

中南半岛春季土壤湿度对南海及其周边地区夏季降水的影响^{*}

游家兴^{1,2}, 李江南¹, 赵杨洁¹, 毛江玉³

- (1. 中山大学大气科学学院//广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 通过SVD分析等统计方法对中南半岛春季土壤湿度对南海及其周边地区夏季降水的影响进行了诊断分析, 结果表明: 中南半岛春季土壤湿度与西太平洋夏季降水呈现显著正相关, 而与东印度洋夏季降水为显著负相关。中南半岛春季土壤湿度表现正异常时, 西太平洋夏季降水增加; 东印度洋夏季降水减少; 正异常时, 局地的蒸发偏大, 近地面湿度增大, 地面到大气的潜热通量增加; 地表反照率减小, 对太阳短波辐射的吸收更加强烈, 向上的短波辐射相应减少, 导致近地面温度降低, 感热通量和长波辐射减少, 使得海陆热力差异减小, 有利于季风加强, 季风爆发时间偏早, 从而导致从东印度洋的水汽输送往西太平洋, 增加西太平洋的降水; 反之亦然。

关键词: 中南半岛; 南海; 土壤湿度; 夏季降水

中图分类号: P466 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)03-0034-10

Effect of spring soil moisture in Indo-China Peninsula on summer precipitation over the South China sea and surrounding area

YOU Jiaxing^{1,2}, LI Jiangnan¹, ZHAO Yangjie¹, MAO Jiangyu³

- (1. School of Atmospheric Sciences//Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;
3. State Key Laboratory of Numerical Simulation of Atmospheric Sciences and Earth Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, the influence of the spring soil moisture in the Indo-China Peninsula was analyzed on summer precipitation over the South China Sea and surrounding area by using statistical methods like SVD. The results indicate that there exists obvious positive correlation between soil moisture and summer precipitation over the western Pacific Ocean and negative correlation between soil moisture and summer precipitation over the eastern Indian Ocean. Summer precipitation increased over the western Pacific and decreased over the eastern Indian Ocean when positive (negative) anomaly in soil moisture occurred over the Indo-China Peninsula. When soil moisture anomaly over the Indo-China Peninsula was positive, local evaporation increased, near surface humidity decreased, latent heat flux from ground to at-

* 收稿日期: 2017-03-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602701); 国家重点基础研究计划项目(2014CB953903); 国家自然科学基金(41275060)

作者简介: 游家兴(1993年生), 男; 研究方向: 气候分析与模拟; E-mail: 1269257509@qq.com

通信作者: 李江南(1968年生), 男; 研究方向: 气候分析与模拟; E-mail: essljn@mail.sysu.edu.cn

mosphere increased, surface albedo decreased, the absorption of solar shortwave radiation was strengthened, and upward shortwave radiation correspondingly decreased. This resulted in that near surface temperature decreased, sensible heat flux and long-wave radiation decreased, and the sea-land thermal difference reduced, which enhanced the monsoon and caused monsoon to occur earlier. Furthermore, that enhanced the transportation of water vapor from the eastern Indian Ocean to the western Pacific Ocean, and increased the precipitation in the western Pacific. The increase in near surface temperature will lead to the opposite precipitation mode, and vice versa.

Key words: Indo-China Peninsula; the South China Sea; soil moisture; summer precipitation

陆面过程包含地表反照率、土壤温度、土壤湿度等影响因子。陆面过程的变化会引起地面反照率的变化,导致辐射平衡调整,最后使得气候发生变化^[1-2]。土壤湿度是陆面过程的一个重要变量。Delworth & Manabe^[3]在 1988 年提出 SM (Soil Moisture Memory) 的概念,认为土壤湿度在时间尺度上有一定的持续性,SM 的记忆性会对降水的时间尺度产生作用^[4]。土壤湿度的异常可以持续足够长的时间从不同时间尺度上(不管是季节性还是年际变化上)来改变大气环流^[5]。

亚洲夏季风可能会受到春季亚欧大陆雪盖的影响,把亚洲夏季风和土壤湿度相关的雪盖联系在一起^[6];南亚地区土壤湿度和降水之间存在正反馈的关系^[7]。Yang & Lau^[8]运用 GLA GCM 模式研究热带海温和陆面过程的相互作用会影响亚洲副热带地区的冬春季节西风急流变化;参与全球陆-气耦合实验的 12 个耦合大气环流模式得到的结果已经被用来分析季节内土壤湿度和大气之间的相互关系^[9-10];土壤湿度对夏季降水的作用和 SST 作用一样甚至更大^[11]。这些地区大部分位于干旱和湿润的转换区;他们在研究中强调了蒸发的重要性。蒸发过程在很大程度上影响着降水的变化,是陆面过程影响大气的重要过程^[12-13]。

中南半岛与南海的纬向温度梯度能够在大尺度经向温度梯度影响夏季风产生修正作用^[14-15]。中南半岛与南海之间的热力差异是叠加在大尺度海陆热力差异背景之上的一种附加热力作用,对南海季风的爆发起着促发作用^[16-17]。中南半岛与南海热力差异的存在和中南半岛陆面过程存在这样一种关系:土壤湿度和降水的干异常致使中南半岛与南海低层温差减小,季风爆发后的强度减弱^[18-19]。中南半岛与南海的近地面温度差异在 5 月正负转换是南亚夏季风爆发的必要条件^[20]。

以上研究表明了土壤湿度在陆气作用过程中的重要性,中南半岛的陆面过程对南海季风有明显的影 响,但是中南半岛的土壤湿度对南海及周边地区

降水有什么影响还缺少研究。本文首先分析南海及周边地区夏季降水与中南半岛春季土壤湿度的关系,然后通过分析春季土壤湿度异常年大气环流和地表性质以及陆-气能量之间的转换差异,进一步探讨春季土壤湿度影响夏季降水的机制。

1 资料和方法

本文使用的土壤湿度资料来自欧洲中心的 ERA-Interim 再分析资料,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$;降水资料来自全球降水气候计划(GPCP-v2.2),该资料结合了卫星资料、探空资料和地面观测站的降水资料,分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;NCEP/NCAR 的第二代再分析月平均资料,时间长度都是 1979-2014 年。

