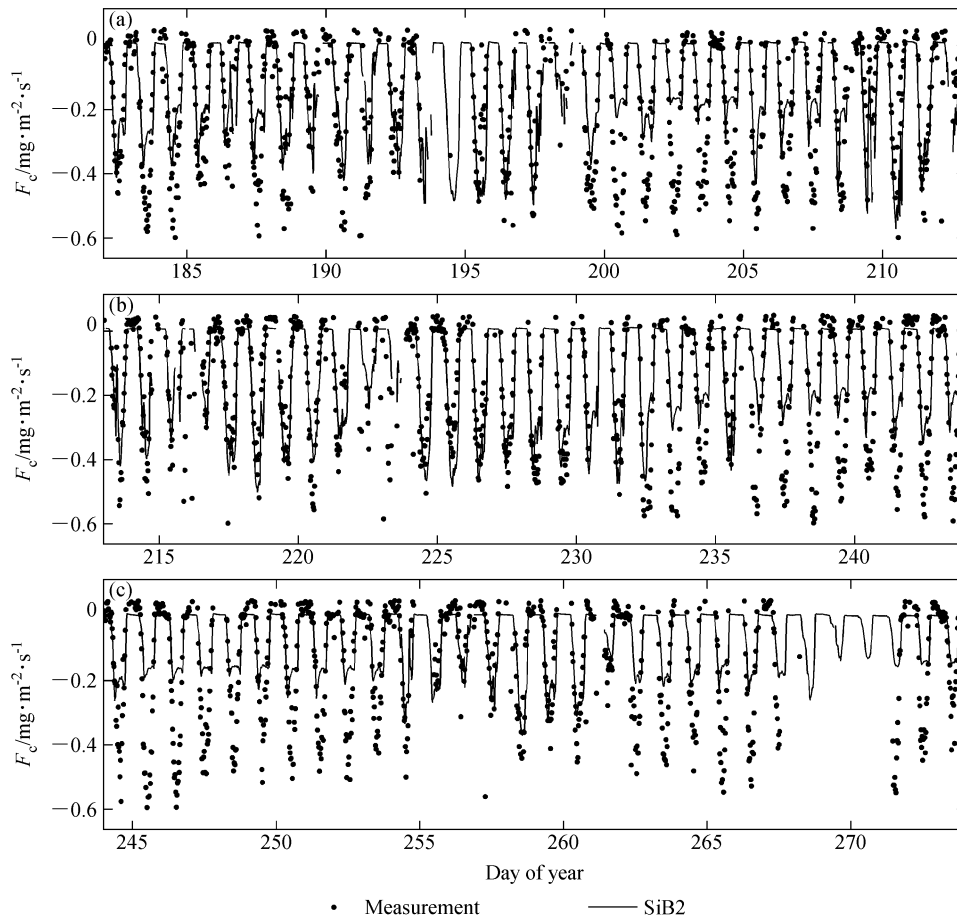
Fig. 10 Scatterplots of (a) sensible heat flux (H), (b) latent heat flux (L_E), and (c) soil heat flux (G_0) measured and modeled by SiB2

和补给区 (0.60~1.5 m) 3 层模拟出的土壤湿度的时间序列，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) 由于降水量少，土壤本身处于半干旱状态，每次降水过程反应最敏感的为表层 (0~0.02 m)，而根区部分的土壤水分变化

不大；4) SiB2 模拟的土壤表层、根区和补给区的平均湿度分别为 0.42、0.34 和 0.43，而测量的平均湿度为 0.4。

4.4 统计分析

根据如下 3 个计算公式 (Colello et al., 1998) 进行观测值和模拟值的统计分析：

图 11 同图 3, 但为 CO₂ 通量 (F_c)Fig. 11 Same as Fig. 3, but for the CO₂ flux (F_c)

$$B_{\text{ias}} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i - O_i}{n}, \quad (7)$$

$$S_{\text{EE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n-2}}, \quad (8)$$

