

马湘宜, 张宇, 吴统文, 等. 2020. 根系吸水过程参数化方案对青藏高原陆面过程模拟的影响研究 [J]. 大气科学, 44(1): 211–224. MA Xiangyi, ZHANG Yu, WU Tongwen, et al. 2020. Effect of the Root-Water-Uptake Process Parameterization Schemes on the Land-Surface-Process Simulation in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 211–224. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18246

# 根系吸水过程参数化方案对青藏高原陆面过程模拟的影响研究

马湘宜<sup>1</sup> 张宇<sup>1</sup> 吴统文<sup>2</sup> 宋敏红<sup>1</sup> 王少影<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

<sup>2</sup> 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

<sup>3</sup> 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

**摘要** 根系吸水过程对地表能量平衡和水循环起着重要作用, 目前不同的根系吸水过程参数化方案对青藏高原陆面过程模拟的影响尚不明确, 探讨相关参数化方案的影响, 可以为今后建立陆面过程模式根系参数化方案提供参考。本文利用2010年6月1日至9月30日青藏高原玛曲站的观测资料作为大气强迫资料, 驱动BCC\_AVIM模式(北京气候中心陆面模式)引入不同的根系吸水过程参数化方案, 对玛曲站2010年6月1日至9月30日时段感热通量、潜热通量、土壤温度、土壤含水量等要素进行数值模拟, 分析根系吸水过程参数化方案对青藏高原地区陆面过程的影响。模式中有关根系吸水过程的参数化方案主要分为根分布模型和土壤水分对根系有效性函数两类, 根分布模型用Jackson方案、Schenk方案替换, 土壤水分对根系有效性函数用Li方案、LSM1.0方案、CLM4.5方案替换。对比结果表明: 不同的根系吸水过程参数化方案对土壤温度、土壤含水量的模拟影响较小, 对感热通量、潜热通量模拟影响较大, 尤其对冠层蒸腾量模拟差异显著, 相关参数化方案的变动直接影响冠层蒸腾量。两类方案模拟的差异受降水的影响, 在多雨期, 根分布对比方案与原模式方案模拟的感热、潜热通量间存在较大差异; 在少雨期, 土壤水分对根系有效性函数对比方案与原模式方案模拟的感热、潜热通量间存在较大差异。

**关键词** 根系吸水 参数化方案 陆面过程 BCC\_AVIM模式

文章编号 1006-9895(2020)01-0211-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18246

## Effect of the Root-Water-Uptake Process Parameterization Schemes on the Land-Surface-Process Simulation in the Qinghai-Tibet Plateau

MA Xiangyi<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, WU Tongwen<sup>2</sup>, SONG Minhong<sup>1</sup>, and WANG Shaoying<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

<sup>2</sup> Nation Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

<sup>3</sup> Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000

**Abstract** The root-water-uptake process plays an important role in maintaining the surface energy balance and water

收稿日期 2018-10-31; 网络预出版日期 2019-05-14

作者简介 马湘宜, 女, 1993年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与数值模拟研究。E-mail: mxy-93@126.com

通讯作者 张宇, E-mail: yuzhang@cuit.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91537106、91737306, 国家重点研发计划2018YFC1505702, 国家气候中心模式专项 QHMS2018016

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 91537106, 91737306), National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1505702), Special Fund of National Climate Center Model (QHMS2018016)

cycle. Currently, the influence of different root-water-uptake parameterization schemes on the simulation of the land surface processes in the Qinghai-Tibet Plateau is unclear. This study intends to explore the influence of these parameterization schemes and provide a reference for establishing root parameterization schemes for the future development of a land-surface-process model. Using the Beijing Climate Center Land Model (BCC\_AVIM), we applied different root-water-uptake parameterization schemes and used the meteorological data observed at the Maqu station in the Qinghai-Tibet Plateau from June 1, 2010, to September 30, 2010, as the forcing data to simulate sensible heat flux, latent heat flux, soil temperature, and soil water content at the Maqu station. We subsequently compared the simulation results obtained using different parameterization schemes in case of the Qinghai-Tibet Plateau. We divided the root-water-uptake parameterization scheme into a root distribution model and a soil-water-availability function for roots. Further, we based our root distribution model on the Jackson and Schenk schemes and the soil-water-availability function for roots on the Li, LSM1.0 (Land Surface Model 1.0), and CLM4.5 schemes. A comparison of the results denotes that different parameterization schemes have little impact on the soil temperature and the soil water content but a considerable impact on the sensible and latent heat fluxes, especially with respect to canopy transpiration. We observed that the differences between the simulation results were related to precipitation. During the rainy period, the simulated root distribution model is considerably sensitive, with a large difference being observed between the sensible and latent heat fluxes simulated by the original model. During the less rainy period, the simulated soil-water-availability function for roots is more sensitive, with a large difference being observed between the sensible and latent heat fluxes simulated by the original model.

**Keywords** Root water uptake, Parameterization scheme, Land surface process, BCC\_AVIM model (Beijing Climate Center Land Model)

## 1 引言

陆面过程是发生在陆地表面、表层土壤以及近地大气中能够影响气候变化的一系列过程,包括地气间动量、热量以及水分交换的物理过程;碳、氮等化学元素循环的化学过程;植被的生理生态过程(孙菽芬, 2002)。对于陆面过程的深入研究,能够促进陆面模式的发展,进而优化气候模式,是目前提升人类对大气、气候认知的关键之一。在陆地众多下垫面的类型中,植被约占陆地表面的 50%,其作用不容小觑。随着国际地圈—生物圈相互作用计划(IGBP)中“水循环中生物作用”的研究计划(BAHC)和世界气候研究计划(WCRP)中“全球能量和水循环实验”研究计划(GEWEX)的提出,植被对陆面过程产生的影响被日益重视(叶笃正和符淙斌, 1994)。

在植被的效应中,蒸腾作用通过与植物光合作用耦合与碳循环过程相联系,而且对地表能量平衡和水循环起着至关重要的作用(Schneider et al., 2010)。根是植物吸收水分和养分的主要途径,通过植被冠层和大气之间的水与能量通量交换,将土壤环境与大气连接(Feddes et al., 2001; Zheng and Wang, 2007)。植被的根系已明确地作为确定陆地

表面持水能力的基础机制(Zeng et al., 1998)。通过渗透、蒸发、蒸腾等作用,对水分进行再分配,影响着土壤的水热状况。根系通过影响植物的水分吸收来影响蒸腾作用,从而影响着地表通量和状态变量、植被分布以及各种生态系统现象(Zheng and Wang, 2007)。加强对植被根系系统的认知对于更好地理解水文和生物地球化学过程是必不可少的(Laio et al., 2006)。因此,在水文、生态和气候模拟中,根系物理化学过程的真实描述是十分重要的。而对于植被的根系吸水过程及相关参数化方案的研究,则可以提高模式对陆面过程的模拟。

在青藏高原地区,下垫面主要以高寒草地为主。高寒草地根系存在其独特性, Yang et al. (2009) 研究发现,高寒草地根冠比(5.8)高于全球温带草地根冠比(4.2),为适应高寒环境,与低海拔的植物相比,高海拔植物分配更多的生物量到地下(马维玲等, 2010)。植物根系吸水过程是蒸腾作用中的重要环节,结合植被根系的特点,现今众多植被根系吸水过程参数化方案的差异主要存在于根分布模型和土壤水分对根系有效性函数两方面。不同参数化方案对青藏高原草原下垫面模拟的影响,目前尚不明确。本文则针对不同根系吸水过程的参数化方案模拟结果的差异,研究其对青藏高原

地表水热状况和能量物质收支模拟的影响。

文中选用位于青藏高原东部的玛曲站作为试验点，利用2010年6月1日至9月30日的观测资料作为大气强迫资料，驱动BCC\_AVIM模式进行单点数值模拟试验，通过选用不同的根系吸水过程相关的参数化方案，对模拟的土壤温度、含水量、感热通量、潜热通量进行对比分析，探讨不同根系参数化方案对吸水过程的敏感性，为陆面过程模式的植被根系参数化方案的改进与发展提供参考。

## 2 研究方法和资料选取

### 2.1 参数化方案

现有陆面过程模型中的根系吸水方案多为蒸腾权重原理模型，植物需要通过根部吸收土壤水分来满足叶片的蒸腾，以维持植物的有机正常生理活动（王玉阳 和陈亚鹏, 2017）。根吸水过程是土壤—植被—大气连续体系中的一部分，基于植物根系吸水的因果关系将蒸腾量在根系层土壤剖面上按一定权重因子进行分配，此类模型虽然具有较强的经验性，仍得到广泛应用（蔡福等, 2015）。以CLM3（Community Land Model version 3）（Oleson et al., 2004）模式为例，根系吸水过程可以表示为

$$e_i = r_i \cdot E_v^t, \quad (1)$$

$$r_i = \frac{w_i \cdot f_{\text{root},i}}{\beta_t}, \quad (2)$$

$$\beta_t = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_{\text{root},i}, \quad (3)$$

