

李崇银, 刘会荣, 宋洁. 2013. 2009/2010 年冬季云南干旱的进一步研究——前期土壤湿度影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 551–561, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12057. Li Chongyin, Liu Huirong, Song Jie. 2013. Further study of Yunnan drought during the 2009/2010 winter: Numerical simulation of impact of antecedent soil moisture [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 551–561.

2009/2010 年冬季云南干旱的进一步研究 ——前期土壤湿度影响的数值模拟

李崇银^{1,2} 刘会荣^{1,3} 宋洁¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院研究生大学, 北京 100049

摘 要 采用新一代中尺度数值模式 WRFv3.2 版本, 模拟研究了前期 (秋季) 土壤湿度异常对云南冬季降水的影响。数值模拟试验结果和一系列分析清楚表明, 前期 (秋季) 土壤湿度的异常偏低, 会导致云南地区冬季 (12 月 1 日~2 月 28 日) 降水的显著减少; 前期土壤湿度减少一半, 可以使云南冬季的降水量平均减少 30% 以上, 小部分地区减少达 50% 以上, 影响十分明显。大气环流及其主要参量模拟结果的对比分析清楚表明, 持续的西偏北气流和干气团的控制以及云南地区大气散度场和垂直运动场等的异常是导致降水量减少的直接原因。对降水过程的分析表明, 前期土壤湿度减少对降水过程的频次和发生时间的影响较小, 但对各次过程的降水强度影响明显。这是前期土壤湿度减少所导致的包括区域性蒸发量和热通量等大气物理过程的改变决定的。本研究数值模拟结果与关于区域性土壤湿度异常影响机理的已有结论基本一致。

关键词 前期土壤湿度 云南 冬季降水 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0551-11

中图分类号 P461⁺.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12057

Further Study of Yunnan Drought during the 2009/2010 Winter: Numerical Simulation of Impact of Antecedent Soil Moisture

LI Chongyin^{1,2}, LIU Huirong^{1,3}, and SONG Jie¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The impact of anomalous antecedent soil moisture (in autumn) on the winter precipitation in Yunnan Province is investigated using the latest version of the mesoscale numerical model WRFv3.2. The simulated and analyzed results clearly show that the precipitation in Yunnan Province in winter (December 1–February 28) can be significantly reduced by unusually low antecedent soil moisture. The impact of the reduced antecedent soil moisture is so dramatic that the average reduction in precipitation is greater than 30% when the antecedent soil moisture is reduced to half that under normal conditions. In some regions, this number can even exceed 50%. Comparative analyses of the atmospheric circulation and major variable fields clearly indicate that a persistent northwest flow (dry air mass), an anomalous

收稿日期 2012-04-03 收到, 2013-03-14 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 U08333602

作者简介 李崇银, 男, 1940 年出生, 研究员, 主要从事热带气象及天气气候动力学的研究。E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

divergence, and the vertical velocity fields over Yunnan Province contribute directly to the reduced precipitation. By analyzing the precipitation events, the authors find that the precipitation intensity of every event is strongly influenced by the reduced antecedent soil moisture, whereas the frequency and timing of the precipitation events are affected less. This is related to the variability of physical processes in the atmosphere, including regional evaporation and thermal flux, that is caused by the reduced antecedent soil moisture. The simulation results of this study are consistent with previous results on the climatic impact of anomalous regional soil moisture.

Keywords Antecedent soil moisture, Yunnan Province, Winter precipitation, Numerical simulation

1 引言

已有的研究表明,无论是华北还是长江流域,干旱的发生都与一定形式的海温异常强迫有关(李崇银, 1992; 卫捷等, 2004; 黄荣辉等, 2005; 陈文等, 2006); 也与大气环流的内部异常, 尤其是副热带高压和中纬度阻塞高压的强度和位置异常有关(张庆云等, 2003; 彭京备等, 2007); 而气候系统的年代际变化也被认为是干旱灾害发生的原因之一(Li and Xian, 2003; 周连童和黄荣辉, 2006)。