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

其中, M_i 为模式模拟值, O_i 为实际测量值, B_{ias} 为偏差; n 是数据点的总数, 为 2371; S_{EE} 是估计值的标准误差; N_{ESS} 是标准化的 S_{EE} 。

对净辐射、向上长短波辐射、感热通量、潜热通量、土壤热量通量、CO₂ 通量、地表有效辐射温度和土壤湿度按公式 (7) — (9) 进行了统计分析 (见表 4)。

表 4 SiB2 模拟和观测的各物理量的偏差、标准误差和归一化标准误差统计分析

Table 4 Bias, standard error, and normalized standard error of the physical quantities modeled by SiB2 and measurement

	偏差 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	标准误差 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	归一化标准误差
净辐射 R_n	0.94	14.30	0.07
向上长波辐射 R_{ol}	0.08	13.11	0.03
向上短波辐射 R_{os}	-0.98	7.66	0.08
感热通量 H	-17.99	31.52	0.27
潜热通量 L_E	15.83	33.51	0.71
土壤热量通量 G_0	-5.69	31.40	0.49
CO ₂ 通量 F_c	0.02	1.43	0.50
地表有效辐射温度 T_{eff}	0.19	2.13	0.0073
土壤湿度 W	-0.036	0.05	0.19

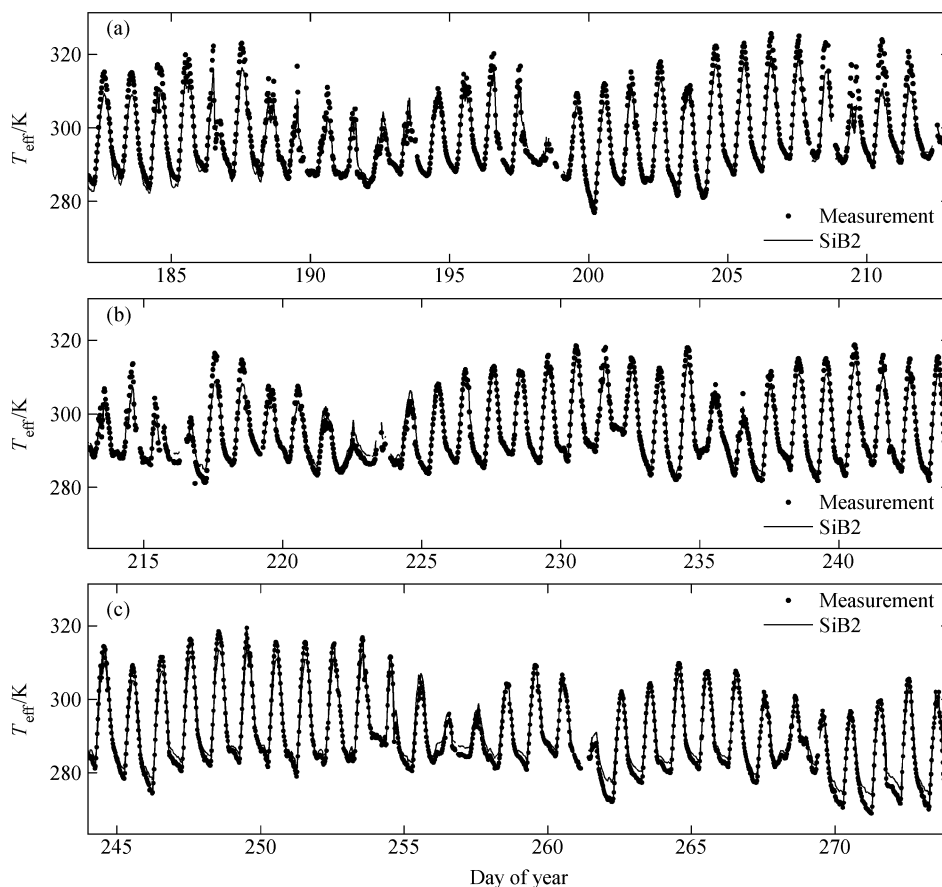


图 12 同图 3，但为地表有效辐射温度 (T_{eff})