公式（1）表示为各层蒸腾吸水速率 $e_i$ 是蒸腾速率 $E_v^t$ 和有效根分数 $r_i$ 的函数，其中 $i$ 为土壤层数；公式（2）为有效根分数 $r_i$ 的表达式，其中 $\beta_t$ 为土壤水分阻力函数、 $f_{\text{root},i}$ 为第 $i$ 层土壤根分数、 $w_i$ 为土壤水分对根系有效性函数；公式（3）为土壤水分阻力函数 $\beta_t$ ，该函数范围在土壤湿润时为1，土壤干燥时接近零，该函数取决于每个土壤层的土壤水势、植物功能类型以及植物对土壤水分胁迫的响应。

根量及分布是气候模式模拟中重要的相关量（Dickinson et al., 1998）；大多数的根系有效性模型都是经验公式，取决于各地的土壤湿度和水势等因素（Molz, 1981）。所以目前各模式主要在 $f_{\text{root},i}$ 和 $w_i$ 的表达式上存在差异（蔡福等, 2015）。为了研究不同参数化方案的影响，根据根吸水过程相关表达式特点，对于土壤根分布模型 $f_{\text{root},i}$ 和土壤水分对根系有效性函数 $w_i$ 分别选取两种、三种不同参数化方案，将原模式中相应部分进行修改，得出新的模拟结果。本文主要运用的参数化方案具体内容见表1。

#### 2.1.1 根分布模型

对于根分布参数化方案，在CLM3模式中，根分布模型采用了Zeng（2001）建立的函数：

$$f = 1 - \frac{1}{2} (e^{-az} + e^{-bz}), \quad (4)$$

其中， $z$ 为土壤深度(m)， $a$ 、 $b$ 为根分布参数，根据本文选取的下垫面类型， $a$ 、 $b$ 的取值分别为11和2。

表1 根系吸水过程相关参数化方案

Table 1 The root-water-uptake process parameterization scheme

参数化方案		根分布	土壤水分对根系有效性函数
原始方案	CLM3 方案	$f = 1 - \frac{1}{2} (e^{-az} + e^{-bz})$	$w_i = \frac{\psi_{\text{max}} - \psi_i}{\psi_{\text{max}} + \psi_{\text{sat},i}}$
对比方案一	Jackson 方案	$f = 1 - \beta^z \times 100$	同CLM3 方案
对比方案二	Schenk 方案	$f = \frac{1}{1 + (\frac{z}{z_{50}})^c}$	同CLM3 方案
对比方案三	Li 方案	同CLM3 方案	$w_i = (\frac{\psi_{\text{max}} - \psi_i}{\psi_{\text{max}} + \psi_{\text{sat},i}})^m$
对比方案四	LSM1.0 方案	同CLM3 方案	$w_i = \frac{\theta_i - \theta_{\text{dry}}}{\theta_{\text{opt}} - \theta_{\text{dry}}}$
对比方案五	CLM4.5 方案	同CLM3 方案	$w_i = \frac{\psi_c - \psi_i}{\psi_c - \psi_o} \left[ \frac{\theta_{\text{sat},i} - \theta_{\text{icc},i}}{\theta_{\text{sat},i}} \right]$

Jackson et al. (1996) 建立的根分布模型方案 (以下简称 Jackson 方案) 表达式为

$$f = 1 - \beta^z \times 100, \quad (5)$$

其中,  $\beta$  为经验常数, 本文根据下垫面类型相应选取数值为 0.943。

Schenk and Jackson (2002) 建立了根分布方案 (以下简称 Schenk 方案), 他们根据不同种类植被根系在数量和深度上分布不同的特点, 确定不同类型植被根系的分布深度范围, 进而得出根分布参数化方案:

$$f = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{z_{50}}\right)^c}, \quad (6)$$

$$c = \frac{-1.27875}{\lg z_{95} - \lg z_{50}}, \quad (7)$$

其中,  $z_{50}$  为总根量 50% 的深度 (m),  $z_{95}$  为总根量 95% 的深度 (m),  $c$  为廓线形态系数。本文根据下垫面类型相应选取  $z_{50}$  值为 0.07,  $z_{95}$  值为 0.91。

CLM3 方案、Jackson 方案和 Schenk 方案根系随土壤深度分布如图 1 所示, 可以看出三种方案地下生物量主要集中在土壤深度 30 cm 以上。按照模式中的划分将土壤分为 10 层, CLM3 方案、Jackson 方案的根分布最大值出现在土壤的第 4 层; Schenk 方案与前者相比根分布更加浅层化, 最大值出现在土壤的第 2 层。三种根分布模型在土壤的浅层达到极值后, 整体呈现随着土壤深度的增加根含量减少的趋势, 体现出高寒草原下垫面根系分层浅层化的特征。地下生物量累积在土壤表层, 会造

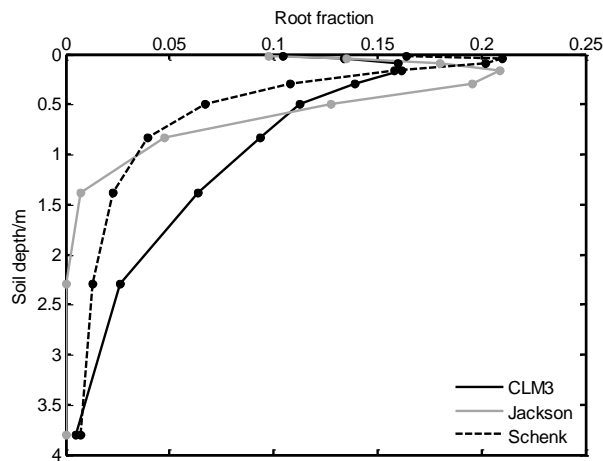


图 1 根系随土壤深度分布图

Fig. 1 Root distribution as a function of the soil depth

成土壤上下层出现非常大的异质性。

### 2.1.2 土壤水分对根系有效性函数

土壤水分对根系有效性函数 CLM3 模式中的表达式为

$$w_i = \frac{\psi_{\max} - \psi_i}{\psi_{\max} + \psi_{\text{sat}, i}}, \quad (8)$$

其中,  $\psi_{\max}$  为土壤最大水势 (mm),  $\psi_{\text{sat}, i}$  为土壤第  $i$  层饱和水势 (mm),  $\psi_i$  为土壤第  $i$  层水势 (mm)。

Li et al. (2013) 提出了土壤水分对根系有效性方案 (以下简称 Li 方案), 该方案将 CLM3 中表达式修改为幂函数的表达形式, Li et al. (2013) 认为该形式更利于根系吸水的模拟结果, 对于根吸水模型有更好的体现。具体的土壤水分对根系有效性函数如下:

$$w_i = \left( \frac{\psi_{\max} - \psi_i}{\psi_{\max} + \psi_{\text{sat}, i}} \right)^m, \quad (9)$$

其中  $m=0.01$ 。

LSM1.0 模式 (Land Surface Model 1.0) (Bonan, 1996) 中的土壤水分对根系有效性函数, 表达式为

$$w_i = \frac{\theta_i - \theta_{\text{dry}}}{\theta_{\text{opt}} - \theta_{\text{dry}}}, \quad (10)$$

$$\theta_{\text{dry}} = \theta_{\text{sat}} \left( \frac{-316230}{\psi_{\text{sat}}} \right)^{-\frac{1}{b}}, \quad (11)$$

$$\theta_{\text{opt}} = \theta_{\text{sat}} \left( \frac{-158490}{\psi_{\text{sat}}} \right)^{-\frac{1}{b}}, \quad (12)$$

$$b = 2.91 + 0.159(\% \text{clay}), \quad (13)$$

其中,  $\theta_{\text{dry}}$  为蒸散停止时的含水量 ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ ),  $\theta_{\text{opt}}$  为利于蒸散的最优含水量 ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ ),  $\theta_i$  为土壤第  $i$  层含水量 ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ ),  $\theta_{\text{sat}}$  为土壤饱和含水量 ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ )。

CLM4.5 (Oleson et al., 2013) 中的土壤水分对根系有效性方案 (以下简称 CLM4.5 方案) 的表达式为

$$w_i = \frac{\psi_c - \psi_i}{\psi_c - \psi_o} \left[ \frac{\theta_{\text{sat}, i} - \theta_{\text{ice}, i}}{\theta_{\text{sat}, i}} \right] \leq 1, \quad (14)$$

其中,  $\psi_c$ 、 $\psi_o$  分别为气孔完全闭合或全开时的土壤水势 (mm), 本文根据下垫面类型相应选取值为  $\psi_c = -74000$ ,  $\psi_o = -275000$ 。