云南主要处于南亚季风控制区, 其气候基本表现为旱季和湿季的显著特征, 平均来讲 5~10 月降水较多为湿季, 11~4 月降水较少为旱季(秦剑等, 1997)。由于季风活动变化性较大, 云南及其附近地区是我国干旱发生最为频繁的地区之一。2009/2010 年的秋、冬季云南发生了极为严重的干旱, 仅就冬季而言, 2009/2010 年的冬季云南(122 个站平均)干旱是近 50 年(1961/1962~2009/2010 年)冬季中最为严重的, 冬季平均降水距平百分率超过 -40% (图 1), 而 2009 年 12 月和 2010 年 1 月的距平百分率都超过 -60%。从 2009/2010 年冬季全国的降水量距平图也可以看到, 该年冬季云南是全国干旱情况最为严重的地区(图略)。

关于 2009/2010 年冬季云南干旱的发生原因, 已有一些研究从海温异常强迫以及大气环流系统的异常作用等不同角度进行了一些探讨。例如, 杨辉等(2012)的研究认为 2009/2010 年冬季云南干旱的发生有与过去干旱发生相同的大气环流背景, 即都处于北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)为负位相的背景下, 从欧洲东部到里海以及青藏高原为正距平, 贝加尔湖为负距平, 使云南处于脊前干燥的西北气流控制下。然而与以往干旱不同是, 2009/2010 年冬季欧洲东部到里海以及青藏高原上的高压脊发展更为强烈; 中东地区副热带西风急流减弱, 影响 Rossby 波的活动, 从而不利于青藏高原—孟加拉湾槽的建立, 进而对低层水汽输送进入云南起到抑制作用。同时, 他们的分析表明, 若根据历史资料分析的云南省冬季降水和海温关系, 仅从 2009/2010 年冬季海温异常的角度分析, 尤其是从太平洋的海温异常形势(在赤道中东太平洋存在持续的海温正异常), 2009/2010 年冬季云南省降水应属于偏多的情况。因此可以认为, 虽然海温异常可以影响冬季的云南降水, 但海表温度异常并不是 2009/2010 年冬季云南降水偏少的直接原因。宋洁等(2011)的研究认为 2009/2010 年的冬季极强的负 NAO 事件可能是该冬季云南出现严重干旱的重要原因之一。因为它一方面使北方冷空

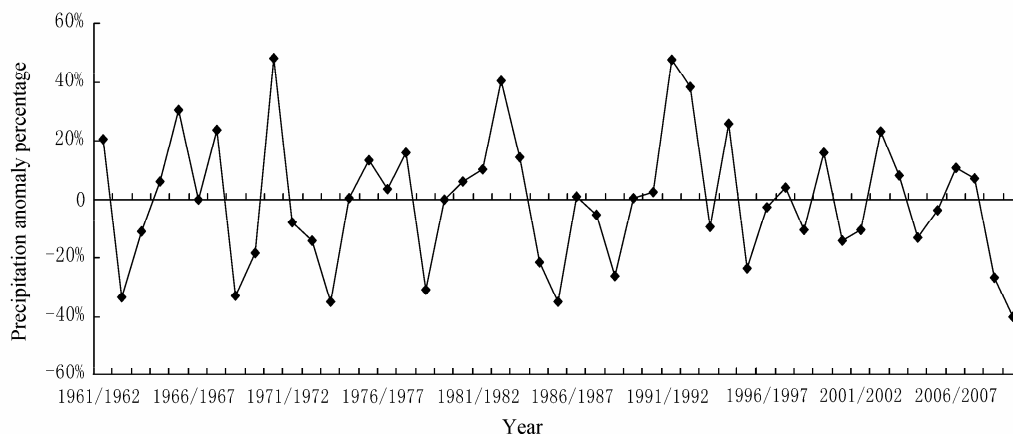


图 1 1961/1962~2009/2010 年冬季(12~2 月)云南 122 站平均的降水量距平百分率

Fig. 1 Averaged precipitation anomaly percentage in Yunnan (122 stations) during winter (December to February) from 1961/1962 to 2009/2010

气活动偏东, 不易到达云南地区; 同时还使得南支槽偏弱, 暖湿气流也就不容易到达云南地区。而 Yang (2011) 关于北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 异常与我国南方气候关系的研究表明了 AO 状况的重要性, 也可将 AO 变化作为 2009/2010 年冬季云南干旱的一个影响因子, 因为 2009/2010 年冬季北半球 AO 出现了极其强的负异常。

