

王丽琼, 于坤, 左瑞亭, 等. 2014. 西南地区主要水循环过程的数值模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 614–626, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13086. Wang Liqiong, Yu Kun, Zuo Ruiting, et al. 2014. Numerical simulation analysis on the primary water cycle process in Southwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 614–626.

西南地区主要水循环过程的数值模拟分析

王丽琼¹ 于坤¹ 左瑞亭¹ 罗霞¹ 彭道睿²

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 解放军 94592 部队气象台, 徐州 221000

摘 要 利用 NCAR 的公用陆面模式 CLM4.0 (Community Land Model 4.0), 以 1961~2010 年普林斯顿大学的大气驱动场资料作为大气强迫场, 对西南地区陆面过程变化进行了非耦合模拟试验。分析结果表明: 西南地区降水呈现明显的干湿季节特征, 季风期降水量分布为东北—西南走向, 以印度缅甸一带向东北方向递减; 非季风期近似呈东西梯度, 以两湖地区为中心向西递减。全年而言, 西南地区约有 16.7% 的降水首先被冠层截留, 到达地面后约有 60.5% 以渗透的形式进入土壤, 另有约 17.1% 形成地表径流, 还有少部分降水以直接蒸发的形式加湿低层大气。各水循环因子分布与降水分布密切相关, 其中冠层截留、地表径流、冠层蒸发的季风期与非季风期特征差异不大, 而地下排水和地表蒸发在非季风期均明显高于非季风期, 渗透过程则相反。非季风期西南地区水循环的蒸发高、渗透小、地下排水量显著, 这三个过程的共同作用, 造成西南地区冬春季陆面水份显著流失, 是引发西南春旱的可能原因之一。

关键词 CLM 西南地区 水循环过程 陆面过程

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0614-13

中图分类号 P339

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13086

Numerical Simulation Analysis on the Primary Water Cycle Process in Southwest China

WANG Liqiong¹, YU Kun¹, ZUO Ruiting¹, LUO Xia¹, and PENG Daorui²

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

² Meteorological Observatory of NO.94592 Unit of PLA, Xuzhou 221000

Abstract Using Princeton University's 1961 to 2010 atmospheric external forcing data and NCAR's CLM4.0 (Community Land Model 4.0), an off-line simulation was conducted of the land surface process in Southwest China. Results show that there are sharp distinctions between the precipitation characteristics in Southwest China's wet and dry seasons. During the monsoon season, total precipitation decreases northeastward from Burma and India, while it decreases westward from the Hubei and Hunan provinces in the non-monsoon season. With respect to the annual mean, only about 16.7% of the precipitation in the Southwest China is directly intercepted by the canopy, and of the remaining proportion reaching the ground, about 60.5% infiltrates the soil, approximately 17.1% flows out in runoff, and a small amount evaporates re-enter into the atmosphere. The distributions of the primary hydrological processes are similar to that of precipitation. Canopy interception, surface runoff, and canopy evaporation rarely varies during monsoon and non-monsoon seasons. However, underground drainage and surface evaporation are both significantly greater in the non-monsoon season than during the monsoon season, while infiltration shows just the opposite. In the

收稿日期 2013-05-15 收到, 2013-11-11 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB956203

作者简介 王丽琼, 女, 1975 年出生, 讲师, 主要从事天气预报及气候数值模拟研究。E-mail: ratinzuo@126.com

non-monsoon season, smaller levels of infiltration, higher evaporation rates, and higher underground drainage together result in significant loss of land water in Southwest China, and may play an important role in causing the region's spring drought.

Keywords CLM, Southwest China, Water cycle process, Land surface process

1 引言

近年来,我国西南地区气候灾害频发,尤其是2009年以来的春季旱情异常严重,引起了学者们的高度关注。一些学者从大气环流异常调整方面研究了西南地区冬春干旱的可能原因(彭京备等,2007;贺晋云等,2011;黄荣辉等,2012),另一些学者则从陆面生态方面探寻其可能机制(Nicholson, 2000; Brubaker et al., 2001; Schubert et al., 2004; Xue et al., 2004; Yasunari, 2007; 严建武等, 2012),均得到很多有益的结论。在这些研究中,陆面过程作为气候圈层的重要组成部分,对西南冬春干旱的影响日益凸显。一方面陆面状况及陆气相互作用直接决定了陆面与大气的物质和能量交换特征(Koster and Suarez, 2001; Li and Islam, 2002),进而深刻影响全球大气环流异常。另一方面,陆面的水循环特征与变异既受降水、植被和下垫面性质等因素的显著影响,又会对其产生强烈反馈作用,直接影响西南地区的降水再分配和局地气候异常。

近年来,国内学者利用各种陆面数值模式对陆面过程的水循环进行了大量研究。黄伟等(2004)利用淮河观测资料及陆面过程模式(CLM)对我国陆面特征进行研究,认为CLM不仅较好地模拟出陆气间各种能量通量(感热、潜热通量以及部分辐射分量),而且还能模拟出土壤温度的时空分布。刘少锋和林朝晖(2005)利用通用CLM和第二次青藏高原大气科学试验(TIPEX)及淮河能量与水份循环试验(HUBEX)资料,对东亚地区三类典型下垫面(高原稀疏植被下垫面、森林、水田)进行了验证试验研究。董谢琼和段旭(1998)指出西南地区的降水量分布受地形影响较大,空间分布不均,局地差异大。王佑民(2000)概述了我国林冠对降水再分配的研究概况,指出林冠截留与季节的关系实质上反映了不同季节降雨形态和性质对截留的影响。众多研究认为(刘世荣,1996;李振新等,2006;吕瑜良等,2007),不同地区的林冠一般可截留全年降水的15%~30%,而且不同树种组

成及林分特征对截留影响差异较大。季节变化对林冠截留的影响主要体现在降雨形态和性质上,吴希媛和张丽萍(2006)指出降雨强度是影响径流和入渗的决定因素,坡度对径流与入渗的作用效果会受到雨强的显著影响。郭芬芬等(2010)指出植被覆盖能够显著减少地表径流,而且会提高土壤深层含水量的稳定性,并保持土壤物理性质稳定。陈丽华和余新晓(1995)指出植被能通过改变水动力传导度增强土壤入渗能力,而且植被通过改变土壤表面特性增大了水份入渗到土壤的几率。陈洪松等(2005)研究了坡面降雨入渗及土壤水再分布,指出重复降雨条件下,再分布过程中土壤水会在重力的作用下沿坡下移。

这些研究集中反映了林冠在陆面水循环中的作用,尤其是林冠截留与蒸发对降水的影响研究较多。目前,陆面数值模式对土壤含水、地表温度等常规陆面状态量的模拟研究工作也相对较为丰富,但是对土壤下渗、径流形成、深层蓄水与排水等陆面水循环的过程模拟及其相互关系研究相对较少,尤其是对于西南地区,通过林冠到达地面后降水的大致分配比例、季节变化特征,相互作用关系等研究尚少。为此,本文采用CLM4.0陆面模式研究西南地区主要水循环过程的具体特征,分析其间各因子的相互变化关系,探寻引起西南春旱的可能原因,对研究西南地区气候异常具有重要意义。

2 模式、资料及试验方案

2.1 模式介绍

本文采用的数值模式为NCAR 2010年发布的公用陆面模式(Community Land Model 4.0, CLM4.0)。该模式为NCAR(Zeng et al., 2002; Dai et al., 2003)综合当前主要陆面模式的优点,以NCAR的陆面过程模式(Land Surface Model, LSM)(Bonan, 1996)、生物圈—大气圈传输方案陆面模式(Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, BATS)(Dickinson et al., 1993)、中国科学院大气物理研