图 2 为 CLM3、Li、LSM1.0、CLM4.5 方案土壤水分对根系有效性函数随土壤含水量变化图。其



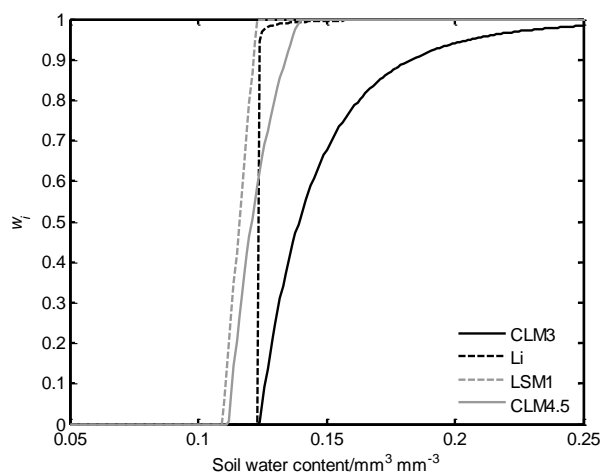


图2 土壤水分对根系有效性函数随土壤含水量变化图  
Fig. 2 Variation of the soil-water-availability function for roots with soil water content

中土壤质地选取玛曲地区典型土壤特征砂粒含量61%、粘粒含量19%为例进行计算。可以看出4种方案 $w_r$ 函数都在土壤含水量0.1~0.13范围内开始有响应，且变化大幅增长十分显著。CLM3、Li方案中 $w_r$ 函数值均无限逼近于1；LSM1.0模式中 $w_r$ 函数值在土壤含水量为0.123时达到最大值1；CLM4.5模式中 $w_r$ 函数值在土壤含水量为0.14时达到最大值1。

## 2.2 模式介绍

BCC\_AVIM模式是中国气象局国家气候中心研发的北京气候中心气候系统模式(Beijing Climate Center Climate System Model, 简称BCC\_CSM)的陆面分量模式(吴统文等, 2014)。BCC\_AVIM的研发是基于NCAR CLM3(Oleson et al., 2004)和动态植被与土壤碳循环模型AVIM2(Atmospheri-Vegetation Interaction model)(Ji, 1995; Ji et al., 2008)。该模式基于CLM3土壤水热传输模块, 包括土壤、湿地、湖泊、冰川四类下垫面, 土壤垂直分为10层(吴统文等, 2014); 植被分为15类功能型; 包含了光合作用等相关的碳循环过程(Ji, 1995; Ji et al., 2008); 修订改进了积雪覆盖率(李伟平等, 2009)、土壤冻融临界温度判别(Xia et al., 2011)、植被冠层四流辐射传输(周文艳等, 2010)等方案, 已具备对动态植被和陆面碳循环过程的模拟能力。在BCC模式中, 陆面模式土壤根系过程的方案主要以CLM3模式为主, 故本文的原始方案选用CLM3模式中的参数化方案。

表2 玛曲站各层土壤相关参数

Table 2 The soil parameter values for different soil layers at the Maqu station

层次	节点深度/m	土壤深度/m	砂粒含量	粘粒含量
1	0.0071	0.0175	61%	19%
2	0.0279	0.0451	61%	19%
3	0.0623	0.0906	61%	19%
4	0.1189	0.1655	62%	19%
5	0.2122	0.2891	62%	18%
6	0.3661	0.4929	64%	18%
7	0.6198	0.8289	66%	17%
8	1.0380	1.3828	67%	16%
9	1.7276	2.2961	67%	18%
10	2.8646	3.8019	61%	22%

## 2.3 资料选取

选用青藏高原东部的玛曲站观测资料作为大气强迫资料, 坐标区域为(33°52.92'~33°53.52'N, 102°8.16'~102°8.76'E), 海拔为3443 m, 测站周围地势平坦, 下垫面为高寒草原类型。大气强迫场资料选取2010年6月1日至9月30日的玛曲站观测资料, 资料时间间隔为30 min, 资料包括(图3)10 m高度的气温(°C)、比湿(kg kg<sup>-1</sup>)、风速(m s<sup>-1</sup>)、地表气压(hPa)、降水量(mm)、入射长波辐射(W m<sup>-2</sup>)、入射太阳(短波)辐射(W m<sup>-2</sup>)。在该时段内, 日均最高气温为17.00°C, 日均最低气温为3.38°C; 相对湿度基本上在60%以上; 主要降水集中在7月份。模拟的时段为2010年6月1日00:30(协调世界时, 下同)至9月30日00:00, 每30 min一次数据。模式中土壤垂直方向上为10层, 10层土壤的划分及相关参数见表2。可以看出玛曲站土壤机械组成部分随土壤深度变化不大, 根据美国农业部制土壤质地分类标准(邵明安 et al., 2006), 主要为砂质壤土类型。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 基本特征量

陆气相互作用主要通过地表与大气间能量与物质的交换实现, 本文根据陆气相互作用的特征, 主要分析了受根系吸水过程参数化方案影响的感热通量和潜热通量, 以及表征土壤状态的土壤温度和土壤含水量。

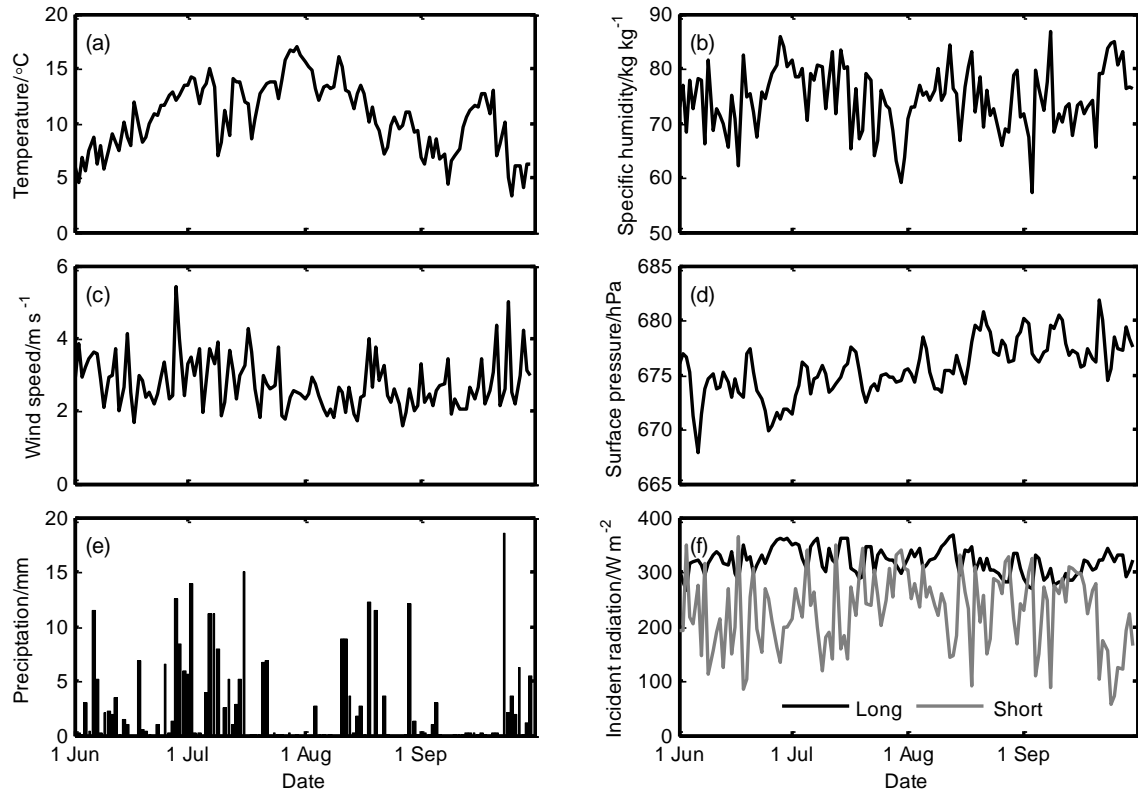


图3 2010年6月1日至9月30日玛曲站10 m处大气强迫场时间序列: (a) 气温; (b) 比湿; (c) 风速; (d) 地表气压; (e) 降水量; (f) 向下长、短波辐射

Fig. 3 Changes in atmospheric forcing data at 10-m height with time at the Maqu station from 1 Jun to 30 Sept 2010: (a) Temperature; (b) specific humidity; (c) wind speed; (d) surface pressure; (e) precipitation; (f) incident long and short radiations

