

张晓惠, 高志球, 魏东平. 2012. 简单生物圈模式 (SiB2) 中湍流能量通量对近地层两类阻抗系数的敏感性研究 [J]. 大气科学, 36 (5): 1053–1062, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11216. Zhang Xiaohui, Gao Zhiqiu, Wei Dongping. 2012. Sensitivity of surface energy fluxes to two resistance coefficients in simple biosphere model (SiB2) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1053–1062.

简单生物圈模式 (SiB2) 中湍流能量通量对近地层 两类阻抗系数的敏感性研究

张晓惠^{1, 2, 3} 高志球^{3, 4, 5} 魏东平^{1, 2}

1 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049

2 中国科学院计算地球动力学实验室, 北京 100049

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

4 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

5 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

摘 要 陆—气之间的能量交换是通过近地层湍流热量和水汽通量来实现的。以往的研究表明近地层阻抗对湍流能量通量有着不同程度的影响, 但是关于陆面模式中阻抗系数的取值范围却始终没有统一的标准。为了深入了解简单生物圈模式 (SiB2) 中近地层阻抗系数取值变化对湍流能量通量的影响, 我们以那曲站为例, 分别采用传统的逐个因子分析法和考虑参数间相互作用的部分因子分析法定量地研究了夏季该观测站近地层湍流能量通量分别对冠层阻抗系数 C_1 和地表阻抗系数 C_2 的敏感性响应。结果表明, 感热通量对地表阻抗系数 C_2 更为敏感, 而潜热通量则对冠层阻抗系数 C_1 较为敏感; 感热通量随 C_1 增加而增大, 随 C_2 增加而减小, 而潜热通量则随 C_1 或 C_2 的增加而减小; 不管是感热通量还是潜热通量, 它们对阻抗系数的敏感度随阻抗系数的增大而减小, 而对阻抗系数的相对敏感度则随阻抗系数的增大而增大。最后, 结合那曲站夏季下垫面稀疏短草的分布特点分析了造成感热通量和潜热通量敏感变化各异的原因。

关键词 感热通量 潜热通量 阻抗系数 陆面过程 简单生物圈模式 (SiB2) 敏感性

文章编号 1006-9895(2012)05-1053-10

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11216

Sensitivity of Surface Energy Fluxes to Two Resistance Coefficients in Simple Biosphere Model (SiB2)

ZHANG Xiaohui^{1, 2, 3}, GAO Zhiqiu^{3, 4, 5}, and WEI Dongping^{1, 2}

1 College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

2 Key Laboratory of Computational Geodynamic, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049

3 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029

4 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing 210044

5 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, NUIST, Nanjing 210044

Abstract Surface energy fluxes play a significant role in land–air interaction. To quantify the influence of resistance coefficients on surface energy fluxes in the Simple Biosphere Model (SiB2), the sensitivities of sensible heat flux (H) and

收稿日期 2011-11-08, 2012-03-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40874047、40975009, 国家重点基础研究发展项目 2012CB417203

作者简介 张晓惠, 女, 1981 年出生, 博士研究生, 从事陆—气相互作用的研究。E-mail: gloria.gucas@gmail.com

latent heat flux (LE) to resistance coefficients are examined by using the one-factor-at-a-time method and fractional factorial analysis method. The results show that, i) H is more sensitive to C_2 (called ground to canopy air-space resistance coefficient) while LE is more sensitive to C_1 (named bulk canopy boundary-layer resistance coefficient); ii) H increases with increasing C_1 and decreases with increasing C_2 , while LE always decreases with increasing C_1 or increasing C_2 ; and iii) the sensitivities of both H and LE decrease with increasing coefficients and their relative sensitivities increase with increasing coefficients. Furthermore, the reasonable explanation about the sensitivity of H and LE are given considering the distribution of land cover and vegetation in Nagqu.

Key words sensible heat flux, latent heat flux, resistance coefficient, land surface process, Simple Biosphere Model (SiB2), sensitivity

1 引言

陆面过程是描述大气边界层与陆地下垫面之间湍流能量与物质(水分和 CO_2)交换的物理、生物和化学过程,而陆面模式则是描述这一系列陆气相互作用的数值模型。自从Deardorff(1978)提出土壤—植被在陆面过程中具有重要作用以来,利用陆面参数化方案,如生物圈—大气圈传输方案BATS(Dickinson et al., 1986)、大气—植被—土壤耦合模型CAPS(Chang and Ek, 1996)、陆气地表参数化方案LAPS(Mihailović and Kallos, 1997)、土壤—植被—大气传输方案SVAT(Franks et al., 1997)等,对地表湍流能量通量进行敏感性研究越来越受到重视。有研究表明,地表粗糙度(Sud et al., 1988; Jacobs and De Bruin, 1992)、地表反照率(Wilson et al., 1987; 房云龙等, 2010)、植被覆盖率(Jacquemin and Noilhan, 1990; 薛永康等, 1998)、叶面积指数(Collins and Avissar, 1994)、大气和土壤湿度(Dirmeyer et al., 2000; 林朝晖等, 2001)、土壤覆盖、类型和物性(季劲钧和胡玉春, 1989; Kato et al., 2007)、生物物理参数(Pitman, 1994; Alton et al., 2007)以及土壤垂直分辨率(De Rosnay et al., 2000)都对陆地与大气边界层之间湍流能量通量有着不同程度的影响。

除此之外,许多研究表明近地层阻抗对湍流能量通量的变化也起着非常重要作用。Jacobs and De Bruin (1992) 在分析表层和边界层反馈作用下蒸腾过程对近地层地表阻抗 r_s 和边界层空气动力学阻抗 r_a 的敏感性时,发现当 r_s 大于临界地表阻抗 $r_{s,\text{crit}}$ 时,蒸腾过程总是随 r_a 增加而增大,当 $r_s < r_{s,\text{crit}}$,那么蒸腾过程随 r_a 增加而减小,当 $r_s \approx r_{s,\text{crit}}$,那么 r_a 的变化几乎难以对潜热通量产生影响。Beljaars and Viterbo (1994) 则通过对Cabauw站能量通量的季节变化分析,得到空气动力学阻抗在冬季的蒸发过