研究所陆面过程模式 (Land Surface Model/Institute of Atmospheric Physics, IAP94) (Dai and Zeng, 1997) 为原型, 发展的通用陆面过程模式。该版模式改进了水文参数化方案, 增加了 5 层基岩层, 使模式垂直分层数达到 15 层, 增加了城市冠层模块, 更新了描述植被类型的地表数据集, 在模式中加入了描述碳氮循环的模块, 在模拟积雪时考虑了气溶胶沉淀对反照率的影响 (Lawrence et al., 2011)。模式水平分辨率为 1.0° (纬度) $\times 1.0^\circ$ (经度), 包含 10 层土壤, 最多 5 层雪盖和 1 层植被, 土壤分为 20 类, 植被分为 17 类。模式中充分考虑了不同植被类型的生态差异和水平网格中的地表特性差异, 考虑了不同土壤类型对应的热力学和水动力学差异等。在同一网格中, 模式不同类型的下垫面所受到的大气强迫相同, 不同类型下垫面的各种通量计算相互独立, 最后按各下垫面类型所占的比例进行加权平均后再反馈给大气。CLM 利用全球不同气候带不同下垫面类型野外观测试验结果, 进行了大量验证试验 (如俄罗斯的瓦尔代草原、巴西的亚马逊雨林等), 表明 CLM 对典型下垫面陆气相互作用特征具有良好的模拟能力。国内不少学者也开展了一些积极有意义的工作 (黄伟等, 2004; 刘少锋和林朝晖, 2005; 高志强和刘纪远, 2003; 陆其峰, 2006) 表明了 CLM 对中国陆面的良好模拟能力。

2.2 资料

模式的下垫面资料取为系统自带数据。为验证下垫面资料在中国区域的可靠性, 本文抽选了植被资料与 MODIS (MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer; <http://ldas.gsfc.nasa.gov>[2013-03-20]) 资料进行对比验证, MODIS 与常见陆地卫星和 NOAA 卫星相比有着较高的时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率 (李海波, 2012)。图 1 给出了植被分类对比, 图中反映出 CLM 模式的 17 类植被类型划分与 MODIS 卫星资料有很好的对应关系, 这充分表明 CLM 下垫面数据的可靠性。

模式的大气外强迫驱动资料采用美国普林斯顿大学 1961~2010 年的大气驱动场资料 (Sheffield et al., 2006), 时间分辨率为 3 h, 提供模式运行所需的风速、气温、近地面气压、比湿、降水、太阳短波辐射通量和大气长波辐射通量等近地面气象要素, 普林斯顿的降水场因为在再分析资料的基础上采用了 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)、TRMM (Tropical Rainfall Measuring

Mission) 观测数据进行了订正, 所以相对降水量的空间分布得到了很大的改善 (李明星等, 2011)。

模式的检验资料采用目前国外较为先进的 NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) 的水文科学部和数据同化办公室 (DAO) 联合支持的 1961~2010 年陆面数据同化项目 GLDAS (Global Land Data Assimilation System) 资料 (<http://ldas.gsfc.nasa.gov> [2013-01-10]) (Rodell et al., 2004), 空间分辨率为 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度), 时间分辨率为 3 h。土壤湿度的检验资料来自全球土壤湿度库资料 (Global Soil Moisture Data Bank) (<http://ismn.geo.tuwien.ac.at>[2013-01-20]) (Robock, et al., 2000)。Li et al. (2005) 利用该资料对欧洲中心和 NECP 再分析资料计算的土壤湿度进行过检验, 该资料被广泛用于模式检验和开发 (Levis et al., 2003)。

2.3 方案设计

本文研究区域设置为 ($20^\circ\text{N}\sim 35^\circ\text{N}$, $95^\circ\text{E}\sim 112^\circ\text{E}$), 基本包括了我国广西、贵州、四川、云南和重庆五省 (市、自治区)。使用模式默认的各陆面物理量初始值, 从 1961 年起进行 50 年连续离线积分 (offline), 其中前 20 年为模式调整期 (spin up), 取模式稳定后的 30 年 (1980~2010 年) 模拟结果进行分析研究。模式输出结果为月平均值, 包括冠层截留水、地表蒸发、地表径流、土壤含水量等。

为了检验模拟的准确性, 抽选了部分物理量进行分析。图 2 给出了模拟的径流与 GLDAS 的输出径流相关分布, 除高原一带外, 其他区域相关系数均在 0.55 以上, 表明模拟的径流分布与实际较为一致。另外, 将 CLM 模拟的土壤湿度资料与全球土壤湿度资料库 GSMD (Global Soil Moisture Database) 提供的土壤湿度资料进行对比, 抽选百色站点 (23.9°N , 106.6°E), 土壤层取 0.05~0.1m, 时间序列为 1997 年 1 月至 1999 年 12 月, 如图 3 所示, CLM 模拟的土壤湿度趋势与资料库比较接近, 两者相关系数为 0.432, 通过了 0.001 的显著性检验, 但是, 模拟的最低值低于资料库, 模拟的振幅也偏大, 这可能跟驱动数据有关, 更严格的检验还依赖可靠且连续的土壤湿度观测资料。

3 西南地区基本气候特征分析

西南地区受控于副热带高压和南亚高压, 处于

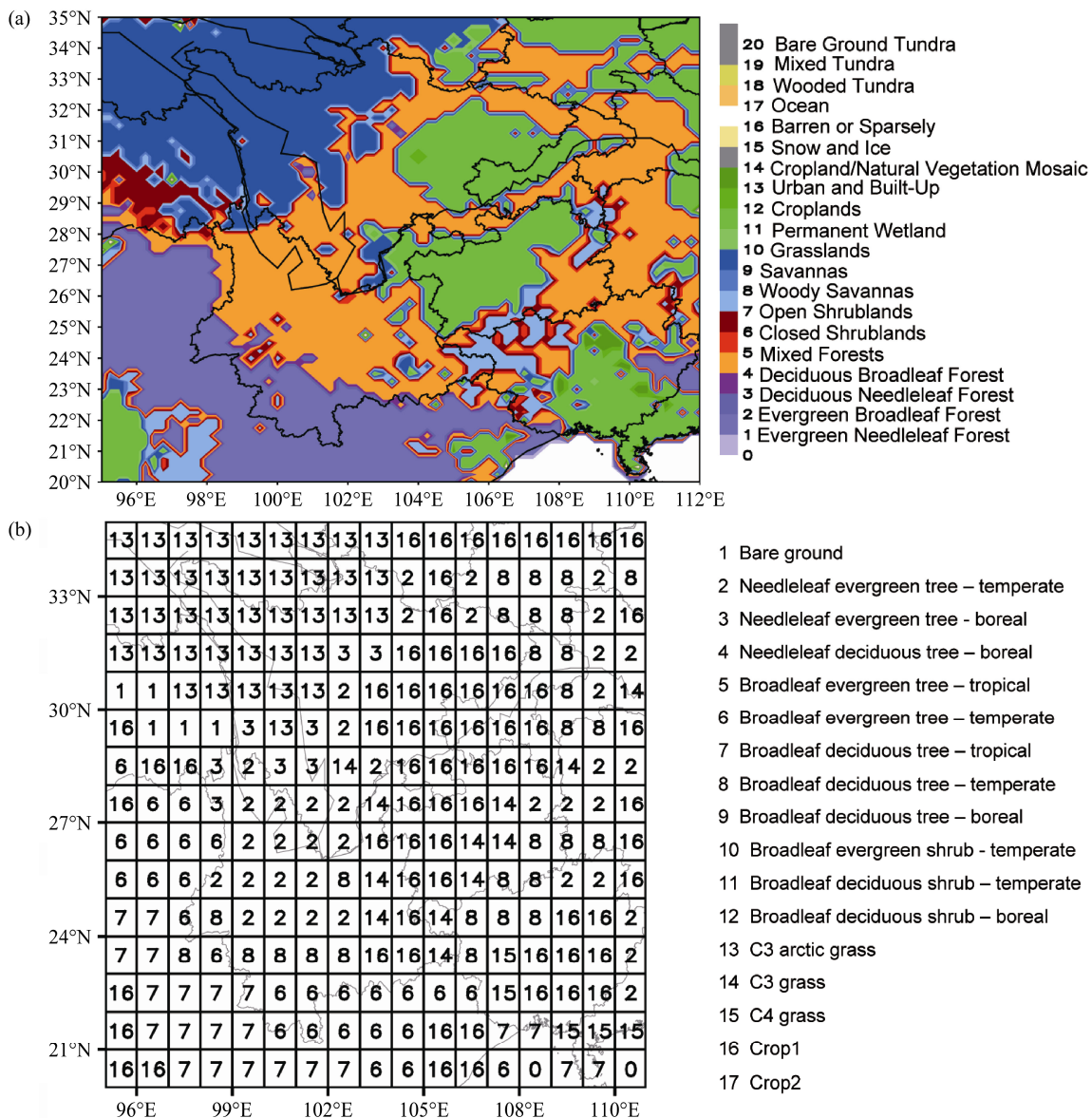


图1 西南地区主要植被类型分布：(a) MODIS 资料；(b) CLM 模式地表植被资料

Fig. 1 The distribution of vegetation classification in Southwest China (a) MODIS (MoDerate-resolution Imaging Spectroradiometer); (b) CLM (Community Land Model)