### 3.1.1 感热通量

许多研究表明, 青藏高原感热加热会对季风区乃至全球的大气环流产生影响, 尤其对于我国的降水有着十足的影响(朱乾根和管兆勇, 1997; 段安民等, 2003)。因为青藏高原地区地形复杂, 测站实测资料较少(Zhu et al., 2012), 因此对于模拟出合理的感热通量的研究具有重要意义。感热通量可以表示为

$$H = H_g + H_v, \quad (15)$$

$$H_v = -\rho_{\text{atm}} c_p (T_s - T_v) \frac{(L + S)}{r_b}, \quad (16)$$

$$H_g = -\rho_{\text{atm}} c_p \frac{(T_s - T_g)}{r_{ah}}, \quad (17)$$

$H_g$ 为地面感热通量 ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $H_v$ 为植被感热通量 ( $\text{W m}^{-2}$ ), 即感热通量主要由地面感热通量和植被感热通量组成。图4为CLM3方案 and 对比方案日均相关感热通量模拟差值随时间变化图, 图中数据为对比方案模拟结果减去CLM3方案模拟结果(下同)。其中图4a-e为日均感热通量 ( $\text{W m}^{-2}$ )、图

4f-j为日均地面感热通量 ( $\text{W m}^{-2}$ )、图4k-o为日均植被感热通量 ( $\text{W m}^{-2}$ )。

CLM3方案 and 对比方案对感热通量随时间变化的模拟结果变化趋势基本相同。从图4中可以看出对比方案的模拟结果与CLM3方案模拟的日均相关感热通量略有差异。根分布参数化方案中, Jackson方案在7月整月和8月下旬的感热通量、植被感热通量模拟结果均低于CLM3方案的模拟结果, 最大差值分别为  $1.82 \text{ W m}^{-2}$ 、 $2.06 \text{ W m}^{-2}$ , 地面感热通量模拟结果略高于CLM3模拟结果; Schenk方案与CLM3方案模拟中, 三个通量最大差值分别为  $1.26 \text{ W m}^{-2}$ 、 $2.05 \text{ W m}^{-2}$ 、 $2.39 \text{ W m}^{-2}$ 。土壤水分对根系有效性函数方案中, CLM3方案与对比方案地面感热差异相对较小, 差异主要存在于感热通量和植被感热通量两方面, 且差异明显时段主要出现在8月1日前后。Li方案与CLM3方案感热通量和植被感热通量最大差值分别为  $3.89 \text{ W m}^{-2}$ 、 $4.82 \text{ W m}^{-2}$ ; LSM1.0方案与CLM3方案最大差值分别为  $4.59 \text{ W m}^{-2}$ 、 $4.92 \text{ W m}^{-2}$ ; CLM4.5方案与

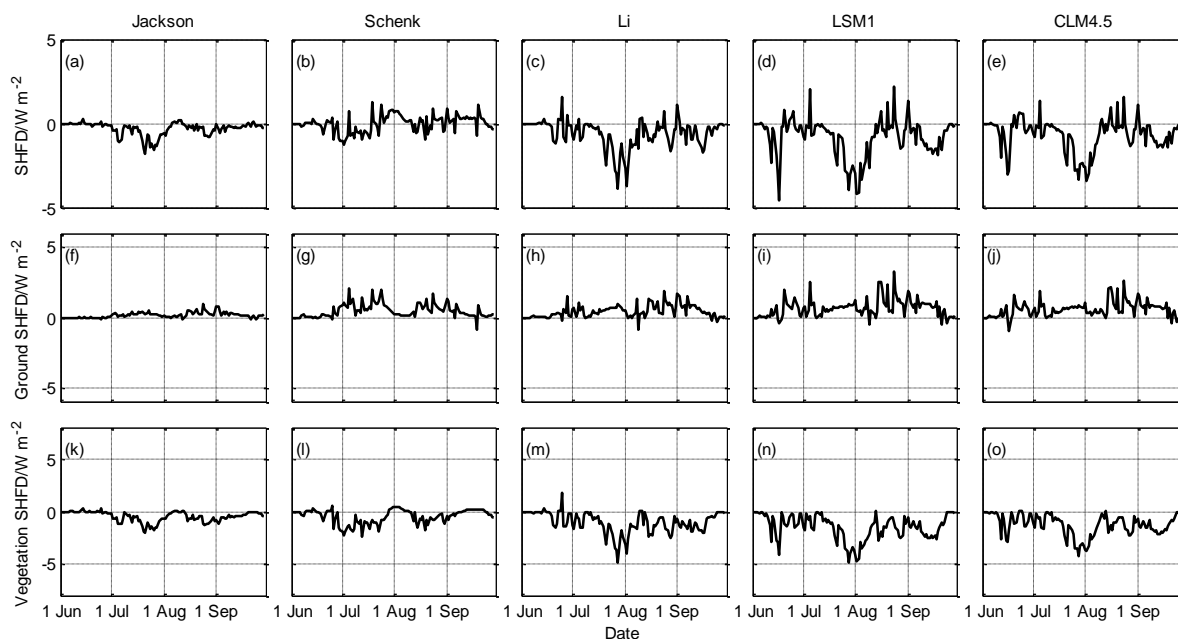


图4 2010年6月1日至9月30日对比方案与CLM3方案模拟的日均相关感热通量差值 (SHFD): (a-e) 感热通量; (f-j) 地面感热; (k-o) 植被感热

Fig. 4 Comparison of differentes of simulated daily mean sensible heat fluxes (SHFD) between comparative schemes and CLM3 scheme from 1 Jun to 30 Sept 2010: (a-e) Sensible heat flux; (f-j) sensible heat flux from ground; (k-o) sensible heat flux from vegetation

CLM3 方案模拟结果最大差值分别为  $3.41 \text{ W m}^{-2}$ 、 $4.19 \text{ W m}^{-2}$ 。

### 3.1.2 潜热通量

在青藏高原夏季,晴天和降水会使表层土壤与大气之间以及土壤内部发生水分迁移,使土壤的潜热通量不断地变化,水分的频繁相变会使土壤不断地吸收和释放潜热,对地气间的水汽和热量输送产生影响(王澄海和师锐,2007)。潜热通量的计算表达式为

$$\lambda E = (1 - f_{\text{wet}})\lambda E_v^t + f_{\text{wet}}\lambda E_v^w + \lambda E_g, \quad (18)$$

其中,右边第一项为冠层蒸腾通量 ( $\text{W m}^{-2}$ ),第二项为冠层蒸发通量 ( $\text{W m}^{-2}$ ),第三项为地面蒸发通量 ( $\text{W m}^{-2}$ )。λ为汽化潜热量 ( $\text{J kg}^{-1}$ ), $f_{\text{wet}}$ 为冠层湿润分数。其中蒸腾作用可以表示为

$$E_v^t = (1 - f_{\text{wet}})\beta_t E_v^*, \quad (19)$$

$E_v^*$ 为潜在蒸腾量。通过公式(19)可以看出,蒸腾作用受土壤根系分布和土壤水分对根系有效性函数的影响。

图5为CLM3方案 and 对比方案日均相关潜热通量差值随时间变化。其中图5a-e为日均冠层蒸腾量 ( $\text{W m}^{-2}$ ),图5f-j为日均冠层蒸发量 ( $\text{W m}^{-2}$ ),图5k-o为日均地面蒸发量 ( $\text{W m}^{-2}$ )。可以看出整

体上对比方案与CLM3方案模拟的日均冠层、地面蒸发量的结果基本相同,但模拟的冠层蒸腾量存在较大差异。

从6月末开始到9月,除少数时间段外,Jackson方案的冠层蒸腾量模拟结果均高于CLM3的模拟结果,尤其在7、8月份,日均最大差值可达到  $3.10 \text{ W m}^{-2}$ ;Schenk方案与CLM3方案在6月下旬到7月中旬、8月中下旬差异明显,日均最大差值为  $3.63 \text{ W m}^{-2}$ ;Li、LSM1.0、CLM4.5方案模拟情况比较类似,整体上高于CLM3模拟值,7月下旬至8月上旬、8月下旬至9月中旬差异明显,日均最大差值分别为  $7.87 \text{ W m}^{-2}$ 、 $8.04 \text{ W m}^{-2}$ 、 $6.85 \text{ W m}^{-2}$ 。

整体上CLM3方案 and 对比参数化方案对于冠层蒸发量、地面蒸发量的模拟结果基本相同,但对于冠层蒸腾量的模拟有着十分显著的差异,这主要表明根分布模型和土壤水分对根系有效性函数对冠层蒸腾量的影响较大,冠层蒸腾完全受到根系相关参数的影响。而冠层蒸发主要受截留方案的影响,地面蒸发受到土壤湿度和辐射收支的影响。因此改变相应的参数化方案,会使潜热通量模拟结果的较大差异出现在冠层蒸腾量上。