程中起着更为重要的作用。当空气动力学阻抗值很小时,蒸发作用会大到以向下的潜热通量来补充。Chang and Ek (1996) 利用CAPS陆面方案,得到潜热通量随最小植被气孔阻抗的增大而减小,感热通量随最小植被气孔阻抗的增加而增大。Chen et al. (1996) 对四种不同的陆面方案进行能量通量的模拟,发现考虑冠层阻抗的季节变化对陆气相互作用的参数化有着重要作用,冠层阻抗是影响能量通量尤其是潜热通量变化的不可忽视的要素。Sun and Bosilovich (1996) 在边界层对陆面参数的敏感性试验中,得到最小气孔阻抗值的增加引起潜热通量的减小和感热通量的增大,行星边界层湿度的增加。Mihailović and Kallos (1997) 用LAPS方案对裸土站点和植被覆盖站点进行敏感性试验,发现当最小植被气孔阻抗的取值从200 s/m减小到50 s/m时,潜热通量的峰值也随之从196 W/m^2 增加到298 W/m^2 。Qu et al. (1998) 采用PILPS陆面方案对湍流能量通量做敏感性测试时,认为当考虑植被气孔阻抗后,就会减小空气动力学阻抗变化对潜热通量的影响。土壤温度对空气动力学阻抗的敏感进而影响对热量通量的变化。Lenhart et al. (2002) 用两种分析方法设计敏感性试验,发现德国Dillenburg站的蒸腾过程在全年都对最小植被气孔阻抗很敏感。Liang and Guo (2003) 运用部分因子分析法对16种陆面参数进行敏感性分析,得到最小植被气孔阻抗需要在月或更长时间尺度上才表现出更加明显的作用。

因为简单生物圈模式(SiB2)是最具代表性的陆面模式之一(Randall et al., 1996; Sellers et al., 1996a, 1996b),它包括了48个涉及植被、土壤和大气的参数。一直以来,关于该模式中近地层阻抗系数 C_1 (冠层阻抗系数), C_2 (地表阻抗系数)的取值总存在不明确性,给我们的模拟研究带来很大的不确定因素。鉴于阻抗对湍流能量通量产

生重要影响, 本文以1998年夏季青藏高原那曲站试验场资料为例 (见2.1节), 分别采用逐个因子分析法和部分因子分析法来设计敏感性试验 (见2.2节), 定量地分析了SiB2中近地层湍流能量通量对抗阻系数 C_1 和 C_2 的敏感性响应 (见3.1和3.2节)。

2 试验资料和模式、方法介绍

2.1 试验资料和 SiB2 模式

本文所用的试验场资料来自于全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验计划 (GAME/Tibet) (Koike et al., 2003; Choi et al., 2004), 站点选取包括大气和土壤多学科综合观测的那曲站 [$31^{\circ}37'N$, $91^{\circ}90'E$], 海拔4580 m]。模式输入的资料包括从1998年7月15日至9月15日 (间隔0.5小时) 的向下长、短波辐射, 降水, 3.5 m参考高度的风速, 温度, 水汽压。本文SiB2模式控制试验中的初始条件以及参数设置与Gao et al. (2004) 一致, 控制试验中的感热 (H)、潜热通量 (LE , L 为蒸发潜热, E 为蒸散率) 分布图以及与观测资料对比图可参阅Gao et al. (2004) 文中图6、7、9。另外, 观测资料和观测仪器可参阅<http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/tibet/data/iop/pbltower/doc/naqu-fx.txt> [2001-01-10]。

在 SiB2 模式中, 感热通量和潜热通量的表达式分别是

$$H = H_c + H_g = \left[\frac{T_c - T_a}{r_b} + \frac{T_g - T_a}{r_d} \right] \rho c_p, \quad (1)$$

$$LE = LE_c + LE_g = (e^*(T_c) - e_a) \frac{\rho c_p}{\gamma} \left(\frac{1 - W_c}{r_c + 2r_b} + \frac{W_c}{2r_b} \right) + \frac{\rho c_p}{\gamma} \left((h_{soil} e^*(T_g) - e_a) \frac{1 - W_g}{r_{soil} + r_d} + (e^*(T_g) - e_a) \frac{W_g}{r_d} \right), \quad (2)$$

其中, 冠层阻抗 $r_b = C_1 / (u_2)^{1/2}$; 地表阻抗 $r_d = C_2 / u_2$; u_2 表示参考高度的风速 (单位: m/s); H_c , H_g 分别表示冠层感热通量和地表感热通量 (单位: W/m^2); LE_c , LE_g 分别表示冠层潜热通量和地表潜热通量 (单位: W/m^2); T_c , T_a , T_g 分别表示冠层温度、冠层与地表间大气温度以及地表温度 (单位: K); $e^*(T_c)$, e_a , $e^*(T_g)$ 分别表示冠层的饱和水汽压, 冠层与地表间大气水汽压以及地表饱和水汽压 (单位:

Pa); W_c , W_g 分别表示冠层的湿润度和地表的湿润度 (含水量与孔隙度的比值); ρ , c_p 分别表示空气的密度 (单位: kg/m^3) 和比热 (单位: $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); h_{soil} 表示表层土壤孔隙中空气的相对湿度; r_c , r_{soil} 分别表示冠顶空气动力学阻抗 (单位: s/m)、裸土表层阻抗 (单位: s/m)。

值得一提的是, 我们用SiB2模式对那曲站近地层能量通量进行敏感性试验时, 考虑到雨天的通量观测资料误差较大, 其控制试验的结果不能作为敏感性分析的基准, 因此, 本文的敏感性结果都是建立在无降水条件下控制试验的基础上。

2.2 敏感试验的方法介绍

2.2.1 逐个因子分析法

假设某变量 V 是输入变量 $x_1, \dots, x_n$ 的函数:

$$V = f(x_1, \dots, x_n), \quad (3)$$

若变量 $x_1, \dots, x_n$ 均独立于 V , 则有

$$V + \Delta V = f(x_1 + \Delta x_1 + \dots + x_n + \Delta x_n). \quad (4)$$

根据泰勒展式, 忽略高次项, 可得到

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \Delta x_n. \quad (5)$$

根据敏感性的定义 (McCuen, 1974; Saxton, 1975; Beven, 1979), 偏导数 $\partial V / \partial x_i$ 就是变量 V 对独立变量 x_i 的敏感度 $S(x_i)$ 。它表示当输入变量 x_i 每个单位变化会引起的变量 V 变化。由 (3) 式可得敏感度 $S(x_i)$ 的表达式如下

$$S(x_i) = \frac{\partial V}{\partial x_i} = \frac{\Delta V}{\Delta x_i}, \quad (6)$$

其中, $S(x_i)$ 有时会对变量 V 和 x_i 的相对大小比较敏感, 因此, 又引入相对敏感度或敏感系数的概念 $R(x_i)$ (Saxton, 1975), 它表示为 $S(x_i)$ 与 V/x_i 的相除,

$$R(x_i) = \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{x_i}{V}. \quad (7)$$