Fig. 12 Same as Fig. 3, but for the surface effective radiative temperature (T_{eff})

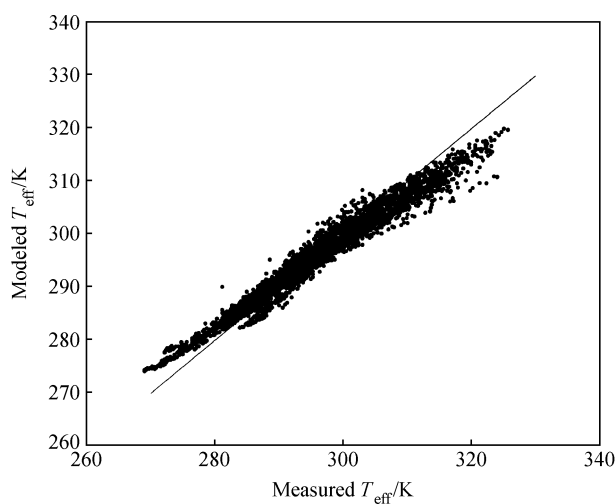


图 13 SiB2 模拟与实地观测地表有效辐射温度 (T_{eff}) 的散点分布

Fig. 13 Scatterplot of surface effective radiative temperature (T_{eff}) measured and modeled by SiB2

5 结论

本文利用 SiB2 模拟了锡林浩特国家气候观象台 2007 年 7 月 1 日至 9 月 30 日期间的净辐射、感热通量和潜热通量、土壤热通量和 CO_2 通量，将模拟结果同实测数据进行了对比，进一步检验了 SiB2 对半干旱温带大陆性典型草原地表能量分配的模拟能力，得到以下主要结论：

(1) SiB2 模拟的净辐射与测量值比较，高估了 1.1%，相关系数为 0.99。地面向上的长波辐射白天低估 1%，夜晚高估 0.03%，相关系数为 0.98。地面向上的短波辐射被低估了 1.7%，相关系数达到 0.99。SiB2 模拟和测量的感热通量、潜热通量和土壤热量通量时间变化一致，相关系数分别为 0.94、0.73 和 0.86。SiB2 低估感热通量 6%，分别高估潜热通量和土壤热量通量约 10%