在相关分析时,相关系数的矢量场被用来分析风场和近地面温度的相关,相关系数矢量场的定义如下:

$$R = R_{u\&t}i + R_{v\&t}j \quad (1)$$

其中, $R_{u\&t}$ 是 u 风和某个时间序列的相关系数场; $R_{v\&t}$ 是 v 风和某个时间序列的相关系数场; i 、 j 是经向和纬向上的单位矢量。

2 土壤湿度与夏季降水的相关性

选取 1979-2014 年中南半岛春季(3-5 月)的 0.1 m 深度层的土壤湿度为左场和包含南海周边地区的区域的夏季(6-8 月)降水为右场作 SVD 分析(图 1),第一模态占有所有方差贡献的 56%。中南半岛大部分区域的春季土壤湿度和南海及其周边地区的夏季降水有显著相关性,当中南半岛春季土壤湿度达到正异常时,热带东印度洋(EIO)夏季的降水表现为负异常,降水偏少,热带西太平洋(WP)夏季的降水出现正异常,降水偏多;反之一样。

选取中南半岛区域($10^\circ \sim 20^\circ \text{N}$, $95^\circ \sim 110^\circ \text{E}$, ICP)作为影响南海及其周边地区夏季降水的关键区。相关系数的分布形态(图 2)与图 1 相似,在 EIO 地区呈现负相关,在 WP 地区呈现出正相关。

ICP 区域春季 0.1 m 深度层的土壤湿度对 EIO 和 WP 区域夏季降水有显著影响。

分别选取 0.1, 1, 2 m 深度层的土壤湿度分别代表陆地表层, 中层和根区的土壤湿度, 3 层土壤湿度的时间变化趋势基本相同 (图略), 相关系数达到 0.94 以上, 因此, 本文都是用 0.1 m 深度层土壤湿度。

3 土壤湿度异常年的降水和环流特征

挑选春季土壤湿度标准化后绝对值大于 1 的年份来做合成分析 (图 3a)。大于 1 的高土壤湿度年 (HSM) 有: 1985, 1989, 1999, 2000, 2001, 2008 和 2011 年, 共 7 a; 而小于 -1 的低土壤湿度年 (LSM) 有: 1983, 1992, 1995, 1998, 2005 和 2010 年, 共 6 a。图 3b 是夏季土壤湿度标准化时间序列, 从春、夏季对比来看, HSM 年份在夏

季的土壤湿度为正距平, LSM 年份在夏季的土壤湿度为负距平, 春、夏土壤湿度序列的正相关性达到了 0.52, 显著相关。由此可以推断, 土壤湿度异常从春季到夏季有一定的持续性, 这为春季土壤湿度影响后续大气环流提供了一定的证据。

在 HSM 年 (图 4a), WP 区域的夏季降水大部分地区表现为正异常, 小部分地区出现微弱的负异常, 在 EIO 区域, 大部分地区夏季降水是负异常, 只有小部分微弱的正异常伸展到该区域。在 LSM 年 (图 4b), WP 区域的夏季降水表现为负异常, 但 EIO 区域是明显的正异常。这说明, 当中南半岛区域春季土壤表现得更湿润时, 东印度洋的夏季

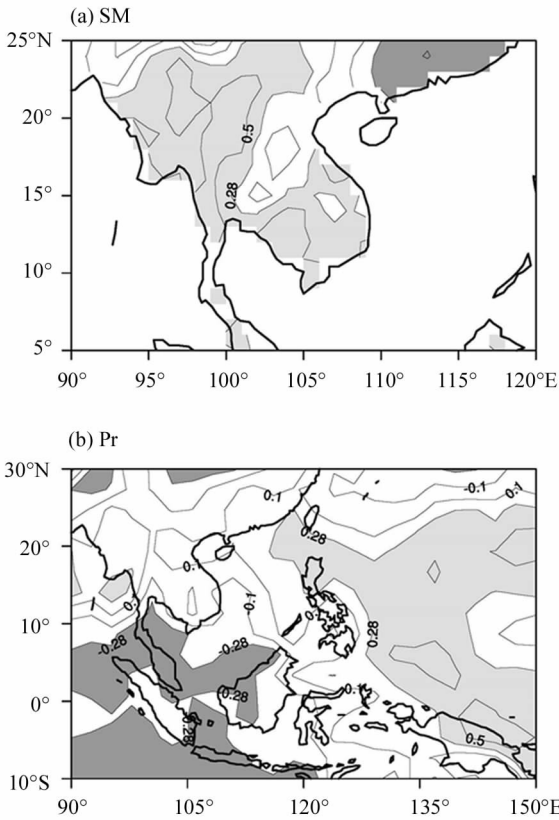


图 1 0.1 m 深度层土壤湿度和降水 SVD 分析第一模态异性相关系数, 填色区表示异性相关性超过 0.1 的显著性水平

Fig. 1 The first model correlation coefficient of the SVD analysis on soil moisture at 0.1 m depth layer and precipitation. The colored region represents the significance level of heterosexual correlation above 0.1

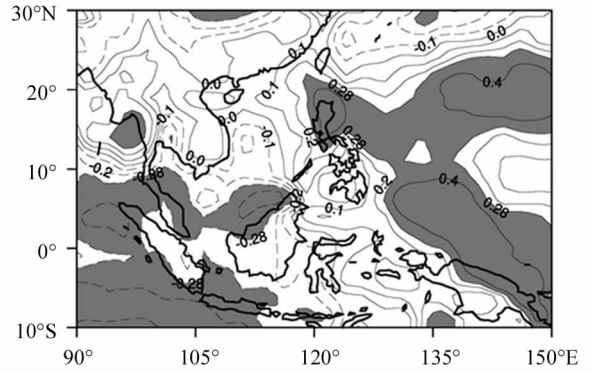


图 2 中南半岛 0.1 m 深度土壤湿度的区域平均和降水的相关系数, 阴影部分表示通过 0.1 的显著性水平检验
Fig. 2 The distribution of the correlation coefficient between regional averaged soil moisture at 0.1 m depth layer over Indo-China Peninsula and precipitation field. Shaded region represents that the correlation passed 0.1 significance level