此时, V 的相对变化可以表示为

$$\frac{\Delta V}{V} = R(x_1) \frac{\Delta x_1}{x_1} + \dots + R(x_n) \frac{\Delta x_n}{x_n}. \quad (8)$$

根据定义式可知, 若 $R(x_i) = 0.35$, 那么 x_i 变化 10% 就会引起 V 变化 3.5%。

在本文里, 我们对冠层阻抗系数 C_1 和地表阻抗系数 C_2 在控制试验的取值基础上分别进行减小 4 个幅度, 增大 12 个幅度的变化, 依次放入 SiB2 模拟, 输出得到感热通量和潜热通量值相应的变化 (详见表 1)。我们对 C_1 和 C_2 作变化的前提是 C_1 和 C_2 必须都大于 0, 即在存在阻抗的情况下作数值敏

感性分析, 因此我们在控制试验的取值基础上只能减小 4 个幅度, 至于增大 12 个幅度的目的是想在增大 4 个幅度的基础上, 在阻抗系数的合理取值范围内看看湍流通量是否还是会继续单调变化或发生拐点。

表 1 控制试验和敏感试验中的 C_1 和 C_2 取值范围

Table 1 Values of C_1 and C_2 in control and sensitive simulations

参数	描述	控制试验中的	敏感试验中的取值
$C_1/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})^{1/2}$	植被冠层的总体阻抗系数	41.52	$C_1(1\pm 10\%), C_1(1\pm 25\%), C_1(1\pm 50\%), C_1(1\pm 75\%), C_1(1+100\%), 125\%, 150\%, 175\%, 200\%, 225\%, 250\%, 275\%)$
C_2	地表至冠层之间的空气动力学阻抗系数	79.82	$C_2(1\pm 10\%), C_2(1\pm 25\%), C_2(1\pm 50\%), C_2(1\pm 75\%), C_2(1+100\%), 125\%, 150\%, 175\%, 200\%, 225\%, 250\%, 275\%)$

至于取值范围是否合理, Jacobs and De Bruin (1992) 敏感试验中空气动力学阻抗取值在 0~200 s/m 范围, Pitman (1994) 和 Mihailović and Kallos (1997) 则把气孔阻抗取值定在 50~200 s/m 以内, Chen et al. (1996) 关于地表阻抗系数的取值为 118, 我们对 C_1 和 C_2 所做的变化得到的阻抗值都在前人文献的研究范围内, 且符合某些地表实际状况, 是合理的。

2.2.2 部分因子分析法

与逐个因子法相比, 部分因子分析法 (Box et al., 1978; Hendersen-Sellers and Henderson-Sellers, 1993; Montgonery, 2008) 不仅考虑单个参数的影响, 而且考虑了参数间相互作用的影响。另外, 在进行多变量对有限个参数的敏感研究时, 部分因子法更有效率并且能将多个参数对输出变量的影响同步得到。

在本文中, 有两个参数 C_1 和 C_2 , 对它们分别进行增大(+) 50%和减小 (-) 50%两个变化趋势, 那么估算 C_1 和 C_2 对感热通量(H 、 H_c 、 H_g)和潜热通量(LE 、 LE_c 、 LE_g)的所有影响 (包括二者相互作用 C_1C_2) 的试验需要运行 4 次(见表 2)。

根据所建立的计算矩阵, 那么任一参数对任一模式响应变量的影响可表示为

$$E_j^k = \frac{\sum_i^N S_{ij} V_i^k}{P}, \quad (9)$$

其中, S_{ij} 表示矩阵第 j 列第 i 行的符号, N 表示试验运行总次数 (本文 N 等于 4), P 表示每列的+号的数目, k 表示模式输出的第 k 个模拟量 (本文中模拟量的总个数为 6)。当 $E_j^k > 0$, 表示模式响应随第 j 列参数增加而增加; 当 $E_j^k < 0$, 表示模式响应随第 j 列参数增加而减小。

表 2 两个参数 C_1 和 C_2 的分次变量分析矩阵

Table 2 Calculation matrix for a full two-level two-parameter fractional analysis

运行序号	参量			模式响应量					
	C_1	C_1	$C_1 C_2$	V^1	V^2	V^3	V^4	V^5	V^6
1	+	-	-	V_1^1	V_1^2	V_1^3	V_1^4	V_1^5	V_1^6
2	-	-	+	V_2^1	V_2^2	V_2^3	V_2^4	V_2^5	V_2^6
3	-	+	-	V_3^1	V_3^2	V_3^3	V_3^4	V_3^5	V_3^6
4	+	+	+	V_4^1	V_4^2	V_4^3	V_4^4	V_4^5	V_4^6

注: 变量 V 的上标 1~6 分别表示对感热通量 H 、潜热通量 LE 、冠层感热通量 H_c 、冠层潜热通量 LE_c 、地表感热通量 H_g 和地表潜热通量 LE_g 的模式响应; 变量 V 的下标 1~4 分别表示第几次的模式运行。

在此基础上, Liang and Guo (2003) 引入了分别反映模式单响应对参数敏感性的指数 (Single Response Effect Index, 简称 SREI) 和模式多响应对参数敏感性的指数 (Multiple Response Effect Index, 简称 MREI), 它们的表达式如下:

$$\text{SREI}_j^k = \frac{|E_j^k|}{E_{cr}^k}, \quad (10)$$

$$\text{MREI}_j = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \text{SREI}_j^k \quad (11)$$

其中, $E_{cr}^k = (1/m) \sum_{i=1}^m |E_i^k|$, m 表示包括相互作用参数在内的参数总个数 (本文 m 为 3), M 表示多响应变量的个数 (本文 M 为 2)。

3 结果分析

3.1 逐个因子分析法的敏感试验结果

关于近地层湍流能量通量 (这里用峰值代表) 对冠层阻抗系数 C_1 值的敏感性是, 当 C_1 增大 (或减小) 时, 感热通量随之发生增加 (或减少) 的响应 (见图 1), 这与 Pitman (1994) 用 BATS 陆面方案, Chang and Ek (1996) 用 CAPS 陆面方案所得的结果一致; 而潜热通量则随 C_1 增大 (或减小) 发生相应的减小 (或增大) 的响应 (见图 2), 这与 Jacobs and De Bruin (1992)、Beljaars and Viterbo