强盛季风区，存在明显的季风期（5~10 月）和非季风期（11 月至次年 4 月）（赵济，1997）。由于受季风环流和复杂地理环境的影响，西南地区降水的季节分布极不均匀，呈现出明显的干、湿季节特征，如图 4 示。每年季风期（推进图略），西南地区受南亚季风影响显著，5 月南海季风爆发，大量水汽由两湖、两广地区北上，带来丰沛的降水，西南地区的降水量显著增加，6 月印度季风爆发，强盛的低空索马里急流将大量的热带印度洋水汽由印度和缅甸带入西南地区，使西南地区降水再次加强，并持续至整个印度夏季季风，尤其是 7~9 月降水

陡增，平均降水量可达 5.6 mm/d，整个季风期降水约占全年总降水的 80%~90%。从季风期平均看，如图 4a，降水梯度呈典型的东北—西南走向，降水量值由印度、缅甸一带向东北方向递减。而非季风期（推进图略），降水量稀少，10 月起，由于西太平洋副热带高压东撤回退，夏季风减弱消亡，丰沛的水汽源被切断，最大降水量一般均小于 10 mm/d，平均降水量为 1.04 mm/d，仅占全年的 10%~20%。从季风期平均看，如图 4b，降水梯度近似呈东西方向，向西递减，且主要降水区集中在两湖一带。

西南地区地表温度也具有典型的季节变化特

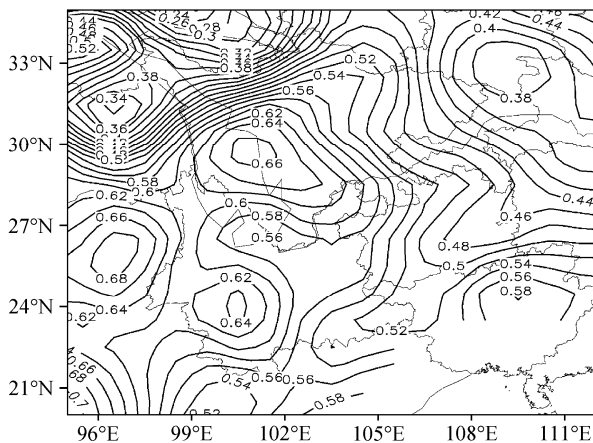


图2 CLM 模拟的地表径流与 GLDAS 资料的相关系数

Fig. 2 The correlation coefficient of surface runoff between CLM simulated data and GLDAS (Global Land Data Assimilation System) data

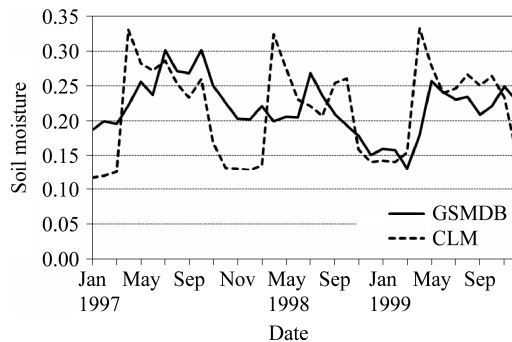


图3 百色站点土壤湿度模拟对比

Fig. 3 Comparison of soil moisture at Baise station

征。如图5,四川西部、青海与青藏高原交界处,由于地形较高,常年受控于一个地表相对冷舌。此外,西南地区南部主要由南北方向温度梯度控制,在这种温度梯度格局下,有两个明显基本特征,即成都、重庆受四川盆地影响常年对应于一个地面热低压,而云南则受北侧地面冷舌影响,非季风期处于相对暖区,季风期处于相对冷区。

4 西南地区季风期与非季风期主要水循环过程的模拟特征分析

大气降水到达地面之前,首先被植被拦截形成林冠层截留,穿过冠层的降水部分继续下落,形成穿透降雨,到达地面后继续通过土壤下渗并扩散,当降雨大于渗透能力时形成超渗产流,当土壤达到饱和以后形成蓄满产流,具体过程如图6示,其中, W_a 表示蓄土层水量, $q_{recharge}$ 表示土壤层与蓄水层的

水交换, q_{drai} 表示地下排水量。

CLM4.0 描述水循环的控制方程为

$$\Delta W_{can} + \Delta W_{sno} + \sum_{i=1}^{N_{levsoi}} (\Delta w_{liq,i} + \Delta w_{ice,i}) + \Delta W_a = (q_{rain} + q_{sno} - E_v - E_g - q_{over} - q_{drai} - q_{rgwl} - q_{snwcp,ice}) \Delta t, \quad (1)$$

其中, ΔW_{can} 代表冠层含水量的变化, ΔW_{sno} 代表雪层含水量的变化, $\Delta w_{liq,i}$ 和 $\Delta w_{ice,i}$ 分别代表第*i*层(土壤分层为 N_{levsoi})土壤液态水和固态水的变化, ΔW_a 代表蓄土层水量的变化; q_{rain} 为降水量, q_{sno} 为降雪量, E_v 代表植被蒸发蒸腾量, E_g 为地表蒸发量, q_{over} 为地表径流量, q_{drai} 为地下排水量, q_{rgwl} 代表从冰河、湿地和湖泊等产生的径流量, $q_{snwcp,ice}$ 代表雪盖引起的径流量, Δt 为时间步长。上式中左边为陆面各功能层含水量的变化,右边为陆面各物理过程对水循环的调整。

由上述公式可看出冠层截留、地表径流、渗透、降水蒸发、地表蒸发、地下排水、冠层蒸发、是陆面水循环的主要过程,而前四个过程也同时是降水再分配的主要环节。需要说明的是,地下水的水位升降过程也是陆面水循环的重要组成部分和主要环节之一,但是,目前本版本 CLM 尚未很好地考虑这一过程,也可能是该模式今后需完善的方向之一。

4.1 冠层截留水的模拟特征分析

植被树冠是影响降水传输的第一个作用层,大气降水通过冠层后形成冠层截留、穿透降水和树干径流,这一过程使林冠截留了部分降水,改变了降水特性和空间分布格局(时忠杰等,2009)。冠层截留水 q_{intr} 可由以下公式计算:

$$q_{intr} = \alpha(q_{rain} + q_{sno}) [1 - e^{-(L+S)/2}], \quad (2)$$

其中, α 为降水量的标准截留系数取为0.25, L 为叶面投影指数, S 为茎干投影指数。

叶面投影指数是陆地生态系统的一个十分重要的结构参数,它和植被的蒸腾作用、太阳光的截取、光合作用以及地表净初级生产力等密切相关,其变化情况能够综合反映植被生长和发育过程。西南地区以热带雨林和亚热带常绿阔叶林为主,植被类型常年稳定,缅甸、越南和老挝一线常年为叶面投影大值区,而云南和贵州交界处始终是叶面投影指数小值区。季风期,如图7a,两湖西部至陕西南部叶面投影指数明显增大,形成近似“V”型分布结构。而非季风期叶面投影指数发生较

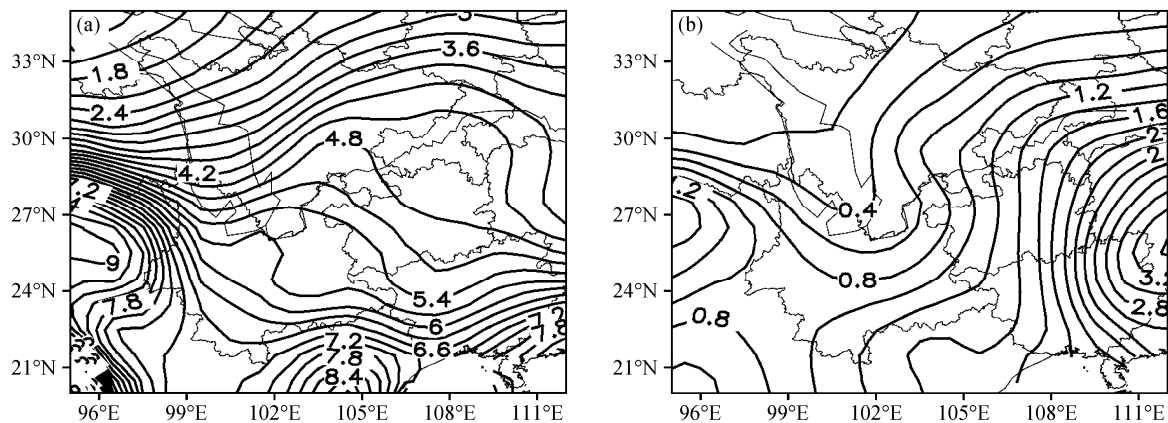


图4 西南地区 (a) 季风期和 (b) 非季风期降水量 (单位: mm/d) 分布

Fig. 4 Distribution of precipitation (mm/d) in Southwest China during (a) the monsoon period and (b) the non-monsoon period