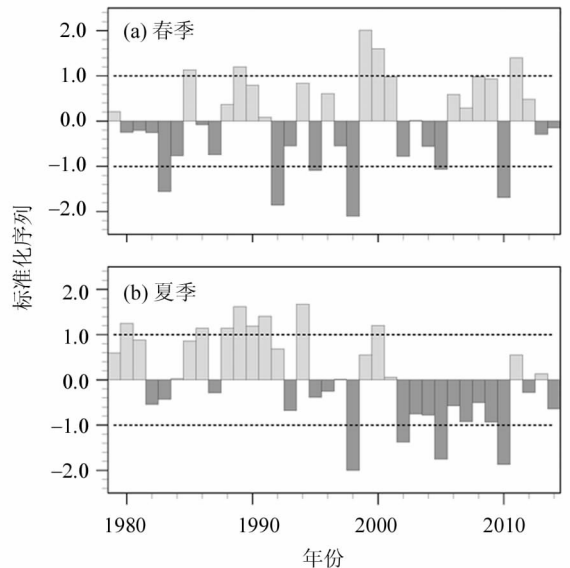


图 3 ICP 区域平均的土壤湿度标准化序列
Fig. 3 Standardized time series of regional averaged soil moisture over ICP

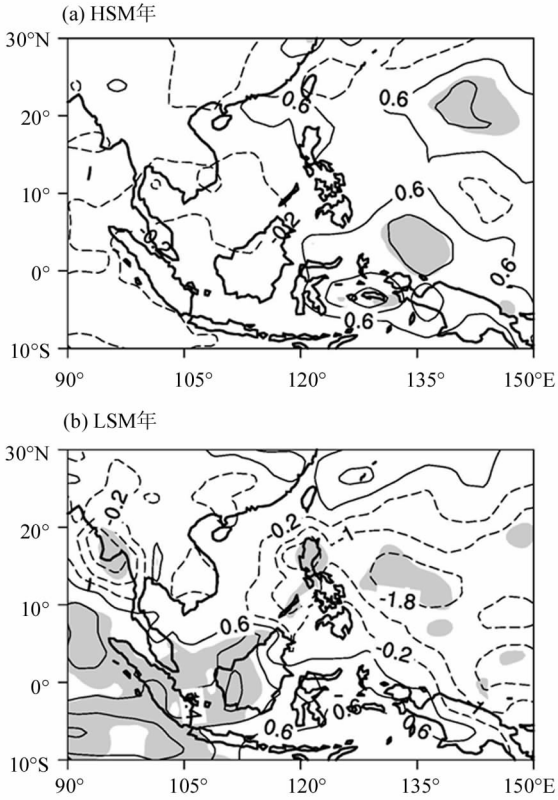


图 4 HSM 和 LSM 年的夏季降水距平场，阴影部分为通过 0.05 显著性检验区域（单位：mm/d）

Fig. 4 Summer precipitation anomalies on HSH and LSM years. Shaded region indicates that the area passed 0.05 significance level

降水偏少，西太平洋的夏季降水丰沛；反之亦然。

夏季 500 hPa 的位势高度场上来看，LSM 年（图 5b, d）的 588 线一直延伸到南海北部，控制范围很大，副热带高压对 LSM 年 WP 的夏季降水起到抑制作用；而 HSM 年（图 5a, c）的 588 线相对于 LSM 年向东撤退了 15 个经度，向北收缩了 10 个纬度，控制面积减小，这样副热带高压对西太平洋的季风期的降水影响不大。在 HSM 年 850 hPa 上（图 5c），距平气旋性环流出现在中国东部沿岸，有利于该地区降水的产生；在西太平洋的赤道附近地区，有异常偏西风 and 偏东南风的辐合，是降水可能发生的条件。而对于东印度洋靠近赤道地区西南风异常，且局部区域存在正的水平切变，说明该区域风场大范围表现为辐散，不利于降水的产生。在 200 hPa 上（图 5a），反气旋距平风场仍然出现在中国东部沿岸。而在西太平洋赤道地区则有一个辐散的异常，这样在该地区低层辐合、高层辐散，对流活跃，也有利于降水的产生。对于 LSM 年，低层的中国东部洋面表现为一个大尺度的反气旋性异常（图 5d），并且和 588 线覆盖的区域重合，整个区域被高压异常控制，高层表现为气旋式异常（图 5b），容易产生下沉运动，不利于水汽向上输送。而在 850 hPa 西太平洋赤道附近地区被东风异常控制，东风异常一直西伸到东印度洋，与来自孟加拉湾的西北风异常相遇，在东印度洋赤道地