另一方面, 2009 年云南自秋季就出现了大范围的较为严重的干旱 (晏红明等, 2012), 图 2 给出了 2009 年云南省秋季 (9~11 月) 降水的距平异常。图中结果清楚表明云南大部分地区秋季降水量距平百分率在一 40% 以上。持续的干旱必然因强烈的蒸发导致大范围土壤湿度的降低, 土壤湿度的降低可能进一步加剧云南省的干旱状况。早在 20 世纪 80 年代, Shukla and Mintz (1982) 利用数值模拟试验表明, 全球性土壤湿度的变化将引起极为显著的气候响应。其后 Yeh et al. (1984) 的研究 (在 3 个纬度带内分别考虑土壤达到饱和) 进一步表明, 大面积的土壤湿度改变对大气环流和气候所产生的影响都明显超过两个月以上, 而不同纬度带土壤湿度改变的影响还有所差异。王万秋等 (1991) 的研究表明, 与土壤温度异常一样土壤湿度异常也可以对短期气候有明显影响, 且其影响还可以以长波波列形式向外传播。在关于土壤含水量初值敏感性的试验研究中, 林朝晖等 (2001) 指出由于土壤含水量的降低会使得地表净辐射减少、潜热通量减少、感热通量增加, 从而使土壤含水量初值在气候模拟, 尤其是对于江淮流域的气候模拟具有相当的重要性。

基于以上的研究成果, 并考虑到云南等地在 2009 年秋季就已出现了较为严重的干旱, 土壤湿度已异常偏低。因此我们认为前期秋季土壤湿度的异常对该年冬季云南的持续严重干旱可能也起了重要作用。本文利用一个中尺度数值模式通过模拟试验、研究了前期土壤湿度异常对 2009/2010 年云南冬季干旱的影响。

2 模拟试验方案简介

2.1 数值模式

为了对云南 2009/2010 年冬季的干旱进行数值模拟研究, 本文采用了美国新一代中尺度数值模式 WRFv3.2 版本, 在模式运行过程中的各项方案进行了选择, 微物理过程采用了 WSM 3-class 简单冰方

案, 积云对流参数化过程选择了 Kain-Fritsch (new Eta) 方案, 长波辐射过程和短波辐射过程分别采用了 Rrtm 方案和 Dudhia 方案, 边界层过程则选用了 YSU 方案, “陆面模式” 用了其中的 PX LSM, 它是一个 2 层的强迫—恢复土壤温度和湿度模式。模拟试验的初始场和侧边界条件均为 NCEP 每 6 h 一次、分辨率为 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 的全球再分析资料。

模式在水平方向上采用了粗细双重嵌套方案, 第一重网格的格距为 60 km, 第二重网格的格距为 20 km, 粗细网格格点数分别为: 76×61 、 112×97 。模拟的区域中心分别为 (24.83°N , 102.03°E) 和 (2.58°N , 99.56°E), 具体设置如图 3 所示。

2.2 模拟试验方案

与一般的模拟试验类似, 我们分别进行了对照试验 (控制试验, Ctrl) 和土壤湿度减少一半的异常试验即敏感性试验 (Sen0.5) 两类模拟计算, 将敏感性试验与控制试验的差值视为土壤湿度敏感性所造成的影响。在敏感性试验中, 土壤湿度减少的空间范围是包围云南省的格点区域, 也就比云南省的实际范围要略为大一些, 其他地区土壤湿度与对照试验时一样。为了更好的契合本研究的目的并提高模拟的准确度, 我们分别进行了 5 组控制试验 (Ctrl1、Ctrl2、Ctrl3、Ctrl4、Ctrl5) 和 5 组敏感性试验, 5 组试验的初始积分时间分别为 2009 年 10 月 1 日、3 日、5 日、7 日和 9 日; 终止时间相同, 均为 2010 年 2 月 28 日。我们后面的分析研究主要就针对 2009 年 12 月 1 日至 2010 年 2 月 28 日 5 组试验的集合平均结果来进行。

需要特别指出, 在控制试验中的初始资料虽然用的是 NCEP 2009 年 11 月 20 日 08:00 (北京时间, 下同) 的资料场, 但土壤湿度的初始场是模式产生的, 与实际观测存在一定的差异, 因此控制试验的结果也就不能完全视为实际的实时预报结果。但由于本文主要是研究前期土壤湿度敏感性对后期降水的可能影响, 比较分析对象主要是敏感性试验和控制试验之差值, 因此土壤湿度的初始场并不影响本研究的主要结果。