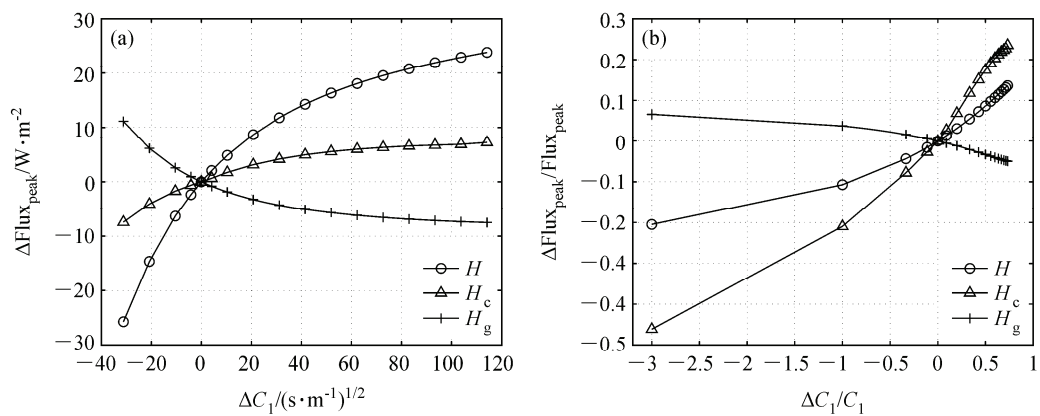


图1 感热通量 (H 、 H_c 、 H_g) 峰值对 C_1 的敏感度 (a) 和相对敏感度 (b)
Fig.1 (a) Sensitivity of H , H_c , or H_g to C_1 and (b) relative sensitivity of them to C_1

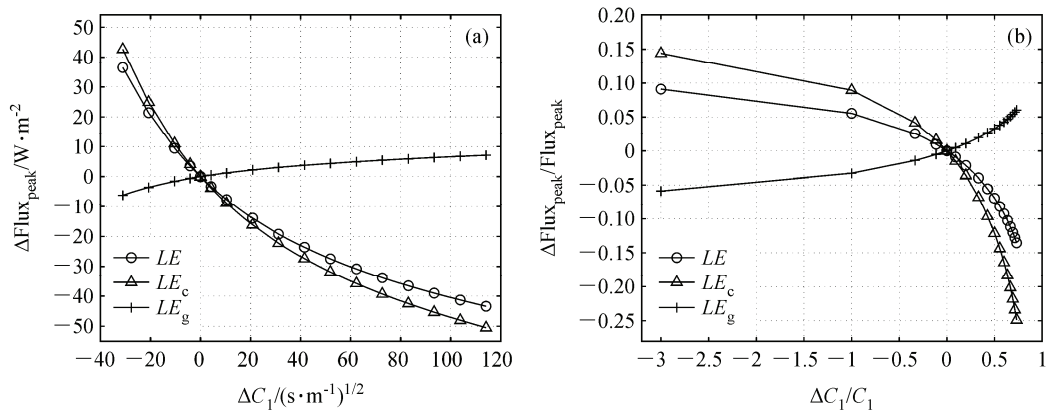
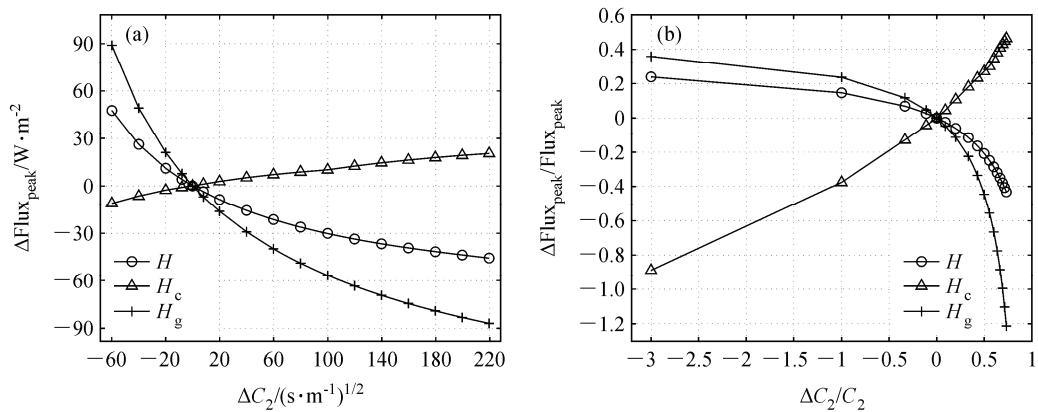
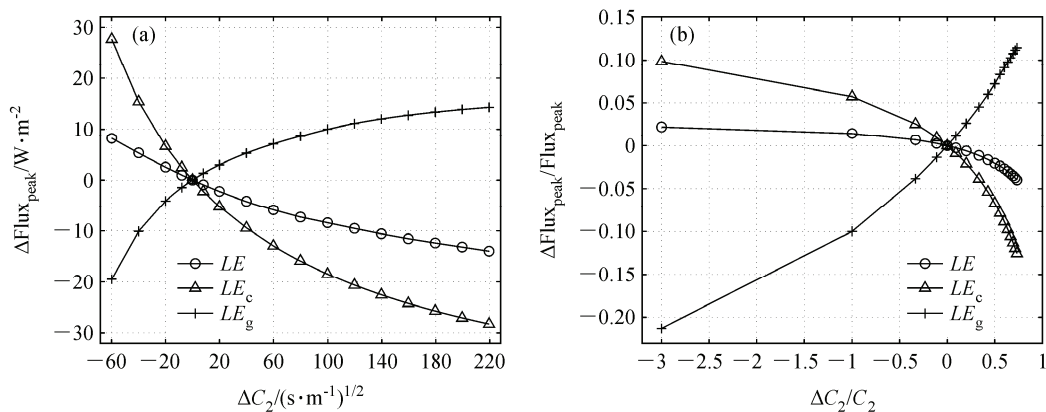
(1994)、Sun and Bosilovich (1996) 以及 Mihailović and Kallos (1997) 的研究结果相吻合。换言之，感热通量对 C_1 变化有正向变化的敏感性，潜热通量对 C_1 变化有反向变化的敏感性。同时，随着 C_1 值的不断增大，感热通量和潜热通量对 C_1 变化的敏感度都是逐渐减小，减小的幅度分别可达到 4 倍和 3 倍；而感热通量和潜热通量对 C_1 相对变化的相对敏感度则逐渐增大，增大的幅度分别可达到 4 倍和 6 倍 (见图 1、2，表 3)。

这是因为，当 C_1 增加时会引起冠层阻抗 r_b 增大，冠层与附近大气的感热通量交换减小，当温度差 ($T_c - T_a$) 的增大变化超过阻抗产生的减小作用

表 3 感热通量 H 、潜热通量 LE 对 C_1 值的敏感度 (S) 和相对敏感度 (R)
Table 3 Sensitivity (S) and relative sensitivity (R) of H or LE to C_1