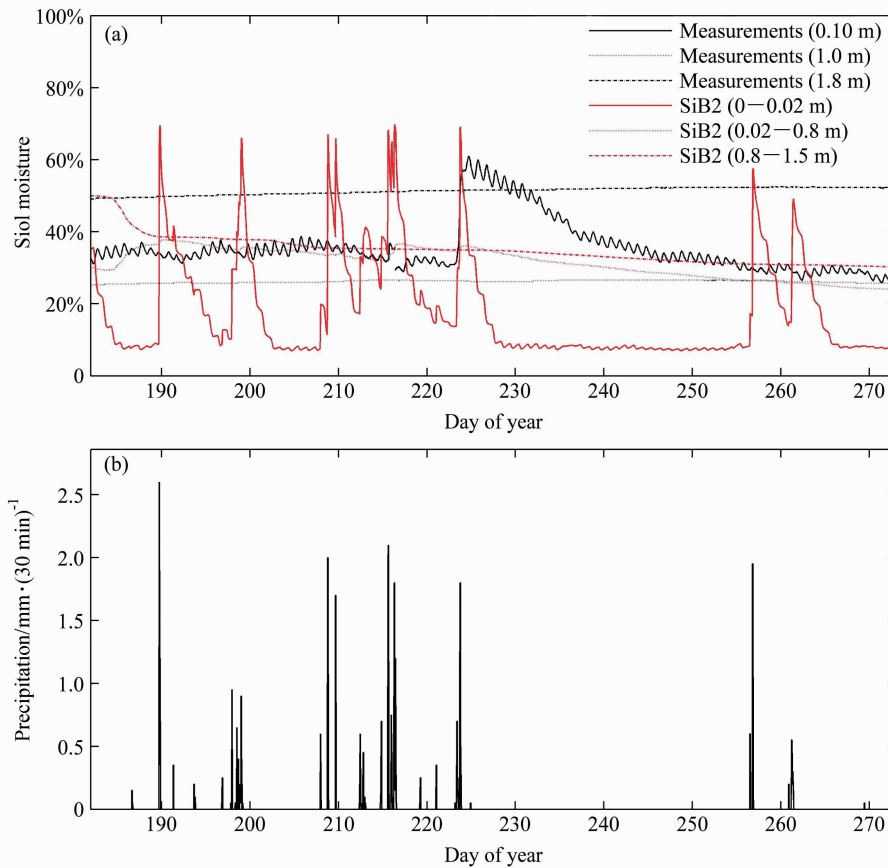


图 14 SiB2 模拟的 (a) 3 层土壤湿度和 (b) 降水时间序列与实地观测的变化

Fig. 14 Variations of (a) the soil moisture for the three layers and (b) the precipitation measured and modeled by SiB2

和 5%。

(2) 感热通量占总体能量分配的主导, 其变化范围在 $-50 \sim 350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。潜热通量在草原生长旺盛期 (7 月和 8 月) 峰值达到 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 在生长后期 (9 月) 潜热通量范围为 $0 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于土壤处于半干旱状态, 潜热通量的大小受降水影响极其敏感, 峰值可达 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。8 月底至 9 月底潜热通量模拟的结果普遍高估 10%, 造成这种结果的主要原因是由于季节的变化, 草原植被有所改变, 而模式模拟期间随时间变化的参数 (如植被覆盖率、叶面积指数等) 并没有改变。

(3) 由于仪器的安装使得土壤植被被破坏导致 7 月土壤热通量的观测不能真实反映出原来的土壤和植被的状况。8 月初植被恢复, 土壤热通量和观测资料有很好的一致性, 相关系数达到 0.86。

(4) CO_2 通量 7 月和 8 月的模拟结果与原始观测数据有较好的一致性, 但 9 月未能很好地模拟

出来, 其原因将进一步研究讨论。

(5) 模拟结果和观测数据对比分析, SiB2 模拟的地表温度白天 (夜间) 低估 (高估)。然而, SiB2 模拟的土壤湿度比较合理。

致谢 感谢锡林浩特国家气候观象台野外试验基地的人员在微气象观测中付出的艰苦努力。

参考文献 (References)

- Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, et al. 1990. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial maximum to the present [J]. *Nature*, 348: 711-714.
- Bounoua L, Defries R, Collatz G J, et al. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate [J]. *Climatic Change*, 52: 29-64.
- 陈佐忠, 汪诗平, 王艳芬. 2003. 内蒙古典型草原生态系统定位研究最新进展 [J]. *植物学通报*, 20 (4): 423-429. Chen Zuozhong, Wang Shiping, Wang Yanfen. 2003. Update progress on grassland ecosystem research in Inner Mongolia steppe [J].