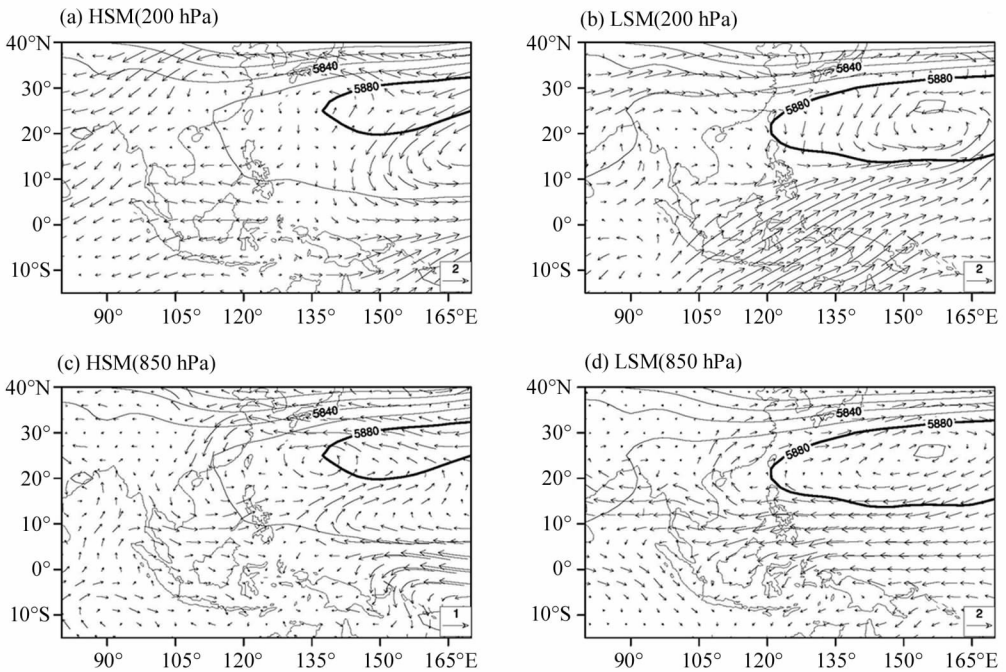


图 5 HSM 年和 LSM 年的距平风场（箭头，单位：m/s）和 500 hPa 位势高度场（等值线，单位：gpm）

Fig. 5 Wind velocity anomalies (unit: m/s) and geopotential height at 500 hPa

(Contour line indicates, unit: gpm) in HSM and LSM years

区产生辐合, 在 200 hPa 高层风场辐散, 有利于上升运动发展, 产生降水。

此外, 在 HSM 年, 东南亚地区高层东北风异常, 低层偏西风异常, 季风加强; 而在 LSM 年, 高层是较大的西南风异常, 低层是偏东风异常, 季风减弱。

4 土壤湿度影响夏季降水的物理过程

地表的热力条件能够通过影响夏季风的发展从而作用到降水^[21]。中南半岛陆面过程的不同状态通过中南半岛与南海地区的温度梯度对南海夏季风造成影响^[22]。地表温度和土壤湿度在年际变化的趋势上位相几乎都是相反的 (图 6), 相关系数有 -0.65 , 通过 99% 的显著性检验。而地表温度和地面辐射、蒸发有关, 陆面过程能够通过辐射来影响大气状态。也有研究指出土壤湿度的变化对地表能量通量有显著的影响^[19]。因而土壤湿度作为陆面过程的主要参数, 它的变化可以影响陆-气之间能量和水文上的交换。

从图 6 看出, 5 月地表温度和整个春季地表温度很相似, 5 月又是南海夏季风爆发的关键时期, 因此, 5 月既能承接春季土壤湿度的作用, 同时又能在后期影响夏季降水, 是研究春季土壤湿度影响夏季降水物理过程的关键期。

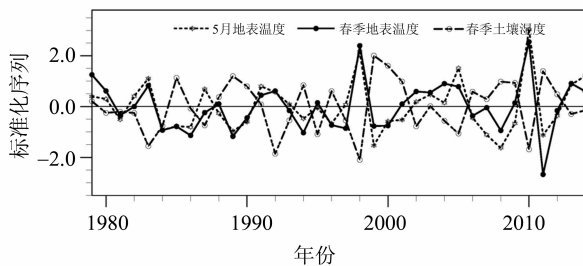


图 6 ICP 区域春季土壤湿度、地表温度和 5 月地表温度区域平均标准化时间序列

Fig. 6 Spring soil moisture, surface temperature over ICP and standardized time series of regional averaged land surface temperature in May

4.1 地表辐射

地表的长波与短波辐射是陆-气能量交换的主要过程。图 7 是 5 月份长波辐射和短波辐射分别在 HSM 年与 LSM 年的差值, 长波辐射差值在中南半岛北部地区为负值中心 (图 7a), 与土壤湿度的显著负相关完全覆盖了中南半岛及其周边区域, 中南半岛的土壤湿度对局地的长波辐射有明显影响。短

波辐射在中南半岛的差值分布也表现出了类似长波辐射的差值场分布 (图 7b), 中心位于中南半岛; 而中南半岛附近是负值区, 但是负值中心强度不大, 同时与土壤湿度的显著负相关只是在中南半岛西部和北部地区。

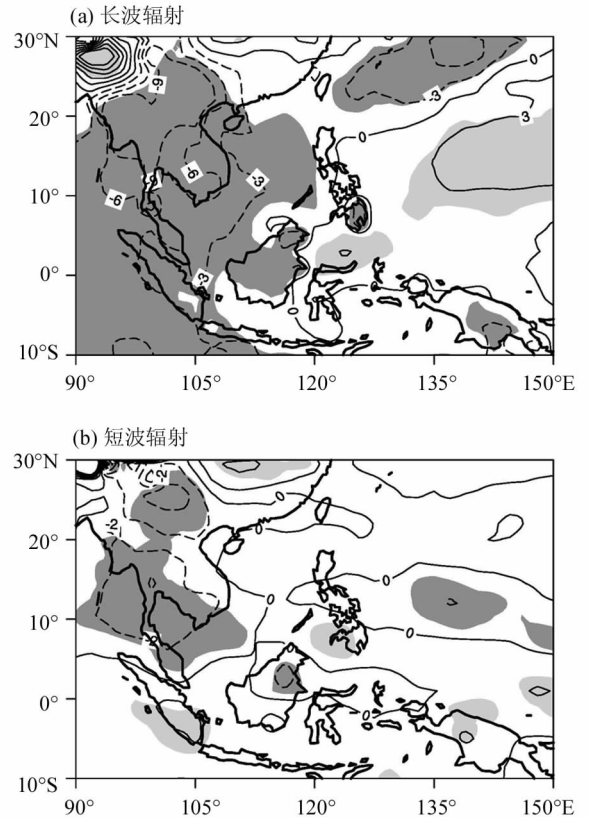


图 7 HSM 与 LSM 年 5 月份差值, (a) 长波辐射; (b) 短波辐射 (单位: W/m^2), 阴影部分表示差值与 SM 相关性超过 0.1 显著性水平

Fig. 7 Longwave radiation (a) and shortwave radiation (b) differences in May between HSM and LSM years. (unit: W/m^2). Shaded region indicates that the correlation between the variable and SM passed 0.1 significance level

5 月份长波辐射和短波辐射在年际变化上与春季土壤湿度存在反相位的关系 (图 8), 长波辐射和短波辐射分别与春季土壤湿度的相关性都在 0.4 以上, 这与图 7 一致。也就是说, 在春季土壤湿度的正 (负) 异常年, 后续时间的长波辐射和短波辐射都会表现为负 (正) 异常。长波辐射和短波辐射的这种响应与 Delworth 等^[23]的研究相符, 原因在于地表的反照率和表层土壤水容量成反比, 更湿 (干) 的土壤将会减小土壤反照率, 从而吸收更多的短波辐射^[24]。

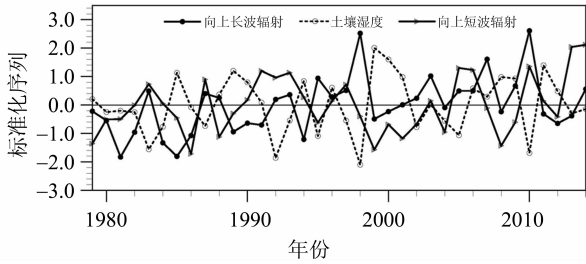


图 8 ICP 区域 5 月份向上长波辐射、向上短波辐射和春季土壤湿度的标准化序列

Fig. 8 Standardized time series of upward longwave radiation, upward shortwave radiation and spring soil moisture in May over ICP