C_1 值	$S(H)$	$S(LE)$	$R(H)$	$R(LE)$
10.38	0.83	-1.17	0.07	-0.03
20.76	0.71	-1.03	0.11	-0.06
31.14	0.61	-0.91	0.13	-0.08
37.37	0.56	-0.85	0.14	-0.09
41.52	—	—	—	—
45.67	0.50	-0.78	0.15	-0.10
51.90	0.47	-0.73	0.16	-0.11
62.28	0.42	-0.67	0.16	-0.12
72.66	0.38	-0.62	0.17	-0.13
83.04	0.34	-0.57	0.17	-0.14
93.42	0.32	-0.53	0.18	-0.15
103.80	0.29	-0.50	0.18	-0.15
114.18	0.27	-0.47	0.18	-0.16
124.56	0.25	-0.44	0.18	-0.17
134.94	0.23	-0.42	0.18	-0.17
145.32	0.22	-0.40	0.18	-0.18
155.70	0.21	-0.38	0.19	-0.18

时，冠层感热通量 H_c 增加。此时地表感热通量 H_g 对冠层阻抗系数 C_1 的变化不太敏感，近地层感热通量 H 随 C_1 增加而增加 (见图 1a)；另一方面，冠层阻抗 r_b 的增大，冠层的蒸腾过程迅速减小，冠层与附近大气的潜热交换急剧减少，于是 LE_c 随 C_1 增加而大幅减小。此时地表潜热通量 LE_g 变化对 C_1 不敏感，其变化幅度在 $\pm 10 \text{ W/m}^2$ ，但对 LE_c 变化起着一定的补偿作用。由于地表潜热通量 LE_g 的增加变化无法抵消冠层潜热通量 LE_c 的大幅减小变化，于是近地层潜热通量 LE 随 C_1 增加而减小 (图 2a)。至于近地层湍流能量通量对地表阻抗系数 C_2 值的敏感性则是，随着 C_2 的增大 (或减小)，感热通量和潜热通量都分别发生相应的减小 (或增大) 的变化 (见图 3、4)。也就是说，感热通量和潜热通量对 C_2 的变化均为负相应。另外，感热通量和潜热通量对 C_2 变化的敏感度也分别是逐渐减小的，减小幅度分可达到 2.6 倍和 2.3 倍 (见图 3、4，表 4)。其原因在于，当 C_2 增加时会引起地表空气阻抗 r_d 增大，土壤与大气的感热交换明显减少，于是地表感热通量 H_g 迅速减小，这时冠层感热通量 H_c 因为对 C_2 变化不太敏感，但也会对 H_g 的减小变化产生一定补偿，变化幅度在 $\pm 30 \text{ W/m}^2$ 。由于冠层感热通量 H_c 的增加幅度不到近地表感热通量 H_g 减小幅度的 1/3，于是总的近地层感热通量 H 随 C_2 增加而减小 (见图 3a)。另一方面，Beljaars and Viterbo (1994) 认为当地面蒸发过大时，会产生向下的 LE 作为补偿。因此，当地表空气阻抗 r_d 增大时，土壤的蒸发过程减少，此时大气与地表的水汽压差逐渐增大，若水汽压差的增大变化超过阻抗产生的减小作用，那么向上形式的地表潜热通量 LE_g 会随之增加，

图2 潜热通量 (LE 、 LE_c 、 LE_g) 峰值对 C_1 的敏感度 (a) 和相对敏感度 (b)Fig.2 (a) Sensitivity of LE , LE_c , or LE_g to C_1 and (b) relative sensitivity of them to C_1 图3 感热通量 (H 、 H_c 、 H_g) 峰值对 C_2 的敏感度 (a) 和相对敏感度 (b)Fig.3 As in Fig.1 but to C_2 图4 潜热通量 (LE 、 LE_c 、 LE_g) 峰值对 C_2 的敏感度 (a) 和相对敏感度 (b)Fig.4 As in Fig.2 but to C_2

于是冠层对附近大气的潜热通量输送 LE_c 就逐渐减少 (见图 4a), 结合两者的贡献导致近地层潜热通量 LE 随 r_d 增加而减小。

综上所述, 潜热通量对冠层阻抗系数 C_1 较敏感: 从表 3 和 4 可看到, 近地层潜热通量对 C_1 的平均敏感度和平均相对敏感度分别是 -0.60 和 -0.14 ,

而潜热通量对 C_2 的平均敏感度和平均相对敏感度分别是 -0.10 和 -0.04 ; 当 C_1 、 C_2 相对变化同为 275% 时, 潜热通量的相对变化则分别为 0.50% 和 0.14%, 前者是后者的 3.6 倍左右。其原因是: 由于那曲站为半干旱地区, 植被冠层的蒸腾作用在近地层潜热通量占主导。而感热通量则对地表阻抗系数

C_2 更敏感：近地层感热通量对 C_1 的平均敏感度和平均相对敏感度分别是 0.36 和 0.17，对 C_2 的平均敏感度和平均相对敏感度分别是-0.35 和-0.40；当 C_1 、 C_2 相对变化同为 275%时，感热通量的相对变化则分别为 0.52%和 1.62%，后者是前者的 3.1 倍左右。其原因是：地表感热交换则在近地层感热通量中的比重相对大。

表 4 感热通量 H 、潜热通量 LE 对 C_2 值的敏感度 (S) 和相对敏感度 (R)

Table 4 Sensitivity (S) and relative sensitivity (R) of H or LE to C_2

C_2 值	$S(H)$	$S(LE)$	$R(H)$	$R(LE)$
19.96	-0.80	-0.14	-0.08	-0.01
39.91	-0.65	-0.13	-0.15	-0.01
59.87	-0.56	-0.13	-0.21	-0.02
71.84	-0.51	-0.12	-0.24	-0.02
79.82	—	—	—	—
87.80	-0.46	-0.12	-0.28	-0.03
99.78	-0.43	-0.11	-0.30	-0.03
119.73	-0.39	-0.10	-0.34	-0.03
139.69	-0.36	-0.10	-0.38	-0.04
159.64	-0.33	-0.09	-0.42	-0.04
179.60	-0.30	-0.08	-0.45	-0.04
199.55	-0.28	-0.08	-0.47	-0.04
219.51	-0.26	-0.08	-0.50	-0.05
239.46	-0.25	-0.07	-0.53	-0.05
259.42	-0.23	-0.07	-0.55	-0.05
279.37	-0.22	-0.07	-0.57	-0.05
299.33	-0.21	-0.06	-0.59	-0.05