3 模拟试验的降水量对比

我们主要关心的是云南的干旱问题, 所以我们首先对细网格区域的降水模拟结果进行分析。图 4 分别给出了 Ctrl 试验和 Sen0.5 模拟试验得到的 2009

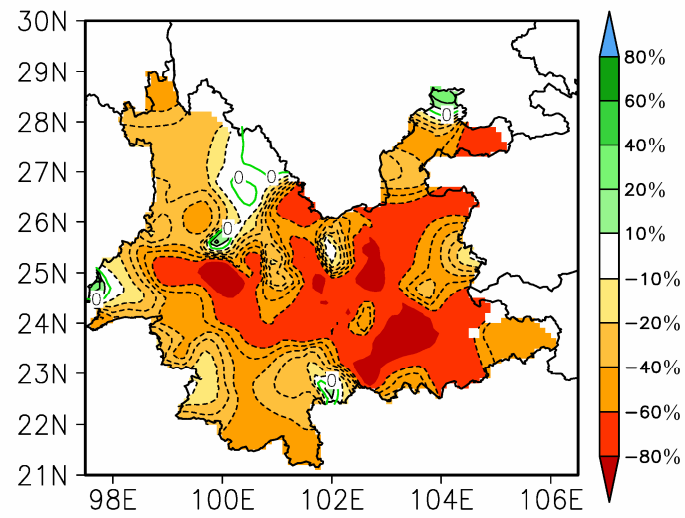


图2 2009年秋季云南降水量距平百分率的分布
Fig. 2 Precipitation anomaly percentage in Yunnan during autumn

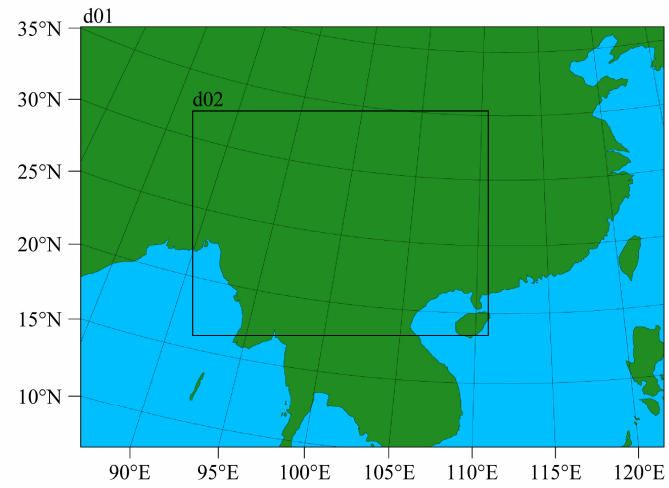


图3 模式模拟区域
Fig. 3 Nested domains for simulations

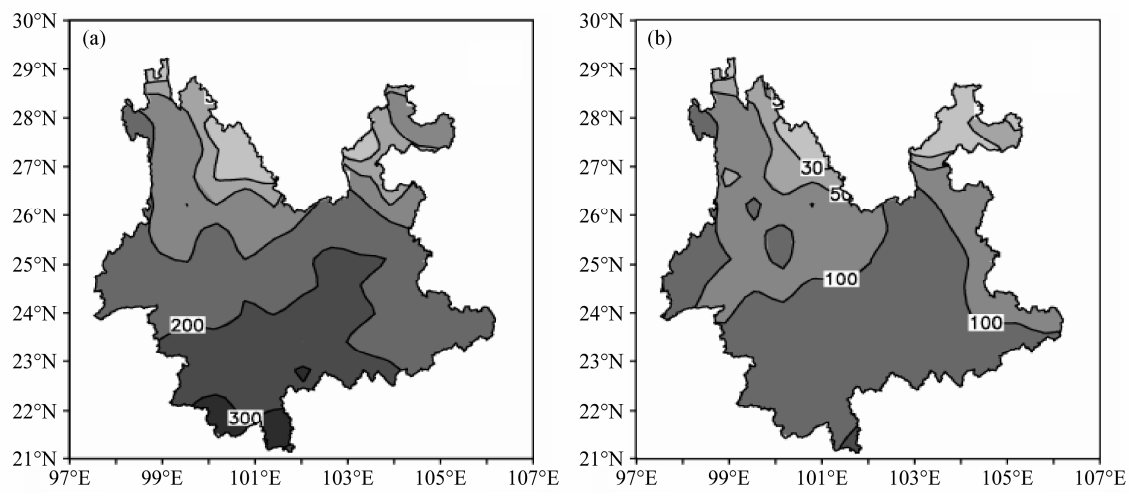


图4 模拟的云南省2009年12月1日~2010年2月28日累计降水量(单位: mm)分布: (a) Ctrl试验; (b) Sen0.5试验
Fig. 4 Simulated accumulative precipitation (mm) distribution in Yunnan from 1 Dec 2009 to 28 Feb 2010: (a) Ctrl simulation; (b) Sen0.5 simulation