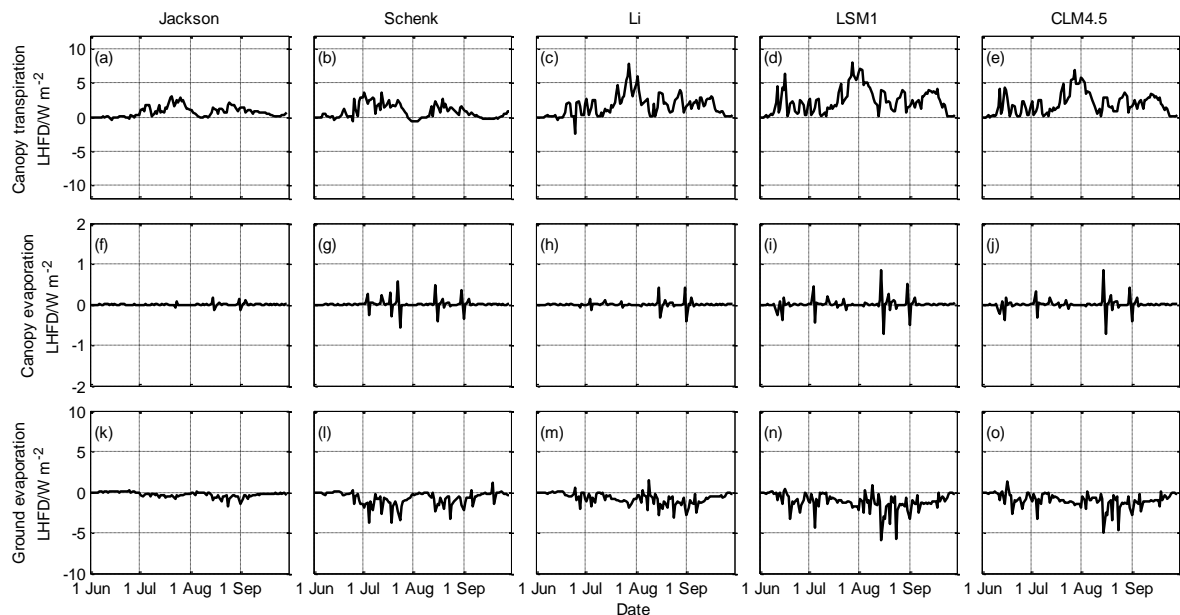


图5 2010年6月1日至9月30日对比方案与CLM3方案模拟的日均相关潜热通量差值(LHFD)随时间变化:(a-e)冠层蒸腾;(f-j)冠层蒸发;(k-o)地面蒸发

Fig. 5 Comparison of differentes of simulated daily mean latent heat fluxes (LHFD) between comparative schemes and CLM3 scheme from 1 Jun to 30 Sept 2010: (a-e) Canopy transpiration; (f-j) canopy evaporation; (k-o) ground evaporation

### 3.1.3 土壤含水量与土壤温度

土壤含水量和土壤温度是土壤的两个重要的参量,土壤含水量的变化会改变地表水的循环,从而影响到大气与陆地之间的能量交换和水分交换;土壤温度的变化会对地气之间的感热通量及辐射通量产生影响,从而对气候变化起到反馈作用。

在原方案模拟的结果中,土壤含水量的逐日变化趋势与降水量变化趋势基本相同。通过对不同方案模拟结果检验,对比方案与CLM3方案的土壤温度、土壤含水量模拟结果线性拟合的相关系数 $R^2$ 均在0.99以上,且在0.01水平上显著相关。说明将根系吸水过程相关参数化方案分别加入模式中,模拟土壤温度、含水量结果仅存在微小差别,不同的根吸水过程参数化方案应用到BCC\_AVIM模式中对土壤的温度和含水量的模拟影响不大。

由于目前陆面模式中根系相关参数化方案尚未完善,根系的持水性能在模式中尚未完全体现,尤其在少雨期,土壤含水量的模拟效果还不甚理想,与实际观测对比仍存在一定差距。综合几种根系吸水相关过程参数化方案的廓线特征(图1, 2)及模拟结果,可以看出Jackson方案根分布形态比原模式中的Zeng方案更贴近高寒草原下垫面的特征(Gao et al., 2017),即根系分布集中于土壤表层,

土壤深层的根含量更接近于零;在土壤水分对根系有效性函数方案中,CLM4.5方案同时考虑了土壤含水量和土壤水势,模拟效果更优于原方案。目前,在最新的CLM5.0(Lawrence et al., 2018)模式中,根分布Jackson方案和土壤水分对根系有效性函数CLM4.5方案也得到了合理的应用。

### 3.2 地表通量与土壤温湿度关系

通过以上的结果可以得知,CLM3方案 and 对比方案的模拟差异主要在感热通量和潜热通量,为了更直观的对比各个方案模拟结果,对CLM3方案和对比方案间的差值进行进一步分析。在前期大量的运算对比中发现,两个根分布对比方案模拟结果与CLM3模拟结果的差异随时间变化趋势基本相同,三个土壤水分对根系有效性函数对比方案模拟结果与CLM3模拟结果的差异变化趋势基本相同,所以对于根分布模型对比方案选取Jackson方案为代表分析,对于土壤水分对根系有效性函数对比方案选取CLM4.5方案作为代表分析,其中对比差值为对比方案模拟结果减去CLM3方案模拟结果。

#### 3.2.1 感热通量差值与土壤温度差值

对于根分布模型、土壤水分对根系有效性函数两类对比方案,与CLM3方案相比,两类对比方案均呈现感热通量差值与对应温度差值同步升高或降



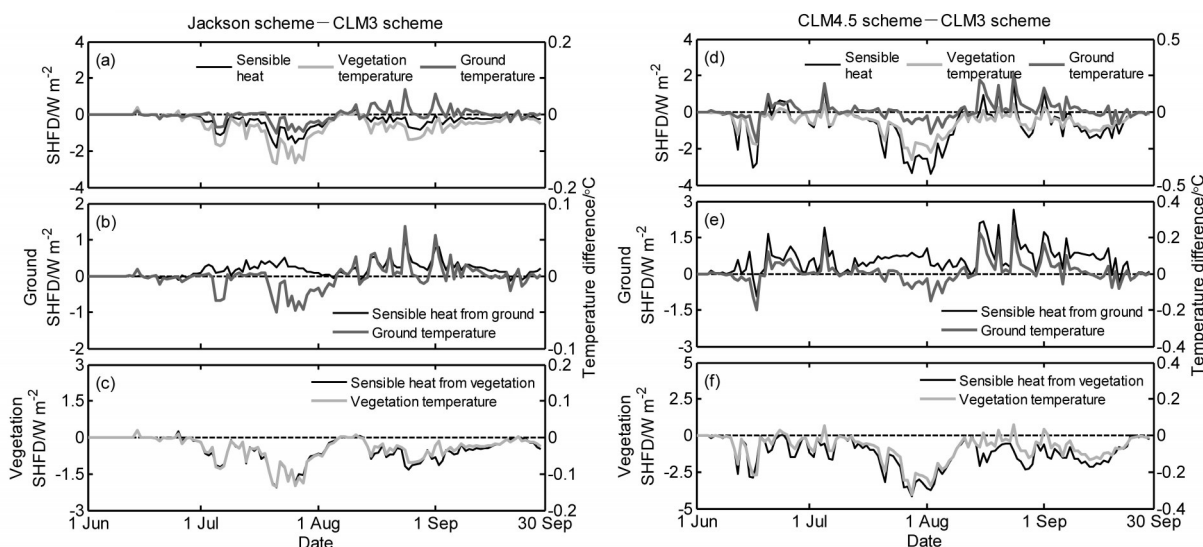


图6 2010年6月1日至9月30日对比方案与CLM3方案模拟的日均相关感热通量差异、地面土壤温度、植被温度差异时间序列：(a-c) Jackson方案与CLM3方案的差值；(d-f) CLM4.5方案与CLM3方案的差值

Fig. 6 Time series of differences of simulated daily mean sensible heat flux, ground temperature, vegetation temperature between comparative schemes and CLM3 scheme from 1 Jun to 30 Sep 2010: (a-c) Jackson scheme—CLM3 scheme; (d-f) CLM4.5 scheme—CLM3 scheme

低的趋势（图6）。地面感热通量差值与地面温度差值相关系数 $R$ 分别为0.857、0.790；植被感热通量差值与植被温度差值相关系数 $R$ 分别为0.929、0.917，均在0.01水平上显著相关。说明对应的温度与感热通量存在正反馈影响，温度的变化会直接影响感热通量。地面感热通量差值与植被感热通量差值大体上存在反向的特点，即模拟地面感热比CLM3模拟值偏高时，植被感热的模拟结果偏低；反之，亦然。经分析得知，对比方案比CLM3方案模拟地面温度偏高、模拟植被温度偏低。结合公式(16)、(17)和图6可知，地面感热主要受到地面温度的影响，植被感热主要受植被温度的影响，故地面感热通量和植被感热通量差值出现反向的特点。两类方案模拟的感热通量差值变化趋势与植被感热通量差值变化趋势较为一致，结合公式(15)，说明该地区的感热模拟差异主要受植被感热差异的影响。