4.2 感热通量和潜热通量

5 月份潜热通量的零等值线包围中南半岛东南部地区 (图 9a), 西北部则表现为正值中心, 此处的潜热通量与春季土壤湿度的相关性也是正值, 并且和相关系数通过 90% 显著性检验的区域基本重合, 对比图 1, 通过显著性检验的中南半岛西北部地区也对应感热潜热变化最明显的区域。感热通量在中南半岛的分布 (图 9b) 与潜热通量类似, 但数值相反, 西北部是负值中心, 中心强度也更大, 负相关的显著区域也基本和负值中心重合。可见, 当中南半岛春季土壤湿度表现为正 (负) 异常时, 该区域大部分地区 5 月份的潜热通量表现是弱的正 (负) 异常, 而感热通量则表现为较强的负 (正) 异常, 能量在陆 - 气之间的传递的年际变化更多地依靠感热的作用。

有研究指出南海北部的对流会因为孟加拉湾季风爆发期间其上的对流活动而加强, 因此南海北部的凝结潜热释放会在孟加拉季风爆发期间增加, 对南海季风的爆发产生影响^[19-20]。对流活动的加强还意味着降水的增多, 土壤湿度的加大, 因此, 虽然土壤湿度变化不能作为春末的潜热通量变化的主要因子, 但是春季的土壤湿度可能与整个春季的潜热通量有很好的相关性。潜热通量差值场的一个中心同样位于 ICP 区域的西北部 (图 10), 和春末潜热通量不同的是, 春季潜热通量的差值场在 ICP 区域不存在 0 等值线, 而完全被正值所主导。同时, 春季土壤湿度场和春季的潜热通量场区域平均的标准化序列的相关性达到 0.54, 通过了 99% 的显著性检验。由此可知, ICP 区域潜热通量的释放可能和土壤湿度的变化具有同步性, 并不是土壤湿度对后续潜热通量变化有主导作用。

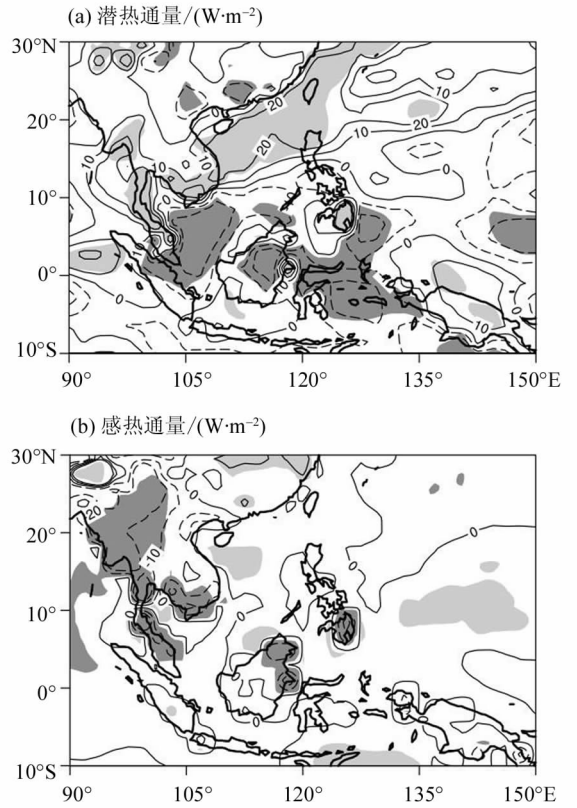


图 9 HSM 与 LSM 年 5 月份差值, (a) 潜热通量; (b) 感热通量, 阴影部分表示差值与春季 SM 相关性超过 0.1 的显著性水平

Fig. 9 Differences of the latent heat flux (a) and sensitive heat flux (b) in May between HSM and LSM years (unit: W/m^2). Shaded region represents the correlation between the variable and spring SM passed the 0.1 significance level

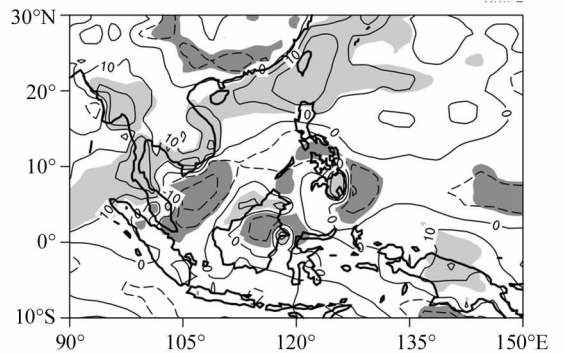


图 10 HSM 年和 LSM 年春季潜热通量的差值 (单位: W/m^2), 阴影部分表示差值与春季 SM 相关性超过 0.1 的显著性水平

Fig. 10 The difference on the latent heat flux between HSM and LSM years (unit: W/m^2). The shaded region represents the correlation between latent heat flux and spring SM passed 0.1 significant level

4.3 温湿场

土壤湿度可以通过蒸发作用来影响大气状态^[25], 而蒸发作用也会影响近地面的大气相对湿度大小。5 月份大气的近地面相对湿度在 ICP 区域的差值场表现为正值 (图 11), 正值中心位置偏西北。联系土壤湿度的相关性分布可以得到, 局地的近地面相对湿度对春季土壤湿度的变化有正响应, 偏多的春季土壤湿度会带来更多的地面蒸发。

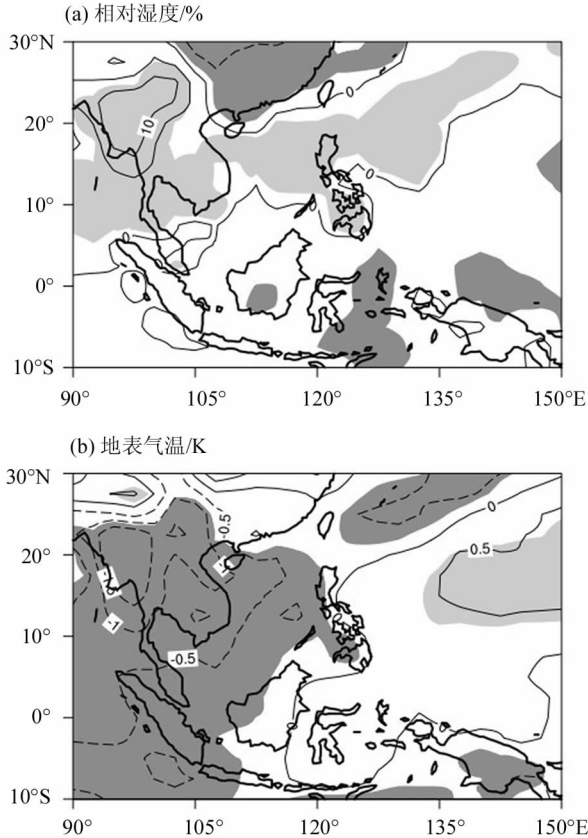


图 11 HSM 与 LSM 年 5 月差值相对湿度和地表气温, 阴影部分表示差值与 SM 相关性超过 0.1 的显著性水平

Fig. 11 The differences on the relative humidity and surface temperature in May between HSM and LSM years. The shadowed region represents the correlation between the variable and spring SM passed 0.1 significant level