年 12 月 1 日~2010 年 2 月 28 日云南省的总降水量, 两类模拟试验所呈现的降水分布形势十分类似, 自南向北降水量明显减少。从 Ctrl 试验的结果来看(图 4a), 云南大部分地区的 3 个月累计降水量介于 100~200 mm; 在云南省北部地区的降水量甚至小于 30 mm; 只在云南的最南端的小部分地区雨量达到 300 mm。虽然因初始土壤湿度场存在差异, 这里 Ctrl 试验的降水量不能直接与实际观测相比, 但模拟结果仍表明了云南这个冬季的少雨特征。

从 Sen0.5 试验得到的结果来看(图 4b), 当前期土壤湿度减小后, 云南的降水量出现明显减小, 尤其是在云南的南部地区, 其 3 个月累计降雨量基本都在 200 mm 以下。总体而言, 与 Ctrl 试验的降水量相比, Sen0.5 试验得到的云南中部和南部的降水量的减少均在 50% 以上。这表明前期土壤湿度减小对云南省后期冬季降水存在重要影响。

为了进一步分析前期土壤湿度减少对后期降水量的影响, 图 5 给出了敏感性试验与控制试验得到的云南冬季降雨量之差的分布图。从结果的分布来看(图 5a), 云南省北部的少数地区降水量略有增加, 除此之外, 在其他大部分地区, 降水量都明显减少, 尤其是在云南省中南部地区, 降水量减少了 50 mm 以上。

图 5b 给出了土壤湿度改变后降雨量的百分比变化。与图 5a 的结果相一致, 在云南北部的部分地区, 降雨量主要表现为增加; 而在云南省的中南部地区, 降水量主要表现为减少, 大部分区域减少超过 30% 以上, 有些地区甚至达到了 50% 以上。

上面的分析清楚表明, 前期土壤湿度的减少对

降水量有重要的影响, 土壤湿度减少一半将使云南大部分地区的冬季(12 月~2 月)降水量距平达到 30%~50%。因此, 我们的数值模拟结果表明, 前期土壤湿度的减少对冬季云南的降水量有重要的影响。

一个地区的降水或旱涝的发生总是与一定形式的大气环流变化密不可分。下面我们将利用粗网格模式输出的大气环流形式和相对湿度场, 分析探讨前期土壤湿度减少引起后期降水量减少的直接大气环流异常原因。

4 模拟环流形势分析

图 6 给出了 2009 年 12 月 1 日~2010 年 2 月 28 日模拟(敏感性试验)得到的月平均 500 hPa 位势高度场。从模拟的 500 hPa 位势高度场的分布情况来看, 在 25°N 以南地区, 580~588 gpm 线的分布形势基本为西北—东南走向, 说明在整个 2009/2010 年冬季, 云南及附近地区上空主要盛行西北气流, 这既不利于北方的冷空气在云南地区停留, 也不利于暖湿空气向云南的输送。因此, 数值模拟也表明大气环流的异常是该冬季云南地区出现干旱的重要原因之一。

图 7 中的矢量描述了模拟的平均 700 hPa 风场分布形势, 云南及附近地区盛行西偏北风; 图中的阴影区描述了模拟的平均 700 hPa 相对湿度场的分布形势, 在(10°N~25°N, 90°E~120°E)区域是相对湿度的小值区, 云南正位于这一区域之内。可见, 对流层低层的风场和相对湿度场的配置形式表