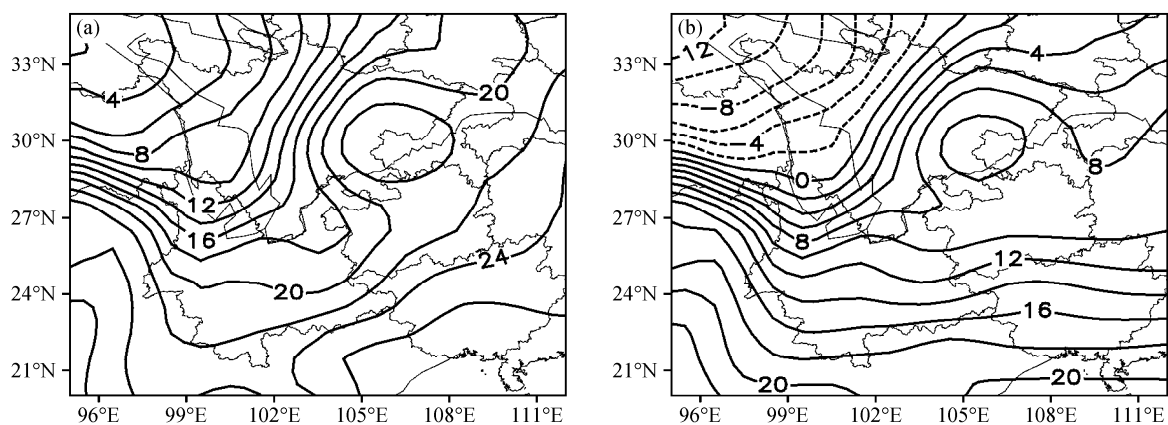


图5 同图4, 但为地表温度 (单位: °C)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the surface temperature (°C)

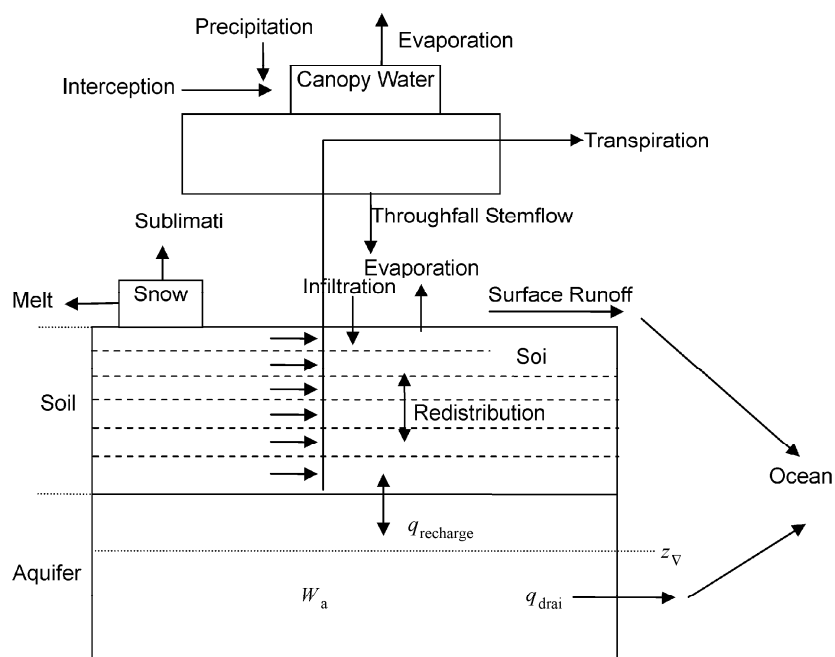


图6 CLM4.0 水循环示意图

Fig. 6 Hydrologic progresses simulated by CLM4

大变化,如图 4b,仅剩缅甸、老挝一线的常年大值区,叶面投影指数呈东北—西南梯度,向东北方向递减,这说明两湖地区在非季风期植被类型发生了显著变化,叶片枯萎,使该地区叶面投影指数减小。

由冠层截留计算公式可知,冠层截留水主要受降水和植被叶面指数控制,在叶面投影指数较大时,其总体分布与降水分布十分相似(图略)。经计算,各月截留量存在明显差异,整个西南地区 7 月截留量最大,平均为 1.08 mm/d,1 月最小,平均为 0.07 mm/d。非季风期,除了两湖地带的强中心外,在印度、缅甸一带出现西北—东南向的截留大值区,这是因为虽然此时该地区降水相对较少(如图 4b),但植被茎、叶面积指数相对较大,叶面覆盖面积较大,冠层截留相对较多。

为突出反映植被对降水截留过程的作用,引入截留率(截留量与降水量之比)以消除降水的季节差异和地域差异影响是十分必要的。如图 8 所示,西南地区截留率分布大体上与叶面投影指数分布类

似。云南地区因长年覆盖热带雨林,季风期与非季风期截留率变化不显著,而两湖地区随着叶片的生长,季风期截留率大于非季风期。图 9 给出了整个西南地区的平均状态,夏季截留量较大,冬、春季较小,但截留率季节变化不显著,季风期略高于非季风期,在 8 月最大,为 17.63%,一直到次年 3 月逐渐递减,降到 13.33%,之后又逐步增加。分析其原因可知,虽然西南地区植被类型常年变化不明显,但叶片茂盛程度在季风期和非季风期存在一定差别,季风期植被较非季风期茂盛,这就造成了上述截留偏多的变化格局。

4.2 地表径流的模拟特征分析

地表径流指降水中既没有被土壤吸收,也未在地表积存,而向下坡流去、汇集到水沟或小溪中的那部分水量。地表径流主要受土壤类型、饱和程度以及到达地表的降水等因素影响。地表径流量 q_{over} 具体计算可由下式给出:

$$q_{\text{over}} = f_{\text{sat}} q_{\text{liq},0} + (1 - f_{\text{sat}}) \max(0, q_{\text{liq},0} - q_{\text{infl,max}}), \quad (3)$$