### 3.2.2 潜热通量差值与土壤温湿度差值

潜热通量的变化受土壤温度和含水量的共同作用。根分布对比方案中（图7a, c），冠层蒸腾量差值与表层土壤含水量差值存在负相关关系，地面蒸发量差值与表层土壤含水量差值存在正相关关系；土壤水分对根系有效性函数对比方案中（图7d, f），冠层蒸腾量差值与表层土壤含水量相关性

较弱，地面蒸发量差值与表层土壤含水量差值存在正相关关系。由图7c, f可以看出地表蒸发量差值的变化比表层土壤含水量差值变化滞后一天。进一步验证相关性可知，将表层土壤含水量差值延后一天，Jackson方案两个变量相关系数 $R$ 值由0.518升高到0.689，均通过99%信度检验；CLM4.5方案两个变量相关性从未通过显著性检验提高到 $R$ 值为0.494且通过99%信度检验。

与CLM3方案对比中（图8），两类方案的冠层蒸腾量差值与植被温度差值均呈现负相关性；地面蒸发量差值与地面温度差值均呈现负相关性。根分布模型对比方案的冠层蒸腾量差值与地面温度差值关系为正相关；土壤水分对根系有效性函数对比方案中，冠层蒸腾量差值与地面温度差值的相关性较弱，模拟结果的差值随着时间的推移有较大的波动，结合与土壤含水量差值的相关特征，初步推测差值的波动可能与降水有关。根据地表通量和土壤温度、含水量的特点，结合图6-8，可以得知（图9）：一方面，当蒸腾作用偏高时，利于植被的散热降温，导致植被温度偏低，植被感热通量偏低；另一方面，当蒸腾作用偏高是，植被根系的吸水作用加强，土壤中的水分含量偏低，地面可蒸发量偏低，地面蒸发带走的热量偏少，导致地面温度偏高，地面感热偏高；反之亦然。

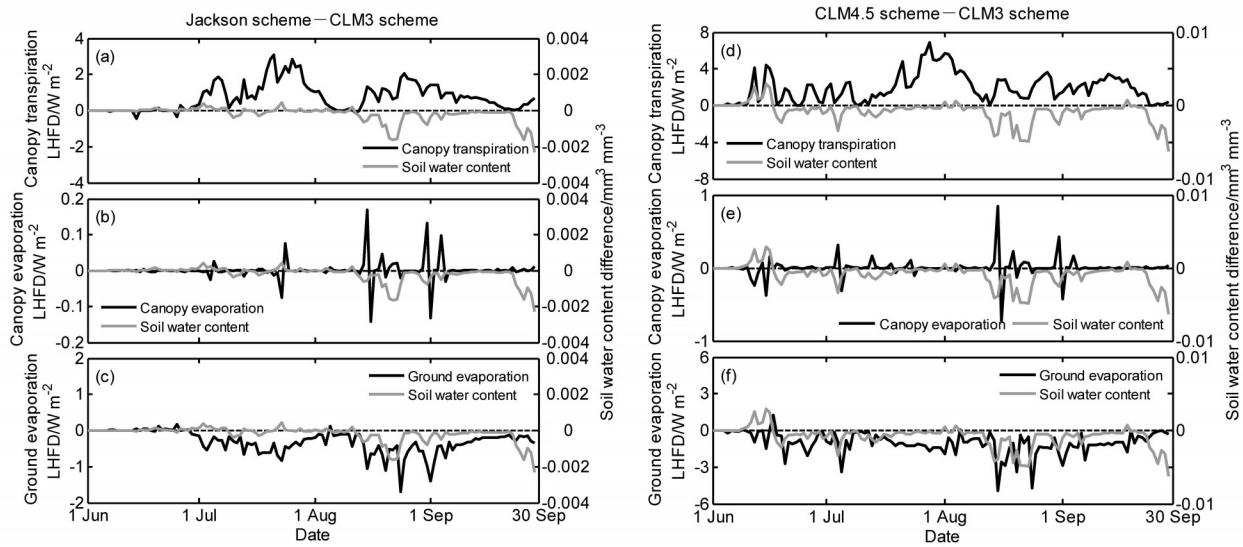


图7 2010年6月1日至9月30日对比方案与CLM3方案模拟的日均相关潜热通量差异、表层土壤含水量差异时间序列：(a-c) Jackson方案与CLM3方案的差值；(d-f) CLM4.5与CLM3方案的差值

Fig. 7 Time series of differences of simulated daily mean latent heat flux and surface soil water content between comparative schemes and the CLM3 scheme from 1 Jun to 30 Sep 2010: (a-c) Jackson scheme—CLM3 scheme; (d-f) CLM4.5 scheme—CLM3 scheme

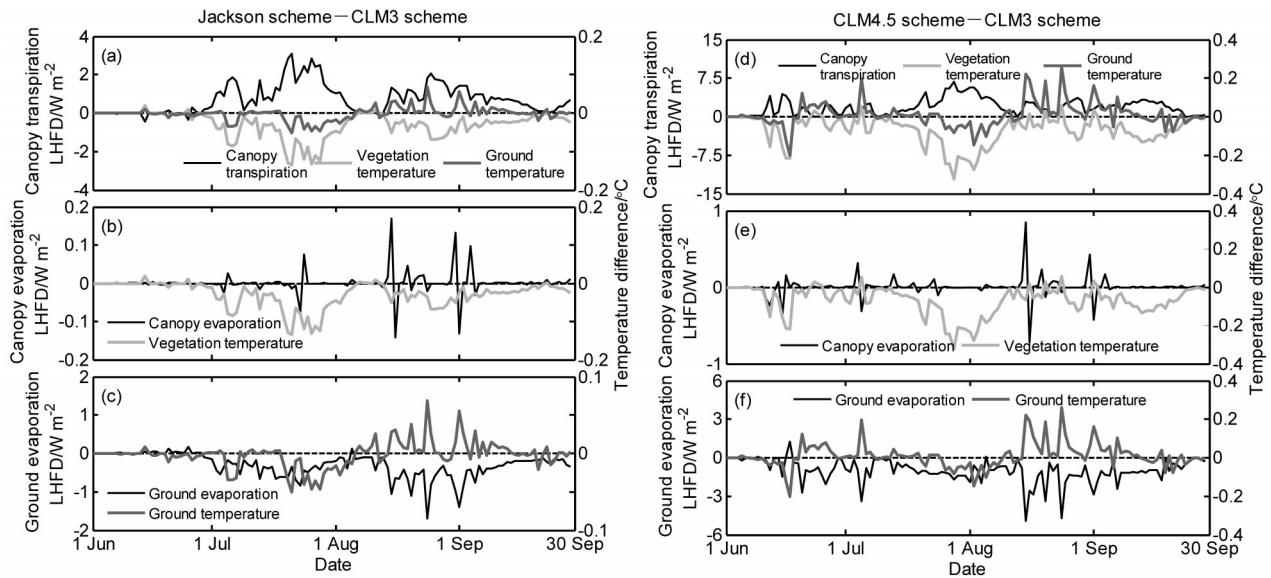


图8 2010年6月1日至9月30日对比方案与CLM3方案模拟的日均相关潜热通量差异与地面温度、植被温度差异时间序列：(a-c) Jackson方案与CLM3方案的差值；(d-f) CLM4.5与CLM3方案的差值

Fig. 8 Time series of differences of simulated daily mean latent heat flux, ground temperature, vegetation temperature between comparative schemes and the CLM3 scheme from 1 Jun to 30 Sep 2010: (a-c) Jackson scheme—CLM3 scheme; (d-f) CLM4.5 scheme—CLM3 scheme

### 3.3 与降水的关系

为研究不同时段参数化方案的敏感性的不同，把模拟的时段分为多雨期和少雨期。根据两类对比方案随降水变化的特点，选取2010年7月16~23日对应降水量多的时段，2010年7月27日至8月3日对应降水量较少的时段，绘制通量要素逐时次对

比变化图。由图10可知感热通量和冠层蒸腾量在早上（北京时）呈现逐渐升高趋势，午后达到一天内的最大值，随后逐渐下降。在降水多的时段，CLM3方案和Jackson方案冠层蒸腾量模拟结果差异较大，Jackson方案比CLM3方案模拟值偏大，最大相差 $20.56 \text{ W m}^{-2}$ ，差异最大值出现在一天内