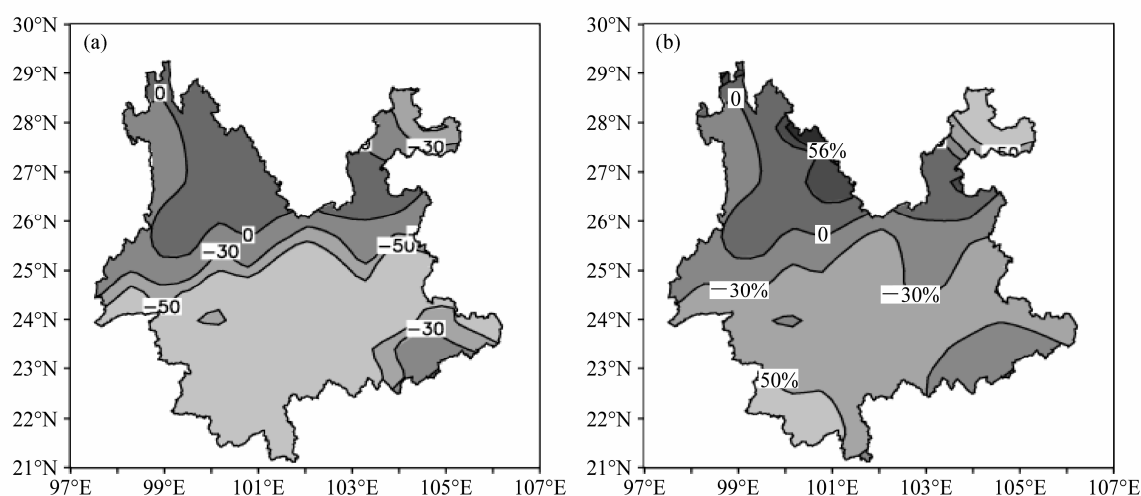


图 5 敏感性试验与控制试验得到的降雨量的 (a) 差值图(单位: mm) 及其 (b) 距平百分率

Fig. 5 (a) Difference (mm) and (b) anomaly percentage of precipitation between the Sen0.5 and Ctrl experiments

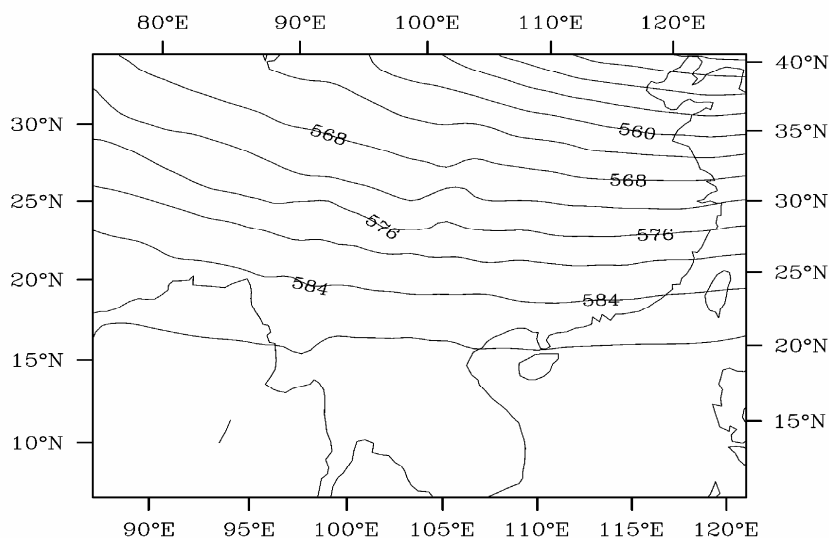


图6 敏感性试验模拟的2009年12月1日~2010年2月28日平均500 hPa位势高度场(单位: gpm)

Fig. 6 Simulated 500-hPa height (gpm) averaged from 1 Dec 2009 to 28 Feb 2010 in the Sen0.5 experiment