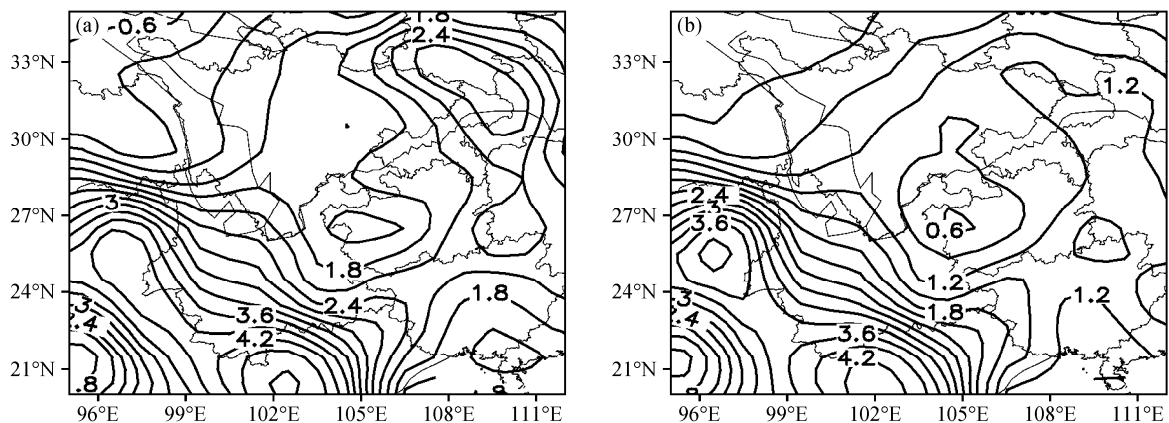


图 7 同图 4, 但为植被叶面投影指数

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the exposed leaf area index

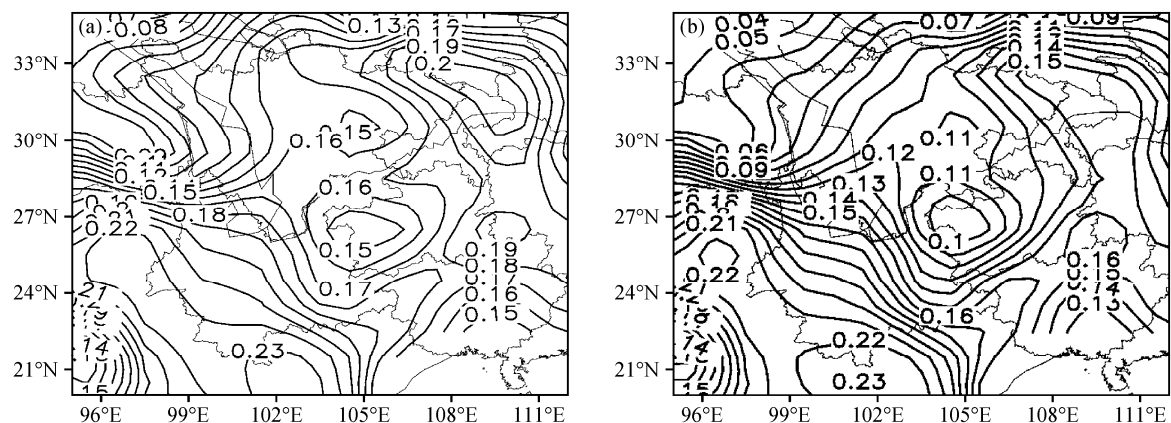


图 8 同图 4, 但为截留率

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for the retention rate

其中, f_{sat} 为土壤饱和程度系数, $q_{\text{liq},0}$ 为到达地面的降水量, $q_{\text{infi,max}}$ 为土壤最大渗透含水量。上式右边第一项是土壤饱和引起的地表漫流, 第二项是满足未饱和土壤最大渗透后的剩余径流量。

西南地区地表径流大体趋势与降水分布类似, 但夏季 7、8、9 月存在不少差异 (图略), 主要是由土壤饱和程度存在季节差异所致, 有些地方 (如云南) 尽管降水很大, 但土壤蓄水能力强 ($q_{\text{infi,max}}$ 较大), 饱和程度系数小, 降水大部分形成渗透, 径流不大; 而冬季, 土壤温度低, 蓄水能力弱 ($q_{\text{infi,max}}$ 较小), 土壤近似饱和, 降水直接形成径流的比重显著增大。

为了突出土壤类型对径流的影响, 图 10 给出了西南地区径流率 (径流/降水) 的分布, 如图所示, 季风期西南各地区径流率差异显著, 云南地区为整个西南地区的低值中心; 非季风期由于降雪的影响, 四川西部、青海与高原交界处为径流率高值区, 而其他地区径流率地域差异不明显, 云南仍为相对

低值区。从整体上看西南地区除高原外, 季风期与非季风期径流率变化不显著, 尤其是云南地区常年为径流率的低值中心, 土壤蓄水能力较强, 不易形成径流。

4.3 地表蒸发的模拟特征分析

蒸发是水份从物体表面 (即蒸发面) 向大气逸散变为水汽的过程 (张建云和李纪生, 2002), 是水文循环的主要过程之一, 也是衡量地表水量平衡和参与地表热量平衡的重要因素, 涉及土壤、植被和大气等多种复杂过程。地表蒸发 E_g 具体计算可由下式给出:

$$E_g = \frac{\beta_{\text{soi}} \rho_{\text{atm}} (q_{\text{atm}} - q_g)}{r_{\text{aw}}}, \quad (4)$$

其中, β_{soi} 为土壤含水系数, ρ_{atm} 为大气密度, q_{atm} 为大气比湿, r_{aw} 为水汽转换阻滞因子, q_g 为表层土壤比湿, 与饱和比湿成正比 $q_g = \alpha q_{\text{sat}}^{T_g}$, α 为由雪盖和土壤按覆盖比加权的比例系数, T_g 为地表温度, $q_{\text{sat}}^{T_g}$ 为地表温度为 T_g 时的饱和比湿。

由公式可知地表蒸发主要受地气水汽差、地表温度、土壤含水量影响, 与地表温度成正比。如图 11 所示, 西南地区地表蒸发季风期表现为东北—西南梯度型, 以印缅为中心向东北方向递减; 非季风期表现为云南、印缅的两个强蒸发中心。分析原因可知, 一方面如图 5 示, 云南地区地表温度为冬暖夏冷, 另一方面如图 4 示, 云南地区冬季降水属于东西梯度型, 降水少, 地气水汽差大, 而夏季属于东北—西南降水梯度型, 降水较多, 地气水汽差小, 故云南地区冬季地表蒸发比夏季大。如图 12 所示, 整个西南地区平均地表蒸发量夏季较大, 冬春较

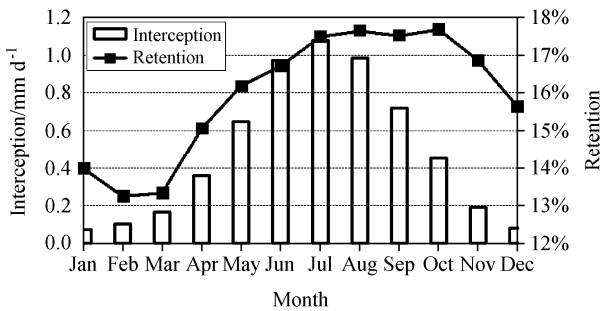


图9 西南地区多年月平均冠层截留与截留率
Fig. 9 Monthly mean canopy interception and retention rate in Southwest China

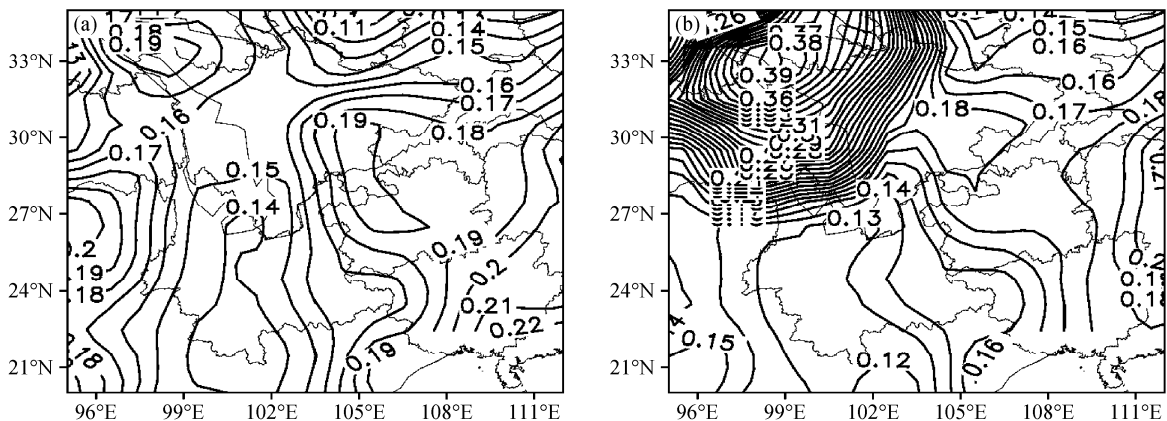


图10 同图4, 但为径流率
Fig. 10 Same as Fig. 4, but for the runoff rate

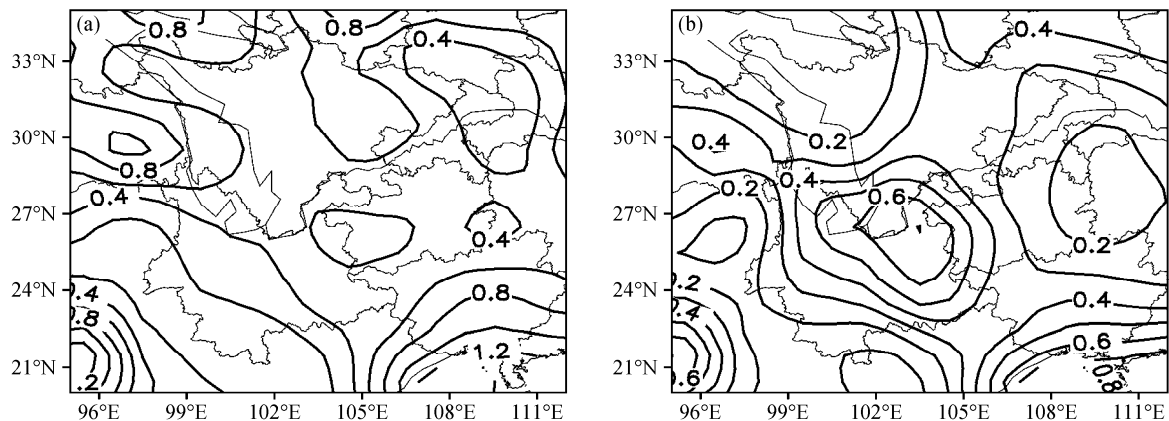


图 11 同图 4, 但为地表蒸发 (单位: mm/d)