3.2 部分因子分析法的敏感试验结果

由于逐个因子法只考虑每个参数分别对感热、潜热通量的影响，而未涉及 C_1 和 C_2 相互作用可能对能量通量的影响，因此我们又采用了部分因子法，研究当 C_1 和 C_2 同时变化时可能对感热通量、

潜热通量的分别影响，并比较此时它们的响应变化是否与逐个因子法得到的结果一致，若二者相符说明能量通量对 C_1 和 C_2 的敏感变化与所用的方法关系不大。

在这里，我们将 C_1 （或 C_2 ）的变化幅度定为 $\pm 50\%$ ，以此来分别代表增大（+）和减小（-）两个趋势。从分析结果可知， C_1 对潜热通量（尤其是冠层潜热通量 LE_c ）的影响大于对感热通量的影响（见图 5a）； C_2 对感热通量（尤其是地表感热通量 H_g ）的影响大于对潜热通量的影响（见图 5b）。 H_c 、 LE_g 对 C_1 和 C_2 的变化都是正响应， LE 、 H_g 、 LE_c 对 C_1 和 C_2 的变化都是负响应。从能量通量的峰值分布来看， C_1 值发生 $\pm 50\%$ 的相对变化可以影响感热通量和潜热通分别发生约 25.27 W/m^2 和 -37.33 W/m^2 的变化， C_2 值的 $\pm 50\%$ 的相对变化则可以引起感热通量和潜热通量分别变化约 -40.46 W/m^2 和 -12.22 W/m^2 。因此，近地层感热通量 H 对 C_1 的变化发生正响应，对 C_2 的变化产生负响应；而近地层潜热通量 LE 对 C_1 和 C_2 的变化均产生负响应。这与 3.1 节中得到的结论类似。

对于感热通量而言（见图 6a、7a、8a）， H 对 C_1 、 C_2 的变化都比较敏感（SREI 分别是 1.05 和 1.75）， H_c 对 C_1 、 C_2 的变化也都比较敏感（SREI 分别是 1.16 和 1.76），而 H_g 则主要对 C_2 更为敏感些（SREI=2.47）。而潜热通量（见图 6b、7b、8b）的情况则是， LE 主要对 C_1 更为敏感（SREI=2.0）， LE_c 对 C_1 、 C_2 都比较敏感（SREI 分别是 1.63 和 1.03），而 LE_g 则主要对 C_2 更敏感些（SREI=1.97）。SREI 的分布与 3.1 节中得到的近地层潜热通量 LE 对冠层阻抗系数 C_1 较敏感，近地层感热通量 H 对地表空气阻抗系数 C_2 更敏感的结果相符。

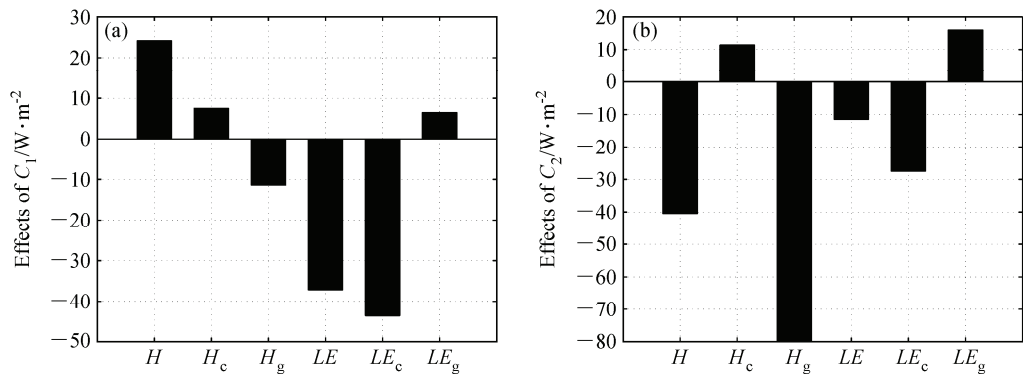
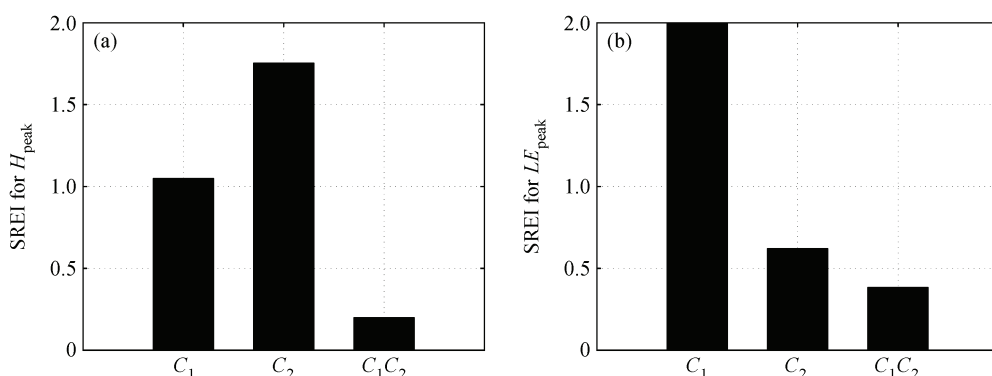
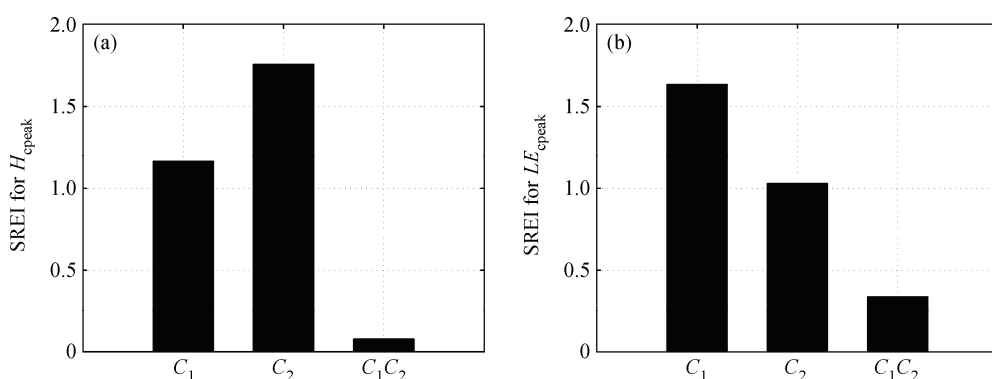
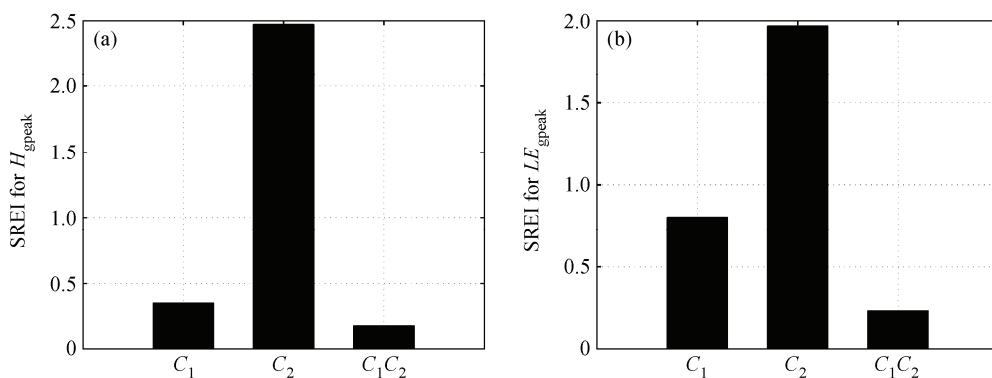