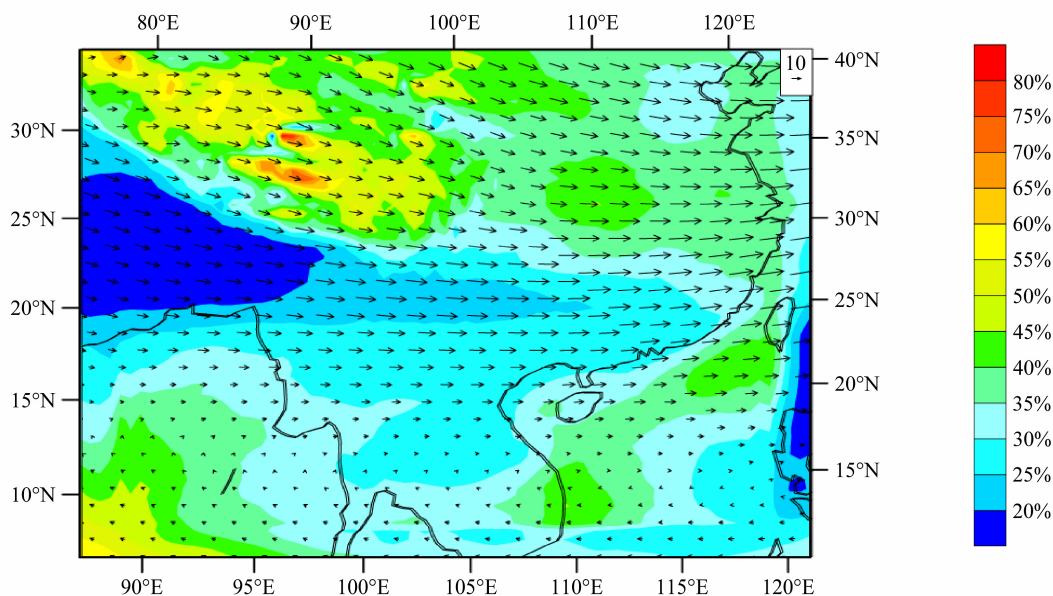


图7 敏感性试验模拟的700 hPa平均风矢量场(单位: m/s)和相对湿度场(填色)

Fig. 7 Simulated wind (m/s) and relative humidity (colour) at 700 hPa in the Sen0.5 experiment

明, 冬季云南及附近地区受偏西风和干空气的控制, 非常不利于孟加拉湾暖湿气流的到达, 这是导致云南干旱发生的重要原因之一。

上述有关大气环流形式的模拟结果表明, 敏感性试验得到的位势高度场、流场和湿度场都不利于冬季在云南地区形成有利于降水的环流条件, 那里没有冷暖空气交汇而引起降水的形势。

5 土壤湿度影响机理的进一步分析

前面的分析表明, 前期土壤湿度对云南冬季降

水有很重要的影响, 下面将对导致这一现象的可能原因做进一步分析。由于前期土壤湿度改变后, 云南中南部(22°N~25°N, 100°E~104°E)区域的降水变化比较明显, 因此我们选定这一区域作为进一步研究对象。首先我们对云南干旱期间这一区域的降水情况进行分析。图8是模拟得到的云南(22°N~25°N, 100°E~104°E)区域在2009年12月1日至2010年2月28日日平均降雨量的逐日变化图, 可以看到, 虽然其间云南地区非常干旱, 但是还是发生了几次弱降水过程。再就控制试验和敏感性试验的结果进行对比分析, 可以发现在土壤湿度改变后, 降水发生的时