- Chinese Bull of Botany (in Chinese), 20 (4): 423–429.
- Chen B, Chao W C, Liu X. 2003. Enhanced climatic warming in the Tibetan Plateau due to doubling CO₂: A model study [J]. *Climate Dyn.*, 20: 401–413.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569–582.
- Chen S, Chen J, Lin G, et al. 2009. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 146: 57–69.
- 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: 1141–1169.
- Collatz G J, Bounoua L, Los S O, et al. 2000. A mechanism for the influence of vegetation on the response of the diurnal temperature range to changing climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 3381–3384.
- 杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 2001. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究 [J]. *中国草地*, 23 (5): 13–18.
- Du Zhanchi, Yang Zonggui, Cui Xiaoyong. 2001. A comparative study on leaf area index of five plant communities in typical steppe [J]. *Grassland China (in Chinese)*, 23 (5): 13–18.
- Defries R S, Bounoua L, Collatz G J. 2002. Human modification of the landscape and surface climate in the next fifty years [J]. *Global Change Biology*, 8: 438–458.
- Desai A R, Noormets A N, Bolstad P V, et al. 2008. Influence of vegetation and surface forcing on carbon dioxide fluxes across the Upper Midwest, USA: Implications for regional scaling [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 148: 288–308.
- Dickinson R E, Hendersin-Sellers A, Rosenzweig C, et al. 1991. Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models, a review [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 54: 373–388.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 22–29.
- Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 22–29.
- 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: 1–11.
- Gao Z, Lenschow D H, He Z, et al. 2009. Seasonal and diurnal variations in moisture, heat and CO₂ fluxes over a typical steppe prairie in Inner Mongolia, China [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 987–998.
- Hao Y, Wang Y, Huang X, et al. 2007. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 146: 57–69.
- Hao Y, Wang Y, Mei X, et al. 2008. CO₂, H₂O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year [J]. *Acta Oecologica*, 33: 133–143.
- Hong J, Kim J. 2008. Simulation of surface radiation balance on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08814, doi: 10.1029/2008GL033613.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. *Atmospheric Boundary Flows, Their Structure and Measurement* [M]. New York: Oxford University Press, 289pp.
- Ketzer B, Liu H, Bernhofer C. 2008. Surface characteristics of grasslands in Inner Mongolia as detected by micrometeorological measurements [J]. *Int. J. Biometeor.*, 52: 563–574.
- 刘少锋, 林朝晖. 2005. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 684–699.
- Liu Shaofeng, Lin Zhaohui. 2005. Validation of common land model using field experiment data over typical land cover types in East Asia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (3): 684–699.
- Martano P. 2000. Estimation of surface roughness length and displacement height from single-level sonic anemometer data [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 39: 708–715.
- Miao H, Chen S, Chen J, et al. 2009. Cultivation and grazing altered evapotranspiration and dynamics in Inner Mongolia steppes [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 146: 57–69.
- Prihodko L, Denning A S, Hanan N P, et al. 2008. Sensitivity, uncertainty and time dependence of parameters in a complex land surface model [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 148: 268–287.
- Rowntree P R. 1991. *Atmospheric parameterization schemes for evaporation over land: Basic concepts and climate modeling aspects* [M] // Schumge T J, Andre J C. *Land Surface Evaporation. Measurement and Parameterization*. New York: Springer–Verlag, 5–29.
- Schmid H P. 1994. Source areas for scalars and scalar fluxes [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 67: 293–318.
- 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.
- Sridhar V, Elliott R L, Chen F, et al. 2002. Validation of the NOAH-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), 4418, doi: 10.1029/2001JD001306.
- 涂钢, 刘辉志, 董文杰, 等. 2006. 半干旱区退化草原地表能量收

- 支 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 723 - 731. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie, et al. 2006. The near surface layer energy budget on degraded-grassland in semi-arid at Tongyu in Jilin Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 723 - 731.
- Van Wijk W R. 1963. Physics of Plant Environment [M]. North Holland: Amsterdam, 235pp.
- 张新时, 周广胜. 1997. 全球变化研究中的中国东北森林——草原陆地样带 (NECT) [J]. 地学前缘, Z1: 149 - 155. Zhang Xinshi, Zhou Guangsheng. 1997. Norhteast China Transect (NECT) for global change studies [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), Z1: 149 - 155.
- Zhang C, Dazlich D A, Randall D A, et al. 1996. Calculation of the global land surface energy, water and CO₂ fluxes with an off-line version of SiB2 [J]. J. Geophys. Res., 101 (D14), 19: 61 - 75.
- 朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 2002. 内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算 [J]. 气候与环境研究, 7 (3): 351 - 358. Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Zhang Renhua, et al. 2002. The estimate of energy and mass exchanges in Inner Mongolia semi-arid grassland using micrometeorological methods [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (3): 351 - 358.