Fig. 11 Same as Fig. 4, but for the surface evaporation (mm/d)

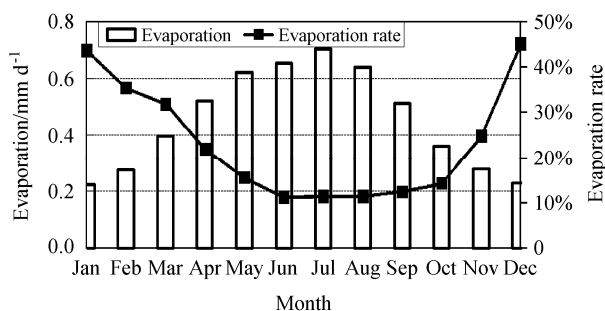


图 12 西南地区多年月平均地表蒸发量与蒸发率

Fig. 12 Monthly mean surface evaporation and evaporation rate curve in Southwest China

小, 在 7 月达到最大为 0.70 mm/d, 1 月最低为 0.22 mm/d, 这主要是受温度变化影响, 呈线性变化。蒸发率 (地表蒸发/降水) 随着降水的增加而减小, 最小为 5 月 11.1%, 最大为 12 月 45.09%。这综合反映了西南地区冬春两季因土壤蒸发损失的水份较大, 极易造成局地干旱。

4.4 渗透的模拟特征分析

渗透是指水份进入土壤的过程, 是降水和地面水向土壤水及地下水转化的重要环节。土壤水份入渗过程和渗透能力决定了降水过程的水份再分配, 从而影响坡地地表径流和流域产流及土壤水份情况。渗透主要取决于到达地面的降水量以及地表蒸发量, 渗透量 q_{infl} 可由以下公式计算:

$$q_{\text{infl}} = \begin{cases} q_{\text{liq},0} - q_{\text{over}} - q_{\text{seva}} & (\text{有降雪}), \\ q_{\text{liq},0} - q_{\text{over}} & (\text{无降雪}), \end{cases} \quad (5)$$

其中, q_{seva} 为土壤顶层液态水蒸发量。

西南地区渗透分布大体趋势与降水形态类似

(图略)。但在云南、四川交界处与降水的分布差异较大, 该地区非季风期渗透量为整个西南地区的低值。图 13 给出了西南地区的渗透率 (渗透/降水) 分布。季风期西南地区渗透率为西南—东北梯度型, 以云南地区为中心向东北方向递减; 非季风期呈东西梯度型, 以两湖地区向西递减。从整体上看, 西南地区季风期渗透率大于非季风期, 且除云南和西南西北部外, 其他地区的渗透率在季风期和非季风期差异不显著。但在云南地区却呈现相反状态, 季风期为大值中心, 非季风期为低值中心。这充分反映了西南地区在非季风期降水补充到土壤中的降水成份较小, 尤其在云南地区, 较低的土壤渗透量极易造成土壤内部水份的严重减少, 进而易形成干旱。

4.5 地下排水的模拟特征分析

地下排水是指由于深层蓄水层降低地下水位而流失的土壤水部分, 是水循环的重要环节, 地下排水量 q_{drai} 可由以下公式计算:

$$q_{\text{drai}} = (1 - f_{\text{imp}}) q_{\text{drai,max}} \exp(-f_{\text{drai}} z_v), \quad (6)$$

其中, f_{imp} 为由土壤层中冰与水共同所决定的不可渗透系数, $q_{\text{drai,max}}$ 为最大排水量, f_{drai} 为衰变系数, z_v 为地下水位。

西南地区地下排水与降水形态分布类似, 大体可分为季风期的东北—西南梯度型和非季风期的东西梯度型 (图略)。季风期西南地区平均地下排水量为 1.36 mm/d, 非季风期约为 0.41 mm/d, 季风期地下排水量约是非季风期的 3 倍。这是因为季风期降水丰沛, 渗透到地下的水量就会增大, 地下排水量就相应加大, 非季风期则相反。为综合反映土壤蓄水能力的变化趋势, 图 14 给出了地下排水率

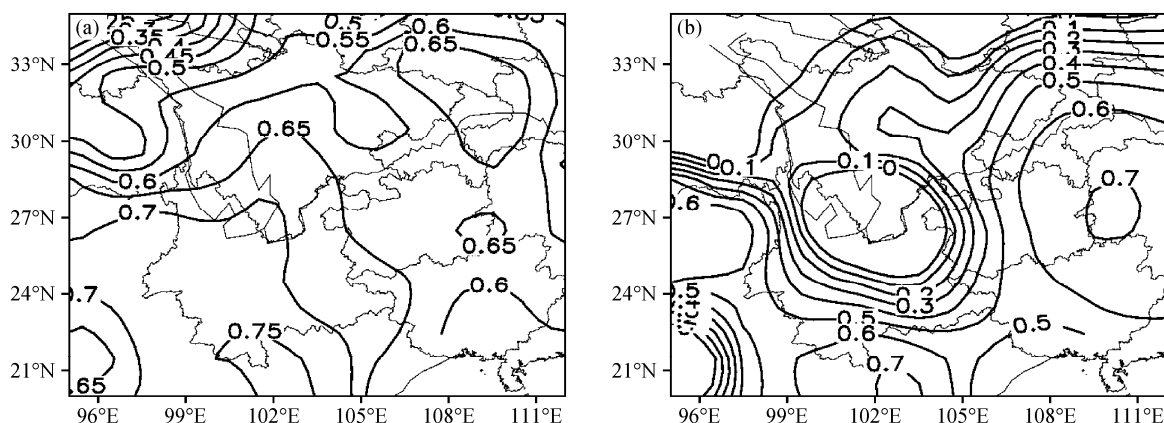


图 13 同图 4, 但为渗透率

Fig. 13 Same as Fig. 4, but for the infiltration rate

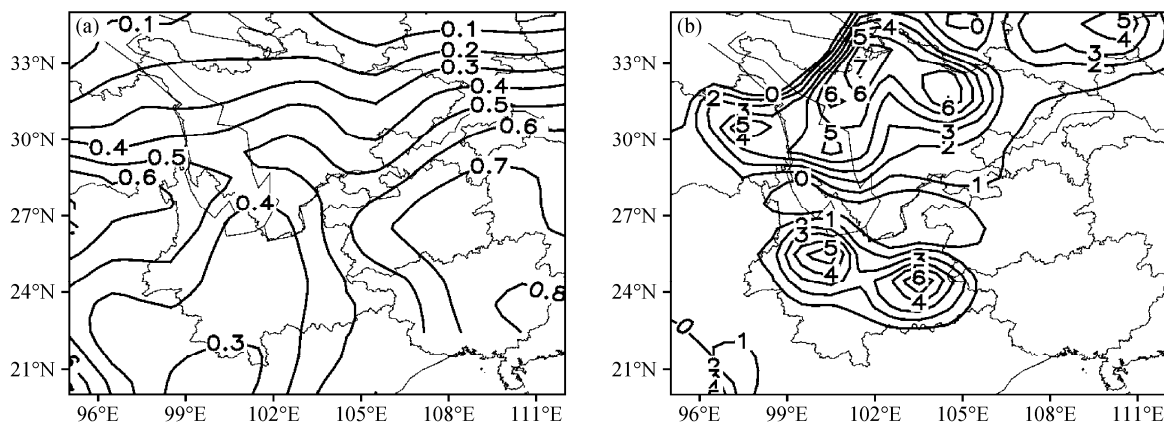


图 14 同图 4, 但为地下排水率 (地下排水量/渗透量)