以上考虑了陆-气之间能量的转化, 表现在大气上的结果就是近地面温度的变化, 气温的变化是春季土壤湿度对大气作用最直观的体现。对于近地面气温 (图 11b) 在 HSM 年和 LSM 年的差值场, 整个中南半岛被负的差值所覆盖, 差值中心位置同样在中南半岛西北部地区, 并且中南半岛也属于通过显著性检验的负相关区域, 局地近地面气温和土壤湿度的相关系数有 -0.73 。

综上所述, ICP 区域春季土壤湿度异常会带来两方面影响: 一方面, ICP 区域的春季土壤湿度的正异常会导致春末局地的太阳反照率减少, 吸收更多的短波辐射, 向上短波辐射相应减小, 能量由陆地向大气转移减少; 另一方面, 地面水汽含量的上升导致蒸发增多。因而春末近地面大气的温度会有相应的降低, 同时向上长波辐射和感热通量都减小; 反之亦然。

5 土壤湿度异常对南海夏季风的影响

中南半岛区域和南海之间的低层温差异常会影响南海夏季风的活动^[18-19]。为判断季风强度和温差之间的关系, 选取张庆云等定义的东亚夏季风指数^[26]与中南半岛区域和 5 月份南海的区域平均温差做相关性分析, 其中南海区域选取的范围是 ($10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$), 得到如图 12 所示的东亚夏季风指数和温差的标准时间序列, 两者的相关系数为 -0.47 , 通过了 99% 显著性检验。在 5 月份温差较大时, 东亚夏季风会表现得较弱。5 月份温差和土壤湿度的相关性达到 -0.44 , 通过 99% 显著性检验。温差与土壤湿度的这种负相关性在图 11b 中也能分析得到: 中南半岛是近地面温度 HSM 年和 LSM 年的差值中心, 而南海区域虽然有同样的负相关, 但在绝对值上较小, 说明局地近地面气温对土壤湿度的负反馈更强, 当土壤湿度增大时, 中南半岛的近地面温度的下降上升幅度比南海区域要大一些, 两地的温差相应会偏小; 反之亦然。

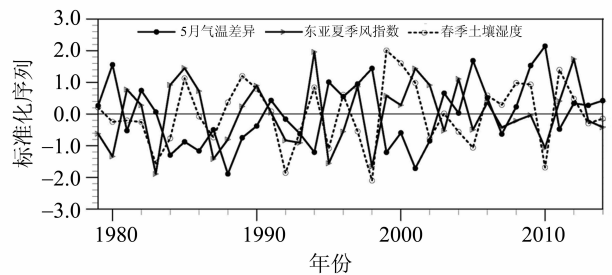


图 12 土壤湿度区域平均、东亚夏季风指数以及 5 月份中南半岛与南海区域的近地面区域平均气温差的标准时间序列

Fig. 12 The standardized time series of regional average soil moisture, summer monsoon index in East Asia, and the difference of regional average surface temperature over the South China Sea

既然近地面气温和季风指数有很好的相关性，那也会对环流产生影响。在 HSM 年，位势高度在南海及其周边地区的大范围内的位势高度都要比 LSM 年的位势高度小（图 13a），特别是在中国东南部海域，是差值场的低值中心，说明在 HSM 年该区域的气旋性活动要比 LSM 年更加活跃。位势高度相关场在南海及周边地区大范围表现出显著的正相关性（图 13b），特别在 10° ~ 30°N 的条状区域内。

正值中心位置在（25°N，150°E）附近，与图 13a 的差值场负值中心位置较吻合。可见春季土壤湿度、春末近地面温度和夏季位势高度三者是一致的。根据公式 1 计算，图 13b 中在经向上，正相关

是东风；在纬向上，正相关是南风。通过显著性检验的相关性矢量同样位于 10° ~ 30°N 纬度范围内，整体上表现为反气旋式的相关性矢量场，前面分析指出春季土壤湿度和温度有非常好的负相关，这就会造成低纬 30°N 附近降水在 HSM 年和 LSM 年的差异；10° ~ 20°N 之间的矢量有明显的统一性，这说明该区域风带受近地面气温的影响很大，土壤湿度的异常很大程度上会决定该区域内的风场方向。该区域的 850 hPa 水平风场对高低湿度年的敏感性较高，决定了辐合异常的位置：HSM 年的东风异常弱，西风异常强，辐合偏东；LSM 年则东风异常强，辐合偏西到达东印度洋。这样就造成了赤道附近降水的差异。另外，东风带覆盖了 ICP 区域，说明当 ICP 局地气温因土壤湿度降低而升高时，局地的低空风会有阻碍季风发展的东风异常，从而削弱西南季风，考虑图 12 中 ICP 区域和南海区域温差与东亚夏季风的负相关性，ICP 和南海之间的温度梯度在土壤湿度降低的情况下表现正异常，从而低层的海风异常加强，同样不利于西南季风的爆发与发展。

综合已有的对南海夏季风爆发指数的研究方法^[27-28]，对比以上 3 个指数得到的爆发优势候序列，同一年中挑选出现频率高的爆发候形成的序列为爆发优势候序列。从图 14 中能够看出，HSM 年对应的南海夏季风爆发时间分别为 30 候、28 候、24 候、26 候、26 候、25 候、29 候，平均爆发时间是 26.8 候，早于气候平均的爆发时间 28 候；而 LSM 年对应的爆发时间为 29 候、30 候、27 候、28 候、29 候、29 候，平均爆发时间为 28.7 候，晚于气候平均爆发时间。此外将爆发时间和春季 SM 做相关分析得到两者的相关性系数达到 -0.34，通过