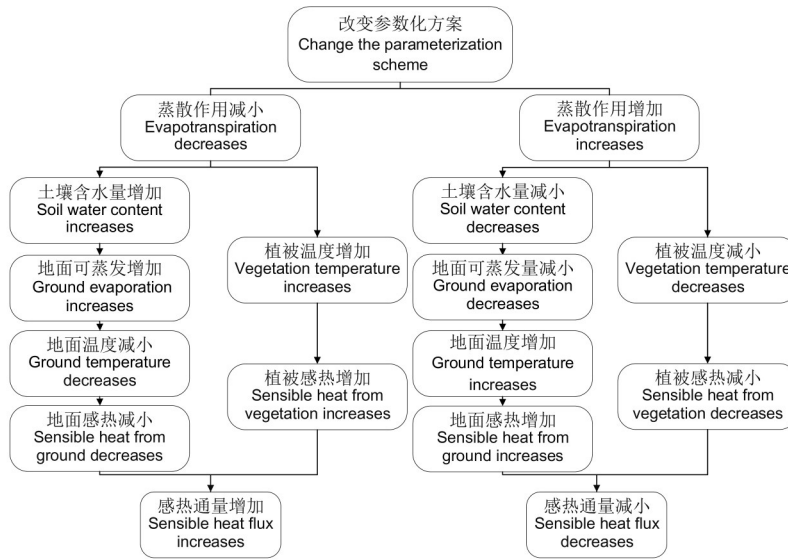


图9 地表通量与土壤温度、含水量关系  
Fig. 9 Relation among the land surface fluxes, soil temperature, and soil water content

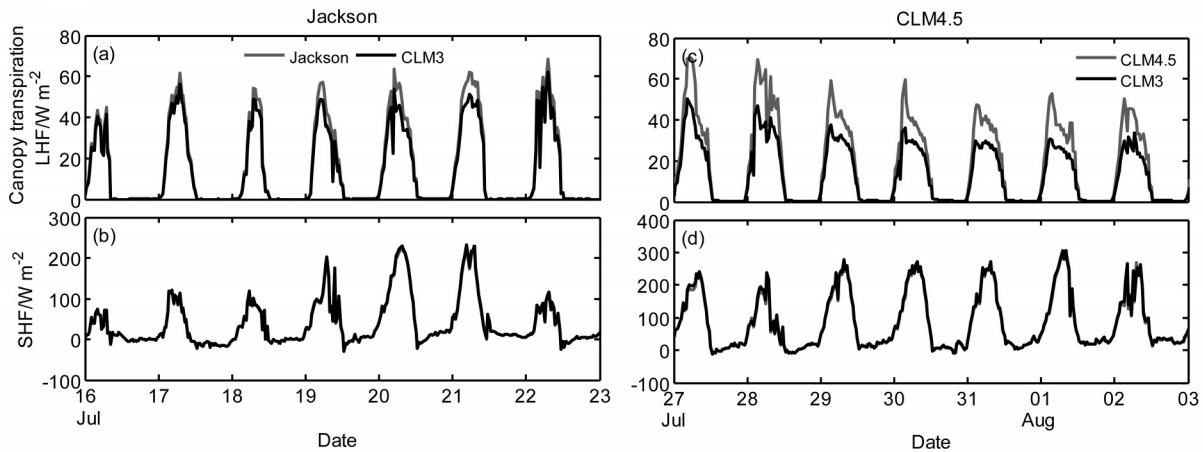


图10 (a, b) 2010年7月16~23日Jackson方案与CLM3方案模拟的日均感热通量(SHF)、潜热通量(LHF)的时间序列; (c, d) 2010年7月27日至8月3日CLM4.5方案与CLM3方案模拟的日均感热通量、潜热通量的时间序列

Fig. 10 Changes in simulated daily mean sensible heat fluxes, latent heat fluxes: (a, b) Between Jackson scheme and CLM3 scheme from 16 to 23 Jul 2010; (c, d) between CLM4.5 scheme and CLM3 scheme from 27 Jul to 3 Aug 2010

的正午及午后时段; Jackson方案模拟的感热通量比CLM3方案模拟值偏小, 最大差值为 $46.45 \text{ W m}^{-2}$ 。在降水少的时段, CLM4.5冠层蒸腾量模拟值最高点高于CLM3模拟值, 差值达 $25.31 \text{ W m}^{-2}$ ; CLM4.5模拟的感热通量结果在该时间段整体上低于CLM3模拟值, 最大差值为 $39.71 \text{ W m}^{-2}$ 。

根据通量要素逐时次的变化图中, 可以证实前文提到的各对比参数化方案对感热通量、潜热通量(尤其是其中的冠层蒸腾量)模拟结果存在明显差异。结合前文2010年6~9月日均模拟结果、降水量图和分时段逐时次的模拟结果, 可以看出, 在降

水多的情况下, 根分布模型的修改对模拟结果更有影响; 在降水少的情况下, 土壤水分对根系有效性函数的修改对模拟结果更有影响。

为了进一步验证降水对各个方案模拟结果的影响, 根据该站点日降水量特点, 从2010年6月1日至9月30日中, 选出7月17~21日、8月11~15日共10天为多雨期, 7月30日至8月3日、9月7~11日共10天为少雨期。根分布模型对比方案(图11a, c)与CLM3方案模拟的感热通量、冠层蒸腾量差值在多雨期偏大, 少雨期偏小; 土壤水分对根系有效性函数对比方案(图11b, d)与CLM3方案



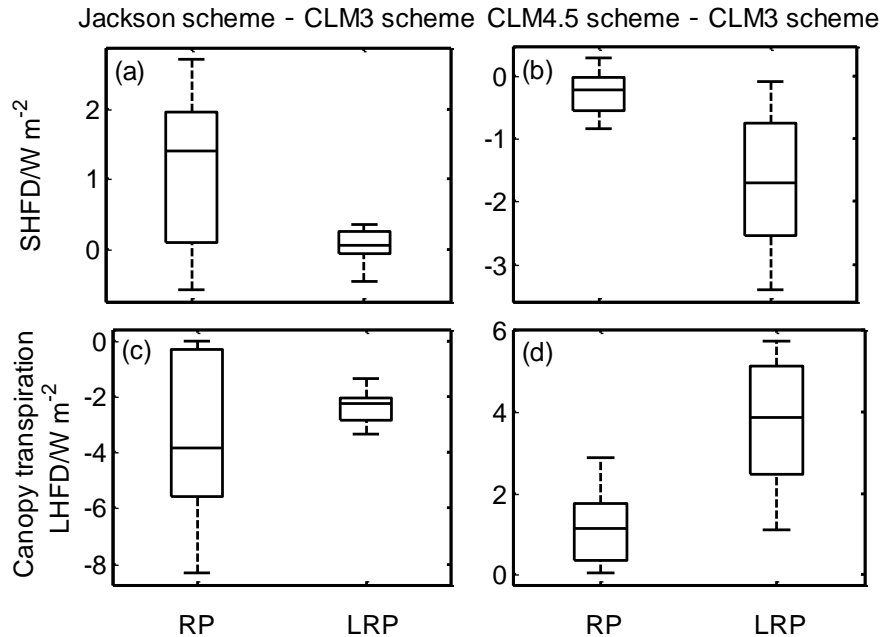


图 11 根分布对比方案、土壤水分对根系有效性函数对比方案与 CLM3 方案模拟通量差值在多雨期 (RP)、少雨期 (LRP) 的箱型图: (a, b) 感热通量; (c, d) 冠层蒸腾潜热通量

Fig. 11 Box plots for differences of simulated daily mean land surface heat fluxes between comparative schemes and CLM3 scheme during rainy periods (RP) and less rainy periods (LRP): (a, b) Sensible heat flux; (c, d) canopy transpiration latent heat flux

模拟的感热通量、冠层蒸腾量差值在多雨期偏小, 少雨期偏大。结合图 2, 土壤水分对根系有效性函数对比方案与 CLM3 方案的  $w_i$  函数值的差异主要出现在土壤含水量 0.1~0.2 范围内, 土壤含水量在大于 0.2 的情况下, 土壤含水量越大几个方案的  $w_i$  函数值越接近, 说明在土壤较为干燥 (降水少) 的情况下, 土壤水分对根系有效性函数  $w_i$  更为敏感, 导致模拟结果差异较大; 在土壤比较湿润 (降水多) 时, 对模拟结果影响较小。

## 4 结论与讨论

本文利用 2010 年 6 月 1 日至 9 月 30 日玛曲站的观测资料作为大气强迫资料, 驱动 BCC\_AVIM 模式对玛曲站 2010 年 6 月 1 日至 9 月 30 日时段进行数值模拟。将有关根系吸水过程的参数化方案的根分布模型改用 Jackson 方案、Schenk 方案, 土壤水分对根系有效性函数改用 Li 方案、LSM1.0 方案、CLM4.5 方案, 分别模拟感热通量、潜热通量、土壤温度、土壤含水量等要素, 得出以下主要结论:

(1) 从模拟结果可以看出, 不同根系吸水过程参数化方案加入 BCC\_AVIM 模式中, 相关参数化方案的修改直接作用于土壤温度、土壤含水量, 会

对模拟结果产生一定的影响, 但整体变化趋势基本相同。

(2) 由于植被根系的吸水、传输、蒸腾等生态作用, 使参数化方案修改后对感热通量、潜热通量影响较大, 尤其对冠层蒸腾量影响显著。感热通量主要受相应温度影响, 潜热通量与土壤含水量、温度都存在一定的相关性。