Fig. 14 Same as Fig. 4, but for the drainage rate

(地下排水量/渗透量) 的分布, 地下排水率大于 1 的地方表明该区土壤含水量有下降的趋势, 反之亦然。由图所示, 整体上西南地区季风期与非季风期地下排水率差异显著, 季风期地下排水率都在 1 以下, 地下排出去的水量远远小于渗透补充到土壤中的水量, 造成土壤含水量加大, 非季风期则相反。云南地区季风期与非季风期呈现相反状态, 非季风期的地下排水量最大为渗透量的 6 倍, 地下排水量远远超过了渗透补充进来的水量, 造成深层土壤含水量的显著降低。

5 主要水循环过程的季节变化关系分析

5.1 季风期与非季风期各水循环过程的比例关系分析

为了定量比较季风期与非季风期西南地区水循环过程各因子的关系, 表 1 给出了季风期和非季风期各过程因子占降水的比例。水循环各因子中,

除冠层截留、地表径流和渗透三过程的水份直接来源于降水分配外, 其他过程均为后期水份循环调整后发生的过程, 如冠层蒸发水份一部分来源于冠层截留, 一部分来源于植被本身含水, 而地下排水和地表蒸发从长期效应看, 均来源于渗透部分。由表可见, 渗透、地下排水和地表蒸发三个过程占降水比例较高, 且存在较明显的季节差异。尤其渗透过程是降水分配比例最高的过程, 特别在季风期, 所占比例约为 63.58%, 远超过了其他所有过程的降水分配比例总和。而由于西南地区非季风期土壤渗透能力较弱, 非季风期的渗透率明显偏弱, 约占季风期的 74%。地表温度和地气水汽差是影响地表蒸发的主要因素, 而在季风期和非季风期, 两者变化均显著。由前文西南地区地表温度分布图 5 可见, 西南地区, 尤其是云南地区季风期处于相对冷区, 而非季风期处于相对暖区, 同时地气水汽差为季风期小非季风期大, 这种非季风期地表偏暖、水汽差较

大的配置导致了地表蒸发较高，约为季风期的 2.4 倍。而地下排水过程是经过渗透之后的缓慢过程，也是长时间累积的结果，非季风期的排水率约为季风期的 1.3 倍。

表 1 西南地区季风期与非季风期水循环因子占降水比例
Table 1 Ratio of hydrological cycle to total precipitation in Southwest China during the monsoon and non-monsoon period

水循环因子	季风期占总降水比例	非季风期占总降水比例
冠层截留	0.1719	0.1478
地表径流	0.1705	0.175
渗透	0.6358	0.4713
地表蒸发	0.1234	0.2939
冠层蒸发	0.0677	0.0602
地下排水	0.288	0.3811

另外，由表 1 中冠层截留、地表径流、冠层蒸发三个过程所占降水比例均较小，合计不到 40%，且季风期和非季风期的差异不大。这反映出，由于西南地区的植被类型季节变化不显著，因此与植被类型密切相关的截留率和冠层蒸发率相对稳定，只是由于在季风期，植被叶片面积较大，故截留率略高。由于季风期平均温度较高，造成季风期冠层蒸发的比例略大。因西南地区土壤类型季节变化不显著，导致径流率没有明显的干湿季节变化。

从整体上看，西南地区非季风期降水显著偏少，以渗透形式补充到土壤中的水份比例比季风期相对偏少 26.6%，而以地表蒸发形式流失的水份又比季风期显著偏高 1 倍以上，深层地下水流失比季风期相对偏高 35.7%，这造成西南地区非季风期陆面水份的显著流失。

5.2 各水循环过程的季节变化过程分析

前文分析了季风期与非季风期水循环过程各因子比例关系，为更细致地反映各因子的季节变化过程与比例关系，图 15 给出了月平均的各水循环过程因子与降水的比值。总体来看，冠层蒸发、冠层截留和地表径流占降水的比例较低，最大不超过 20%，季节变化不显著，而地下排水、地表蒸发和渗透所占降水比例较大，且季节变化显著，是陆面水循环季节性异常的主要影响因素。具体来说，渗透率在 5~10 月平均约在 60%以上，而在冬春季节由于降水减少和土壤温度较低等原因，渗透作用明显减弱，12 月、1 月渗透水严重匮乏，导致冬春季土壤含水量直接减少。蒸发率在 5~10 月均小于 20%，且变化不大，而 11 月至次年 4 月显著增强，

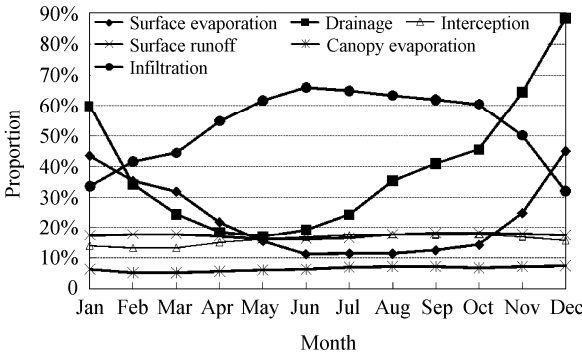


图 15 西南地区多年月平均水循环因子占降水比例
Fig. 15 Monthly mean proportion of hydrological cycle accounting for precipitation in Southwest China

12 月和 1 月均维持在 45%左右，造成近一半的降水直接蒸发损失。地下排水作为较为缓慢和滞后的水循环过程因子，占降水比例以 5 月为界至 12 月逐月显著递增，12 月至次年 4 月递减，最大排水量所占比例在 10 月至次年 1 月，均在 40%以上，造成西南地区冬春深层水显著流失。这三个过程的共同作用，造成西南地区在春冬季陆面水份的大量流失，也是引发西南春旱的可能原因之一。

6 总结

本文利用 CLM4.0 对西南地区水循环过程进行了 50 年离线模拟试验，分析了西南地区季风期和非季风期水循环过程的主要特征以及季节变化关系。主要结论如下：

(1) 西南地区的气候背景具有显著的季节特征，季风期降水量分布为东北—西南向，以印度、缅甸一带向东北方向递减，非季风期，降水分布近似呈东西梯度，以两湖地区为中心向西递减。西南地区南部常年主要由南北方向温度梯度控制，西北部常年受控于地表相对冷舌，而成都、重庆受四川盆地影响常年对应于一个地面热低压，云南则受北侧地面冷舌影响，非季风期处于相对暖区，季风期处于相对冷区。

(2) 西南地区水循环各因子具有明显的季节变化，且与降水分布密切相关。冠层截留水主要受降水和植被叶面指数控制，夏季截留量较大，冬春较小，但截留率季节变化不显著，季风期略高于非季风期。除高原外，季风期与非季风期径流率变化不显著，但季风期西南各地区间的径流率差异显著，尤其是云南地区常年为径流率低值中心，土壤

蓄水能力较强, 不易形成径流。地表蒸发季风期表现为东北—西南梯度型, 以印缅为中心向东北方向递减, 非季风期表现为云南、印缅的两个强蒸发中心, 整个区域平均而言夏季较大, 冬春较小。季风期西南地区渗透率为西南—东北梯度型, 以云南地区为中心向东北方向递减, 非季风期呈东西梯度型, 以两湖地区向西递减, 季风期渗透率大于非季风期。地下排水大体可分为季风期的东北—西南梯度型和非季风期的东西梯度型, 受降水影响, 季风期地下排水量约是非季风期的 3 倍, 地下排水率(排水量/渗透量)差异显著, 季风期地下排水率小, 导致地下排出水量远小于渗透补充到土壤中的水量, 造成土壤含水量加大, 非季风期相反。

(3) 水循环各过程具有鲜明的季节变化关系, 冠层截留、冠层蒸发、地表径流占降水的比例随季节变化不明显, 而地表蒸发率、地下排水率和渗透率由于土壤蓄水能力的季节差异而变化较大。非季风期的地表蒸发率约为季风期的 2.4 倍, 排水率约为季风期的 1.3 倍, 渗透率约为季风期的 74%。非季风期降水显著偏少, 以渗透形式补充到土壤中的水份比例比季风期偏少 26.6%, 而以地表蒸发的形式流失的水份又比季风期显著偏高 1 倍以上, 深层地下水流失比季风期偏高 35.7%, 这四个过程的共同作用, 造成西南地区非季风期陆面水份的显著流失, 是引发西南春旱的陆面水原因之一。