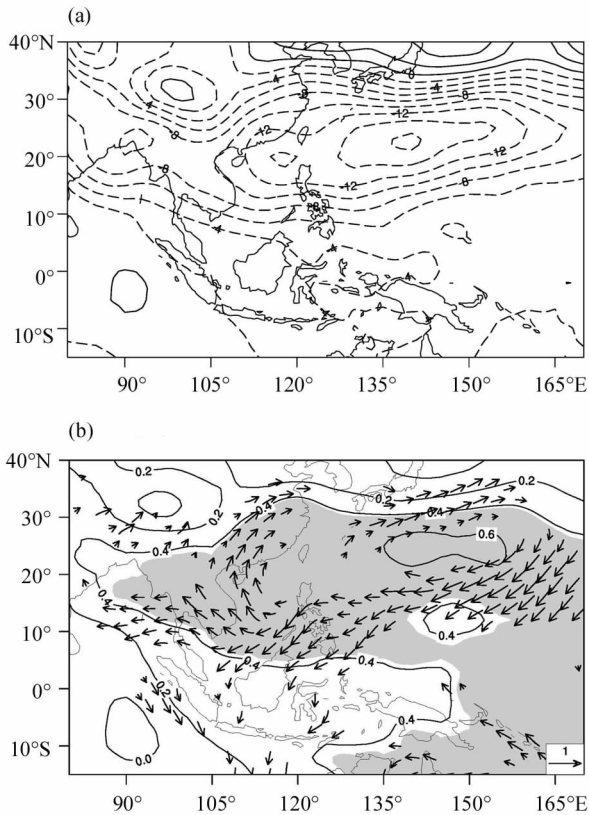


图 13 (a) HSM 与 LSM 年夏季 850 hPa 位势高度差值；(b) 近地面气温与夏季 850 hPa 位势高度（等值线，阴影区域表示显著性水平超过 0.01）和风场的相关场（箭头，只显示超过 0.1 显著性水平）

Fig. 13 (a) The differences on Geopotential height difference at 850 hPa between HSM and LSM years; (b) correlation fields of near surface temperature with geopotential height at 850 hPa in summer (contour line, shadowed region represents significance level above 0.01) and wind velocity at 850 hPa (vector, only showing vectors passed 0.1 significance level)

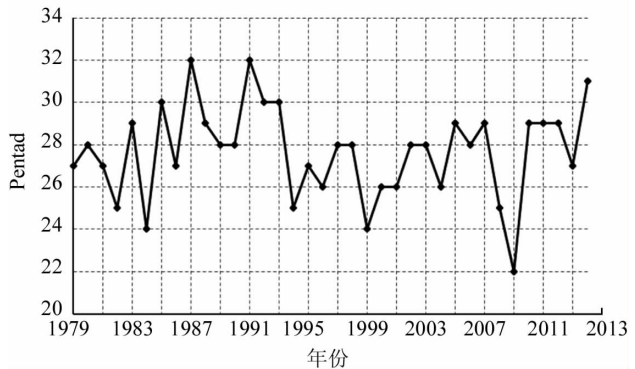


图 14 南海夏季风爆发优势候
Fig. 14 The outbreaking superiority pentad of the South China Sea summer monsoon

95% 的显著性检验。李青等^[25]研究表明, ICP 和 SCS 的热力差异由正转负是南海夏季风爆发的一个必要条件, 在 HSM 年, ICP 近地面温度减小, ICP 和 SCS 热力差异更容易从正变为负; 在 LSM 年, ICP 近地面温度偏高, 不利于两者热力差异符号由正转为负。因此, 受热力差异的影响, 在 HSM 年南海夏季风爆发偏早, 而在 LSM 年, 南海夏季风爆发偏晚。

6 结 论

本文通过 SVD 分析和相关性分析的方法, 得到 ICP 区域春季土壤湿度异常影响南海及其周边地区夏季降水的模态: 当春季土壤湿度表现为正异常时, 西太平洋近南海地区降水较正常年偏多, 东印度洋近南海地区则降水偏少, 偏少的程度不大; 相反地, 偏干的土壤湿度给西太平洋带来了夏季降水的减少, 降水减少的区域缩小, 东印度洋夏季降水增加, 而且比气候态降水偏离的幅度更大, 范围比偏湿年更广, 延伸到西太平洋区域。针对这种正负偶极子的降水模态, 将土壤湿度典型的干湿年挑选出来分为 HSM (干) 共 7 a 和 LSM (湿) 共 6 a, 合成分析表明, 环流场的配置是夏季降水这种偶极子模态产生的直接原因。

ICP 区域春季的土壤湿度正异常对后续春末局地的近地面温度有降低作用, 主要的过程有: 湿润的地面蒸发更加活跃, 近地面水汽增加, 地面到大气的潜热通量增加; 偏多的土壤湿度使得地表的反照率减小, 对太阳短波辐射的吸收更加强烈, 向上的短波辐射相应减少。最后造成近地面温度降低, 感热通量和长波辐射减少。在土壤湿度负异常年, 作用相反。

五月份是南海夏季风爆发的关键时期, 在这个时期内, 副热带高压控制在南海地区。春末 ICP 区域近地面温度在对大气环流的影响中扮演着重要角色, 土壤湿度正异常时, 春末低层气温偏低, ICP 区域和南海区域之间的低层温度差异表现为负异常, 有利于西南风跨过 ICP 进入南海区域形成南海季风, 这样的西南季风偏强, 副热带高压东退, 西南风携带丰沛的水汽在中国的东南洋面形成降水。在西太平洋赤道附近也会与高压边缘的东风相遇, 形成上升气流, 降水也增多。水汽的这种向东输送能解释 ICP 区域的土壤湿度和局地潜热正相关关系不是很好的原因: 增多的水汽会被输送走, 潜热的增加就不会很明显。而当春季 ICP 土壤湿度偏低导致局地的低层气温偏高时, 海陆的温差出现正异

常, 不利于西南风进入南海区域, 会在东印度洋附近滞留更长时间, 容易造成该地区更长时间的降水, 降水偏多; 而副热带高压控制着西太平洋的大部分区域, 降水减少。