图 5 C_1 对能量通量峰值的影响 (a) 和 C_2 对能量通量峰值的影响 (b)
Fig.5 (a) Effects of C_1 on energy fluxes and (b) effects of C_2 on energy fluxes

图6 近地层感热通量 (H) 峰值对各参数的敏感性 (a) 和近地层潜热通量 (LE) 峰值对各参数的敏感性 (b)Fig. 6 SREIs of parameters with respect to the (a) H or (b) LE model responses图7 冠层感热通量 (H_c) 峰值对各参数的敏感性 (a) 和冠层潜热通量 (LE_c) 峰值对各参数的敏感性 (b)Fig. 7 As in Fig. 6 but with respect to the (a) H_c or (b) LE_c 图8 地表感热通量 (H_g) 峰值对各参数的敏感性 (a) 和地表潜热通量 (LE_g) 峰值对各参数的敏感性 (b)Fig. 8 As in Fig. 6 but with respect to the (a) H_g or (b) LE_g

从 C_1 、 C_2 的 MREI 指数发现 (见图 9), 湍流能量通量的多响应对 C_2 的敏感度 (MREI=1.60) 大于对 C_1 的敏感度 (MREI=1.17), 而对 C_1C_2 相互作用则相对不太敏感 (MREI=0.23)。Liang and Guo (2003) 认为 MREI 值大于 2 表示方案对参数的敏感度较大, 而 MREI 值小于 2 则表示方案对参数的敏感度一般。因此, 本文中 MREI 指数在 1~2 之间

并非来自模式误差, 只能说明阻抗系数 C_1 和 C_2 并不是 SiB2 陆面方案中最为敏感的两个参数。

4 讨论与结论

近地层湍流能量通量的变化是影响陆气之间能量平衡的主要因素, 也是反映陆气之间水循环和植被生物过程的重要物理量。许多科学家发现, 在

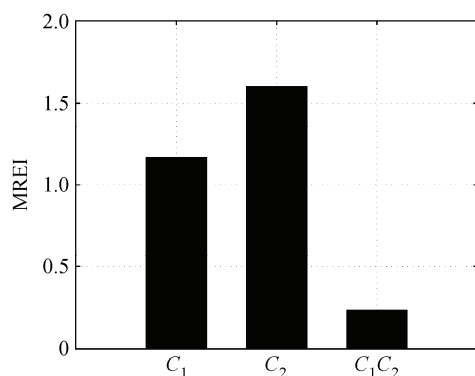


图9 能量通量峰值对各参数的共同敏感性

Fig.9 MREIs of parameters and two-parameter interaction

陆面过程中近地层阻抗对湍流能量通量的变化会产生不同程度的影响,但是对于陆面参数化方案中阻抗系数的取值却存在着很大的不确定性,因此我们以夏季青藏高原的那曲站为例,研究了 SiB2 中湍流能量通量对近地层冠层阻抗系数 C_1 和地表阻抗系数 C_2 取值变化的敏感程度,为以后的陆面参数化方案的研究和模拟提供重要的参考依据。

首先,我们用逐个因子分析法得到的近地层感热通量 H (这里指峰值) 和近地层潜热通量 LE (这里指峰值) 分别对 C_1 和 C_2 变化的敏感度和相对敏感度大小,其结果表明 H 对 C_1 的增加变化是正响应,对 C_2 的增加变化是负响应;而 LE 对 C_1 、 C_2 的增加变化都是负响应。接着,我们又用部分因子分析法得到 C_1 和 C_2 分别对感热通量和潜热通量的影响,即 C_1 对潜热通量(尤其是冠层潜热通量 LE_c) 的影响大于对感热通量的影响, C_2 对感热通量(尤其是地表感热通量 H_g) 的影响大于对潜热通量的影响;在此基础上,进一步用两类指数 (SREI 和 MREI) 分析感热、潜热通量的峰值对阻抗系数的敏感性,其结果与逐个因子分析法的如出一辙,那就是近地层感热通量对 C_1 、 C_2 的变化都比较敏感,近地层潜热通量则主要对 C_1 更为敏感。究其原因在于,那曲站的植被覆盖是以稀疏的短草分布为主,当冠层阻抗系数 C_1 增大时,冠层潜热通量 LE_c 在近地层潜热通量 LE 中所占的比重大于地表潜热通量 LE_g , 于是 LE 中以 LE_c 的变化为主;而当地表空气阻抗系数 C_2 增大时,地表感热通量 H_g 在近地层感热通量 H 中所占的比重大于冠层感热通量 H_c , 因此, H 中以 H_g 变化为主。这恰好解释了为何近地层潜热通量对冠层阻抗系数 C_1 更敏感一些,而近地层感热通量则对地表空气阻抗系数 C_2 较之 C_1 更为

敏感。

不过,敏感性试验用不同的模式和不同站点的输入资料有时也会得到相反的敏感性结果。甚至在不同的时间季节,由不同的下垫面得到的关于湍流能量通量对近地层阻抗系数的敏感程度也是不尽相同的 (Tan and Black, 1976; Sellers, 1985; Verma, 1989; Lindroth, 1993), 因此,本文得到的结论只是基于 SiB2 模式对夏季青藏高原那曲站的敏感结果,具有一定的局限性。后面我们还必须对一些具有代表性的植被—土壤分布的站点进行研究,才能得到关于 SiB2 模式的全面且详细的近地层阻抗系数取值标准,为其他陆面参数化方案的改进和完善提供一定的参考和借鉴。