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. NCARTechnicalNoteTN-417+STR, Boulder (Colorado): NCAR, 150.
- Brubaker K L, Dirmeyer P A, Sudrajat A, et al. 2001. A 36-yr climatological description of the evaporative sources of warm-season precipitation in the Mississippi River basin [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2 (6): 537–557.
- 陈丽华, 余新晓. 1995. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 17 (1): 42–47. Chen Lihua, Yu Xinxiao. 1995. A study on the infiltration property of forests for soil and water conservation in west Shanxi province [J]. *Journal of Beijing Forestry University* (in Chinese), 17 (1): 42–47.
- 陈洪松, 邵明安, 王克林. 2005. 上方来水对坡面降雨入渗及土壤水份再分布的影响 [J]. *水科学进展*, 16 (2): 233–237. Chen Hongsong, Shao Ming'an, Wang Kelin. 2005. Effect of runoff from upslope on rainfall infiltration and soil water redistribution at a planar slope [J]. *Advance in Water Science* (in Chinese), 16 (2): 233–237.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84 (8): 1013–1023.
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies Part C: Formation and validation in off-line experiments [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14 (4): 433–460.
- Dickinson R E, Henderson Sdlers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. NCAR/TN-387+STIL, Bouldor (Colorado), 1993.72.
- 董谢琼, 段旭. 1998. 西南地区降水量的气候特征及变化趋势 [J]. *气象科学*, 18 (3): 239–247. Dong Xieqiong, Duan Xu. 1998. Climatic characteristics and variation tendency of precipitation in the southwest region of China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 18 (3): 239–247.
- 高志强, 刘纪远. 2003. 基于陆面模式和遥感技术的地表温度比较 [J]. *地理学报*, 58 (4): 494–502. Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan. 2003. The comparison of land surface temperature with CLM and split window retrieving method [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58 (4): 494–502.
- 郭芬芬, 南岭, 陈安强, 等. 2010. 干热河谷植被覆盖对雨季地表径流和土壤水份的影响 [J]. *安徽农业科学*, 38 (16): 8554–8558. Guo Fenfen, Nan Ling, Chen Anqiang, et al. 2010. Influence of vegetative coverage on surface runoff and soil moisture in rainy season in dry-hot valley [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (in Chinese), 38 (16): 8554–8558.
- 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 2011. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征 [J]. *地理学报*, 66 (9): 1179–1190. He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. 2011. Climate characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 66 (9): 1179–1190.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. *大气科学*, 36 (3): 443–457. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- 黄伟, 郭振海, 宇如聪. 2004. CLM 在淮河流域数值模拟试验 [J]. *气象学报*, 62 (6): 766–773. Huang Wei, Guo Zhenhai, Yu Rucong. 2004. Numerical simulation of CLM over Huaihe basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (6): 766–773.
- Koster R D, Suarez M J. 2001. Soil moisture memory in climate models [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2(6): 558–570.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land model [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3 (3), doi: 10.1029/2011MS000045.
- Levis S, Wiedinmyer C, Bonan G B, et al. 2003. Simulating biogenic volatile organic compound emissions in the community climate system model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D21), 4689, doi: 10.1029/2002JD003203.
- Li J K, Islam S. 2002. Estimation of root zone soil moisture and surface fluxes partitioning using near surface soil moisture measurements [J].

- Journal of Hydrology, 259 (1-4): 1-14.
- 李海波. 2012. 基于 MODIS 数据的济南市城市热岛时空演变及机制研究 [D]. 山东: 山东师范大学硕士学位论文. Li Haibo. 2012. Study on spatial-temporal distribution and causes of heat island effect in Jinan city based on MODIS [D]. M. S. thesis (in Chinese), Shandong Normal University.
- Li H B, Robock A, Liu S X, et al. 2005. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations [J]. Journal of Hydrometeorology, 6: 180-193.
- 李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究 [J]. 科学通报, 56 (16): 1288-1330. Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 56 (16): 1288-1330.
- 李振新, 欧阳志云, 郑华, 等. 2006. 岷江上游两种生态系统降雨分配的比较 [J]. 植物生态学报, 30 (5): 723-731. Li Zhenxin, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. 2006. Comparison of rainfall redistribution in two ecosystems in Minjiang upper catchments [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 30 (5): 723-731.
- 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.
- 刘世荣. 1996. 中国森林生态系统水文生态功能规律 [M]. 北京: 中国林业出版社, 346pp. Liu Shirong. 1996. The Law of Chinese Forest Ecosystems Hydrological Function (in Chinese) [M]. Beijing: China Forestry Press, 346 pp.
- 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 2007. 川西亚高山不同暗针叶林群落类型的冠层降水截留特征 [J]. 应用生态学报, 18 (11): 2398-2405. Lü Yuliang, Liu Shirong, Sun Pengsen, et al. 2007. Canopy interception of sub-alpine dark coniferous communities in Western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 18 (11): 2398-2405.
- 陆其峰. 2006. 陆面下边界对区域气候模拟的影响 (LAI 为例) 及区域气候模式 (CWRF+CLM) 陆面遥感参数预处理研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 138pp. Lu Qifeng. 2006. The lower boundary of land surface effects on regional climate simulation (LAI for example) and the pretreatment of remote sensing parameters of regional climate model (CWRF+CLM) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 138pp.
- Nicholson S. 2000. Land surface processes and Sahel climate [J]. Reviews of Geophysics, 38 (1): 117-139.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁, 等. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 464-474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Buhe Cholaw, et al. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan Chongqing region in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 464-474.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 85 (3): 381-394.
- Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. 2000. The global soil moisture data bank [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 81 (6): 1281-1299.
- Schubert S D, Suarez M J, Pegion P J, et al. 2004. Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains [J]. Journal of Climate, 17: 485-503.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. Journal of Climate, 19 (13): 3088-3111.
- 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 2009. 六盘山华山松 (Pinus armandii) 林降雨再分配及其空间变异特征 [J]. 生态学报, 29 (1): 76-85. Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Xu Lihong, et al. 2009. Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of Pinus armandii in the Liupan Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 29 (1): 76-85.
- 王佑民. 2000. 我国林冠降水再分配研究综述(I) [J]. 西北林学院学报, 15 (3): 1-7. Wang Youmin. 2000. The redistribution of canopy precipitation research in China (I) [J]. Journal of Northwest Forestry University (in Chinese), 15 (3): 1-7.
- 吴希媛, 张丽萍. 2006. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究 [J]. 水土保持学报, 20 (4): 28-30. Wu Xiyuan, Zhang Liping. 2006. Research on effecting factors of precipitations redistribution of rainfall intensity, gradient, and cover ratio [J]. Journal of Soil and Water Conservation (in Chinese), 20 (4): 28-30.
- Xue Y K, Juang H M H, Li W P, et al. 2004. Role of land surface processes in monsoon development: East Asia and West Africa [J]. Journal of Geophysical Research, 109, D03105, doi:10.1029/2003JD003556.
- 严建武, 陈报章, 房世峰, 等. 2012. 植被指数对旱灾的响应研究——以中国西南地区 2009~2010 年特大干旱为例 [J]. 遥感学报, 16 (4): 720-737. Yan Jianwu, Chen Baozhang, Fang Shifeng, et al. 2012. The response of vegetation index to drought: Taking the extreme drought disaster between 2009 and 2010 in Southwest China as an example [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 16 (4): 720-737.
- Yasunari T. 2007. Role of land-atmosphere interaction on Asian monsoon climate[J]. Journal of Meteorological of Society of Japan, 85B: 55-75.
- 赵济. 1997. 中国自然地理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 342pp. Zhao Ji. 1997. Physical Geography of China (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 342 pp.
- 张建云, 李纪生. 译. 2002. 水文学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1278pp. Zhang Jianyun, Li Jisheng. Translate. 2002. Handbook of Hydrology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1278pp.
- Zeng X B, Shaikh M, Dai Y J, et al. 2002. Coupling of the common land model to the NCAR community climate model [J]. Journal of Climate, 15 (14): 1832-1854.