在春季土壤湿度偏高的情况下, 近地面温度偏低, ICP 和 SCS 海陆热力差异减小, 有利于季风加强, 同时南海夏季风爆发偏早, 有利于东印度洋的水汽提前输送到西太平洋, 从而导致东印度洋的夏季降水偏少, 西太平洋的夏季降水偏多; 反之一样。

参考文献:

- [1] CHARNEY J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. *Quart J R Meteor Soc*, 1975, 101(428): 193 - 202.
- [2] CHARNEY J, QUIRK W J, CHOW S H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, 34(9): 1366 - 1385.
- [3] DELWORTH T L, MANABE S. The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate [J]. *Journal of Climate*, 1988, 1(5): 523 - 547.
- [4] KOSTER R D, SUAREZ M J. The influence of land surface moisture retention on precipitation statistics [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(9): 2551 - 2567.
- [5] SHUKLA J, MINTZ Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. *Science*, 1982, 215(4539): 1498 - 1501.
- [6] BARNETT T P, DUMENIL L, SCHLESE U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 661 - 685.
- [7] MEEHL G A. Influence of the land surface in the Asian summer monsoon: External conditions versus internal feedbacks [J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(7): 1033 - 1049.
- [8] YANG S, LAU K M. Influences of sea surface temperature and ground wetness on Asian Summer Monsoon [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(12): 3230 - 3246.
- [9] KOSTER R D, DIRMEYER P A, GUO Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 2004, 305(5687): 1138 - 1140.
- [10] KOSTER R D, SUD Y C, GUO Z, et al. GLACE: the global land-atmosphere coupling experiment. Part I: Overview [J]. *J Hydrometeor*, 2006, 7(4): 590.
- [11] ORLOWSKY B, SENEVIRATNE S I. Statistical analyses of land-atmosphere feedbacks and their possible pitfalls [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(14): 3918 - 3932.

- [12] FINDELL K L, GENTINE P, LINTNER B R, et al. Probability of afternoon precipitation in eastern United States and Mexico enhanced by high evaporation [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7):434-439.
- [13] ASHARAF S, DOBLER A, AHRENS B. Soil moisture-precipitation feedback processes in the Indian summer monsoon season [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(5):1461-1474.
- [14] 刘屹岷, 陈仲良, 毛江玉, 等. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I: 个例分析[J]. *气象学报*, 2003, 61(1):1-9.
LIU Y M, CHEN Z L, MAO J Y, et al. Impacts of the onset of the bay of Bengal monsoon on the onset of the South China Sea monsoon. Part I: A case study [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(1):1-9.
- [15] 刘屹岷, 陈仲良, 吴国雄. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 II: 数值试验[J]. *气象学报*, 2003, 61(1):10-19.
LIU Y M, CHEN Z L, WU G X. Impacts of the onset of the bay of Bengal monsoon on the onset of the south china sea monsoon. Part II: Numerical experiments [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(1):10-19.
- [16] 王世玉, 钱永甫. 1998 年地面加热场的基本特征及其与南海夏季风爆发的可能联系[J]. *气象学报*, 2001, 59(1):31-40.
WANG S Y, QIAN Y F. Basic characteristic of surface heat field in 1998 and the possible connections with the SCS summer monsoon onset [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(1):31-40.
- [17] 任雪娟, 钱永甫. 局地海陆热力对比对南海夏季风爆发影响的数值试验[J]. *热带气象学报*, 2002, 18(4):327-334.
REN X J, QIAN Y F. Numerical simulation experiments of the impacts of local sea-land thermodynamic contrasts on the SCS summer monsoon onset [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2002, 18(4):327-334.
- [18] 郑彬, 蒙伟光. 2004 年南海夏季风的爆发及中南半岛陆面过程的可能影响 I 诊断分析[J]. *气象学报*, 2006, 64(1):72-80.
ZHEN B, MENG W G. The features of south China sea summer monsoon onset of 2004 and the possible effects of land-surface process in Indo-China Peninsula I: Diagnostic study [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(1):72-80.
- [19] 蒙伟光, 郑彬. 2004 年南海夏季风的爆发及中南半岛陆面过程的可能影响 II: 数值试验[J]. *气象学报*, 2006, 64(1):81-89.
MENG W G, ZHEN B. The features of south china sea summer monsoon onset of 2004 and the possible effects of land-surface process in Indo-China Peninsula II: Numerical simulation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(1):81-89.
- [20] 刘宣飞, 李青, 何金海, 等. 中南半岛与南海热力差异对南海夏季风爆发的影响[J]. *气象学报*, 2009, 67(1):100-107.
LIU X F, LI Q, HE J H, et al. Effects of the thermal contrast between Indo-China Peninsula and South China Sea on SCS monsoon onset [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(1):100-107.
- [21] XUE Y, JUANG H M H, LI W P, et al. Role of land surface processes in monsoon development: East Asia and West Africa [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D3):215-229.
- [22] AMENU G G, KUMAR P, LIANG X Z. Interannual variability of deep-layer hydrologic memory and mechanisms of its influence on surface energy fluxes [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(23):5024-5045.
- [23] DELWORTH T, MANABA S. Climate variability and land-surface processes [J]. *Advances in Water Resources*, 1993, 16(1):3-20.
- [24] IDSO S B, JACKSON R D, REGINATO R J, et al. The dependence of bare soil albedo on soil water content [J]. *J Appl Meteor*, 1975, 14(1975):109-113.
- [25] DIRMEYER P A, SCHLOSSER C A, BRUBAKER K L. Precipitation, recycling, and land memory: an integrated analysis [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(1):278-288.
- [26] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. *气象学报*, 2003, 61(5):559-568.
ZHANG Q Y, TAO S Y, CHEN L T. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(5):559-568.
- [27] 贺海晏, 温之平, 简茂球, 等. 1982-1996 年亚洲热带夏季风建立迟早的探讨 I——热带季风环流的主要特征和季风建立指数[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, 39(1):91-96.
HE H Y, WEN Z P, JIAN M Q, et al. A Study on the onset of the Asian summer monsoon during 1982-1996, PART I: Basic features of the Asian summer monsoon circulation and its onset index [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39(1):91-96.
- [28] 梁建茵, 吴尚森, 游积平. 南海夏季风的建立及强度变化[J]. *热带气象学报*, 1999, 15(2):97-105.
LIANG J Y, WU S S, YOU J P. The research on variations of onset time of the SCS summer monsoon and its intensity [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 15(2):97-105.