参考文献 (References)

- Alton P, Mercado L, North P. 2007. A sensitivity analysis of the land-surface scheme JULES conducted for three forest biomes: Biophysical parameters, model processes, and meteorological driving data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 20 (1): GB1008, doi: 10.1029/2005GB002653.
- Beljaars A C M, Viterbo P. 1994. The sensitivity of winter evaporation to the formulation of aerodynamic resistance in the ECMWF model [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 71 (1–2): 135–149.
- Beven K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates [J]. *J. Hydrol.*, 44 (3–4): 169–190.
- Box G E P, Hunter W G, Hunter J S. 1978. *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building* [M]. New York: John Wiley & Sons, 653pp.
- Chang S, Ek M. 1996. Sensitivity study of the CAPS model land-surface scheme using the 1987 Cabauw/PILPS data set [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 21 (3): 205–210.
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 101(D3): 7251–7268.
- Choi T, Hong J, Kim J, et al. 2004. Turbulent exchange of heat, water vapor, and momentum over a Tibetan prairie by eddy covariance and flux variance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D21106, doi: 10.1029/2004JD004767.
- Collins D C, Avissar R. 1994. An evaluation with the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) of which land-surface parameters are of greatest importance in atmospheric modeling [J]. *J. Climate*, 7 (5): 681–703.
- De Rosnay P, Bruen M, Polcher J. 2000. Sensitivity of surface fluxes to the number of layers in the soil model used in GCMs [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27(20): 3329–3332.
- Deardorff J W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation [J]. *J. Geophys. Res.*, 83 (C4): 1889–1903.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1986.

- Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community climate model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-275+STR, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
- Dirmeyer P A, Zeng F J, Ducharme A, et al. 2000. The sensitivity of surface fluxes to soil water content in three land surface schemes [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 1 (2): 121–134.
- 房云龙, 孙菽芬, 李倩, 等. 2010. 干旱区陆面过程模型参数优化和地气相互作用特征的模拟研究 [J]. *大气科学*, 34 (2): 290–306. Fang Yunlong, Sun Shufen, Li Qian, et al. The optimization of parameters of land surface model in arid region and the simulation of land-atmosphere interaction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (2): 290–306.
- Franks S W, Beven K J, Quinn P F, et al. 1997. On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86 (1-2): 63–75.
- Gao Z Q, 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 (D6): D06102, doi: 10.1029/2003JD004089.
- Henderson-Sellers B, Henderson-Sellers A. 1993. Factorial techniques for testing environmental model sensitivity [M]// Jakeman A J, Beck M B, McAleer M J. *Modelling Changes in Environmental Systems*. New York: Wiley, 59–76.
- Jacobs C M J, De Bruin H A R. 1992. The sensitivity of regional transpiration to land-surface characteristics: Significance of feedback [J]. *J. Climate*, 5 (7): 683–698.
- Jacquemin B, Noilhan J. 1990. Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 52 (1-2): 93–134.
- 季劲钧, 胡玉春. 1989. 陆面过程模式的敏感性试验 [J]. *大气科学*, 13 (3): 265–272. Ji Jinjun, Hu Yuchun. 1989. Sensitivity tests of land processes model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 13 (3): 265–272.
- Kato H, Rodell M, Beyrich F, et al. 2007. Sensitivity of land surface simulations to model physics, land characteristics, and forcings, at four CEOP sites [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85: 187–204.
- Koike T, Ishikawa H, Ueno K, et al. 2003. A summary report of the GAME-Tibet synthesis [CD], GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment) Phase I Summary, GAME National Project Office at Terrestrial Environmental Research Center, Tsukuba University, 45–55.
- Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27 (9–10): 645–654.
- Liang X, Guo J Z. 2003. Intercomparison of land-surface parameterization schemes: sensitivity of surface energy and water fluxes to model parameters [J]. *J. Hydrol.*, 279 (1-4): 182–209.
- 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 2001. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究 [J]. *气候与环境研究*, 6 (2): 240–248. Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. 2001. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 6 (2): 240–248.
- Lindroth A. 1993. Aerodynamic and canopy resistance of short-rotation forest in relation to leaf area index and climate [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 66 (3): 265–279.
- McCuen R H. 1974. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation [J]. *American Water Resources Association*, 10 (3): 486–497.
- Mihailović D T, Kallos G. 1997. A sensitivity study of a coupled soil-vegetation boundary-layer scheme for use in atmospheric modeling [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 82 (2): 283–315.
- Montgomery D C. 2008. *Design and Analysis of Experiments*, 7th edition [M]. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Pitman A J. 1994. Assessing the sensitivity of a land-surface scheme to the parameter values using a single column model [J]. *J. Climate*, 7 (12): 1856–1869.
- Qu W Q, Henderson-Sellers A, Pitman A J, et al. 1998. Sensitivity of latent heat flux from PILPS land-surface schemes to perturbations of surface air temperature [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (11): 1909–1927.
- Randall D A, Dazlich D A, Zhang C, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part III: The greening of the Colorado State University general circulation model [J]. *J. Climate*, 9 (4): 738–763.
- Saxton K E. 1975. Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation [J]. *Agricultural Meteorology*, 15 (3): 343–353.
- Sellers P J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. *Inter. J. Remote Sens.*, 6 (8): 1335–1372.
- 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, Tucker C J, Collatz G 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.
- Sud Y C, Shukla J, Mintz Y. 1988. Influence of land surface roughness on atmospheric circulation and precipitation: A sensitivity study with a general circulation model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 27 (9): 1036–1054.
- Sun W Y, Bosilovich M G. 1996. Planetary boundary layer and surface layer sensitivity to land surface parameters [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 77 (3-4): 353–378.
- Tan C S, Black T A. 1976. Factors affecting the canopy resistance of a Douglas-fir forest [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 10 (4): 475–488.
- Verma, S. 1989. Aerodynamic resistances to transfer of heat, mass and momentum [C]. *Estimation of Areal Evaporation*, IAHS Publ., 177: 13–20.
- Wilson M F, Henderson-Sellers A, Dickinson R E, et al. 1987. Investigation of the sensitivity of the land-surface parameterization of the NCAR Community Climate Model in regions of tundra vegetation [J]. *J. Climatol.*, 7 (4): 319–343.
- 薛永康, 曾凡荣, Schlosser A C, 等. 1998. 一个植被模式的检验和它在陆气相互作用中的应用 [J]. *大气科学*, 22 (4): 575–586. Xue Yongkang, Zeng Fanrong, Schlosser A C, et al. 1998. A simplified simple biosphere model and its application to land-atmosphere interactions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 575–586.