(3) 根分布模型参数化方案会对土壤中根系体积、含量的模拟产生影响。在降水量大的时段, 使得可以吸收、输送、蒸腾等作用于水分的根分布不同, 从而在感热通量、潜热通量的模拟上存在较大差异; 在相对干燥时段, 土壤中水分含量较小, 植被根系作用较小, 根系分布的变化不会对感热通量、潜热通量的模拟产生较大影响。

(4) 土壤水分对根系有效性函数是体现根系对土壤含水量响应程度的函数, 在降水量大土壤含水量相对较大时, 各个方案的函数值基本稳定在 1 或接近 1, 对模拟的感热通量、潜热通量结果影响较小; 在降水量小即土壤相对干燥时, 可以充分体现根系对土壤水分的响应程度, 不同的函数方案使根系在土壤含水量较小时的敏感度不同, 从而导致在少雨期, 对土壤水分对根系有效性函数参数化方案



的修改, 会使感热通量、潜热通量产生较大的差异。

综上所述, 地下生物量的存在对陆面过程的影响是目前参数化方案中没有完全解决的问题之一, 有关根系吸水过程的参数化方案的不同会对地表通量的模拟产生显著影响, 可见完善植被根系相关参数化方案可以提高陆面模式的模拟效果。本文主要针对目前不同的根系吸水过程参数化方案进行对比分析, 为今后建立陆面过程模式根系参数化方案提供参考。由于此次对比研究仅为单站夏季模拟, 所以要全面分析根系吸水过程参数化方案的影响, 完善植被根系参数化方案, 仍需要更多的资料与方案进行后续的模拟研究。

### 参考文献 (References)

- Bonan G B 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies technical description and user's guide [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-417+STR; National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 98-107.
- 蔡福, 明惠青, 祝新宇, 等. 2015. 陆面模式中植物根系吸水过程参数化方案研究进展 [J]. 气象与环境学报, 31(4): 97-102. Cai Fu, Ming Huiqing, Zhu Xinyu, et al. 2015. Research progress about parameterization scheme of root water uptake in land surface process models [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 31(4): 97-102. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2015.04.014
- Dickinson R E, Shaikh M, Bryant R, et al. 1998. Interactive canopies for a climate model [J]. Journal of Climate, 11: 2823-2836. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2823:icfacm>2.0.co;2
- 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 2003. 4~6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常 [J]. 中国科学 (D辑): 地球科学, 33(10): 997-1004. Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2003. The sensible heat pattern over the Tibetan Plateau with the rainfall and circulation in eastern Asia in summer [J]. Science China (Series D) (in Chinese), 33(10): 997-1004. doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2003.10.011
- Feddes R A, Hoff H, Bruen M, et al. 2001. Modeling root water uptake in hydrological and climate models [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82: 2797-2809. doi: 10.1175/1520-0477(2001)082<2797: mrwuih>2.3.co;2
- Gao Z Y, Niu F J, Wang Y B, et al. 2018. Root-induced changes to soil water retention in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 18: 791-803. doi:10.1007/s11368-017-1815-0
- Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 108: 389-411. doi:10.1007/bf00333714
- Ji J J. 1995. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. Journal of Biogeography, 22: 445-451. doi:10.2307/2845941
- Ji J J, Huang M, Li K R. 2008. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century [J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 51: 885-898. doi: 10.1007/s11430-008-0039-y
- Laio F, D'Odorico P, Ridolfi L. 2006. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L18401. doi:10.1029/2006gl027331
- Lawrence D, Fisher R, Ghimire B, et al. 2018. Technical description of version 5.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note; National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 107-118.
- 李伟平, 刘新, 聂肃平, 等. 2009. 气候模式中积雪覆盖率参数化方案的对比研究 [J]. 地球科学进展, 24(5): 512-522. Li Weiping, Liu Xin, Nie Suping, et al. 2009. Comparative studies of snow cover parameterization schemes used in climate models [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24(5): 512-522. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2009.05.007
- Li L, van der Tol C, Chen X, et al. 2013. Representing the root water uptake process in the Common Land Model for better simulating the energy and water vapour fluxes in a Central Asian desert ecosystem [J]. Journal of Hydrology, 502: 145-155. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.08.026
- 马维玲, 石培礼, 李文华, 等. 2010. 青藏高原高寒草甸植株性状和生物量分配的海拔梯度变异 [J]. 中国科学: 生命科学, 40(6): 533-543. Ma Weiling, Shi Peili, Li Wenhua, et al. 2010. The change of individual plant traits and biomass allocation in alpine meadow with elevation variation on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Scientia Sinica (Vita) (in Chinese), 40(6): 533-543.
- Molz F J. 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review [J]. Water Resour. Res., 17: 1245-1260. doi: 10.1029/wr017i005p01245
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-461+STR; National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 45-138.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G, et al. 2013. Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-503+STR; National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 183-199.
- Schenk H J, Jackson R B. 2002. The global biogeography of roots [J]. Ecological Monographs, 72: 311-328. doi:10.2307/3100092
- Schneider C L, Attinger S, Delfs J O, et al. 2010. Implementing small scale processes at the soil-plant interface—the role of root architectures for calculating root water uptake profiles [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 14: 279-289. doi:10.5194/hess-14-279-2010
- 邵明安, 王全九, 黄明斌. 2006. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 21pp. Shao Mingan, Wang Quanjie, Huang Mingbin. 2006. Soil Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 21pp.

- 孙菽芬. 2002. 陆面过程研究的进展 [J]. 新疆气象, 25(6): 1-6. Sun Shufen. 2002. Advance in land surface process study [J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology (in Chinese), 25(6): 1-6.
- 王澄海, 师锐. 2007. 青藏高原西部陆面过程特征的模拟分析 [J]. 冰川冻土, 29(1): 73-81. Wang Chenghai, Shi Rui. 2007. Simulation of the land surface processes in the western Tibetan Plateau in summer [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 29(1): 73-81. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2007.01.012
- 王玉阳, 陈亚鹏. 2017. 植物根系吸水模型研究进展 [J]. 草业学报, 26(3): 214-225. Wang Yuyang, Chen Yapeng. 2017. Research progress in water uptake models by plant roots [J]. Acta Prataculturae Sinica (in Chinese), 26(3): 214-225. doi:10.11686/cyxb2016146
- 吴统文, 宋连春, 李伟平, 等. 2014. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用 [J]. 气象学报, 72(1): 12-29. Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. 2014. An overview on progress in Beijing Climate Center Climate System Model: Its development and application to climate change studies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(1): 12-29. doi: 10.11676/qxxb2013.084
- Xia K, Luo Y, Li W P. 2011. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 56: 2145-2155. doi:10.1007/s11434-011-4542-8
- Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, et al. 2009. Above- and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands [J]. Journal of Vegetation Science, 20: 177-184. doi:10.1111/j.1654-1103.2009.05566.x
- 叶笃正, 符淙斌. 1994. 全球变化的主要科学问题 [J]. 大气科学, 18(4): 498-512. Ye Duzheng, Fu Congbin. 1994. Major issues of global change sciences [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18(4): 498-512. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.15
- Zeng X B. 2001. Global vegetation root distribution for land modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2: 525-530. doi: 10.1175/1525-7541(2001)002<0525:gvrdf>2.0.co;2
- Zeng X B, Dai Y J, Dickinson R E, et al. 1998. The role of root distribution for climate simulation over land [J]. Geophysical Research Letters, 25: 4533-4536. doi:10.1029/1998gl900216
- Zheng Z, Wang G L. 2007. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the Reserva Jaru site in Amazonia [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 112: G4012. doi: 10.1029/2007jg000413
- 周文艳, 罗勇, 李云梅. 2010. 陆面过程中冠层四流辐射传输模式的模拟性能检验 [J]. 气象学报, 68: 12-18. Zhou Wenyan, Luo Yong, Li Yunmei. 2010. Validation of the radiative transfer parameterization scheme in land surface process model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68(1): 12-18. doi: 10.11676/qxxb2010.002
- 朱乾根, 管兆勇. 1997. 青藏高原感热加热异常与夏季低频环流的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 20(2): 186-192. Zhu Qian'gen, Guan Zhaoyong. 1997. Numerical study of influence of Tibetan sensible heating abnormality on summer Asian monsoon LFO [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 20(2): 186-192. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1997.02.008
- Zhu X Y, Liu Y M, Wu G X. 2012. An assessment of summer sensible heat flux on the Tibetan Plateau from eight data sets [J]. Science China Earth Sciences, 55: 779-786. doi:10.1007/s11430-012-4379-2