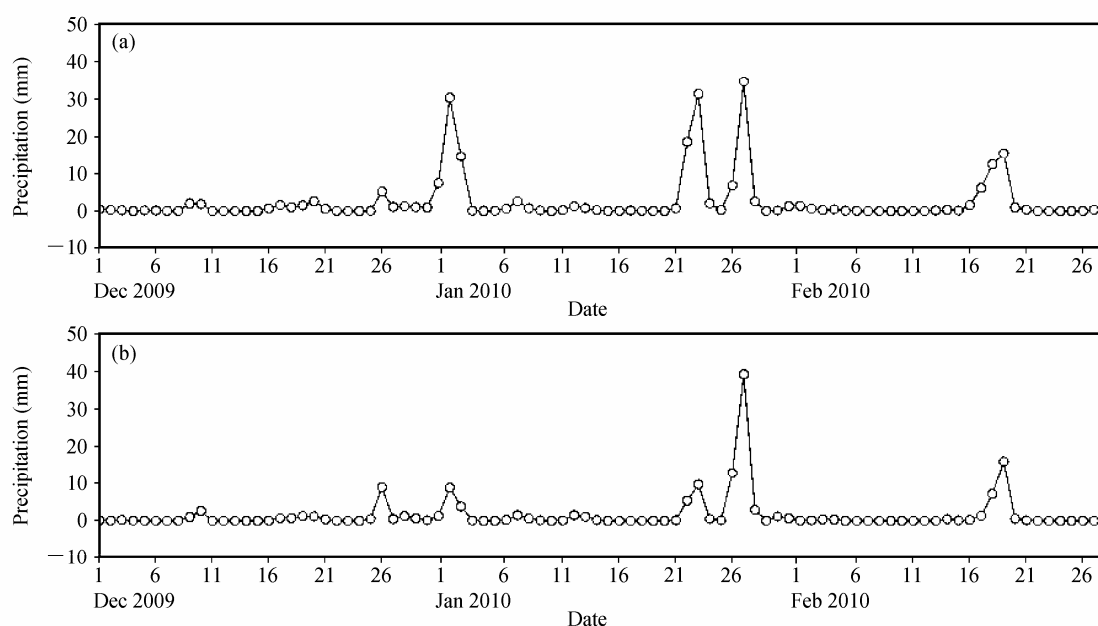


图 8 模拟得到的 2009 年 12 月 1 日~2010 年 2 月 28 日区域 ($22^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 104^{\circ}\text{E}$) 日平均降雨量的逐日变化图: (a) Ctrl 试验; (b) Sen0.5 试验

Fig. 8 Simulated daily variation of precipitation from 1 Dec 2009 and 28 Feb 2010 in region ($22^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 104^{\circ}\text{E}$) in the (a) Ctrl and (b) Sen0.5 experiments, respectively

间并未改变,只是降水强度变化十分明显。另外,在云南干旱后期,控制试验和敏感性试验的降水强度相当,这主要是因为初值的时效性所导致的。针对这一情况,我们分别选取了前两次比较强的降水过程作为分析对象,两次降水分别发生在 2009 年 12 月 31 日 08:00~2010 年 1 月 1 日 08:00,以及 2010 年 1 月 22 日 08:00~23 日 08:00。

图 9 给出的是 2009 年 12 月 31 日 08:00~2010 年 1 月 1 日 08:00 的敏感性试验与控制试验降雨量之差,从中可以看出,当前期土壤湿度减少后,在云南中南部地区,降水均出现了不同程度的减小;降水量最大减小超过 40 mm 以上,出现在云南中南部地区。

沿着降水量变化的大值区走向,图 10 给出了 2010 年 1 月 1 日 08:00 散度场的高度剖面。从 Ctrl 试验的结果来看(图 10a),在降水变化的大值区域上空,对流层下层是散度的负值区,而上层则是散度的正值区,即有低层辐合、高层辐散的特征。散度场的这种配置形势有利于对流活动的发展,因此有利该次降水。

从模拟的 Sen0.5—Ctrl 的结果来看(图 10b),在降水变化比较大的区域上空,对流层下层是正值区,而上层是负值区,即对流层低层辐合和中高层辐散都减小了。这样的形势阻碍了对流活动在

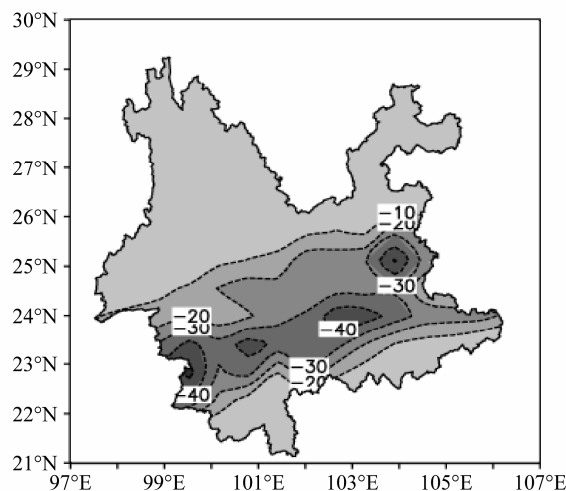


图 9 2009 年 12 月 31 日 08:00~2010 年 1 月 1 日 08:00 敏感性试验与控制试验降雨量之差(单位: mm)

Fig. 9 Difference of precipitation (mm) between the Sen0.5 and Ctrl experiments from 31 Dec 2009 to 1 Jan 2010

Sen0.5 试验中的发展。因此,当前期土壤湿度减小后,大气环流的变化不利于对流活动,对应的降水也就随之减少。

进一步对模拟的垂直速度场进行分析。图 11 是模拟的 2010 年 1 月 1 日 08:00 垂直速度场的格点—高度剖面。从 Ctrl 试验的模拟结果来看(图 11a),在大部分地区,上升运动可以贯穿整个对流层,但在少部分区域,在对流层高层,有下沉运动存在。

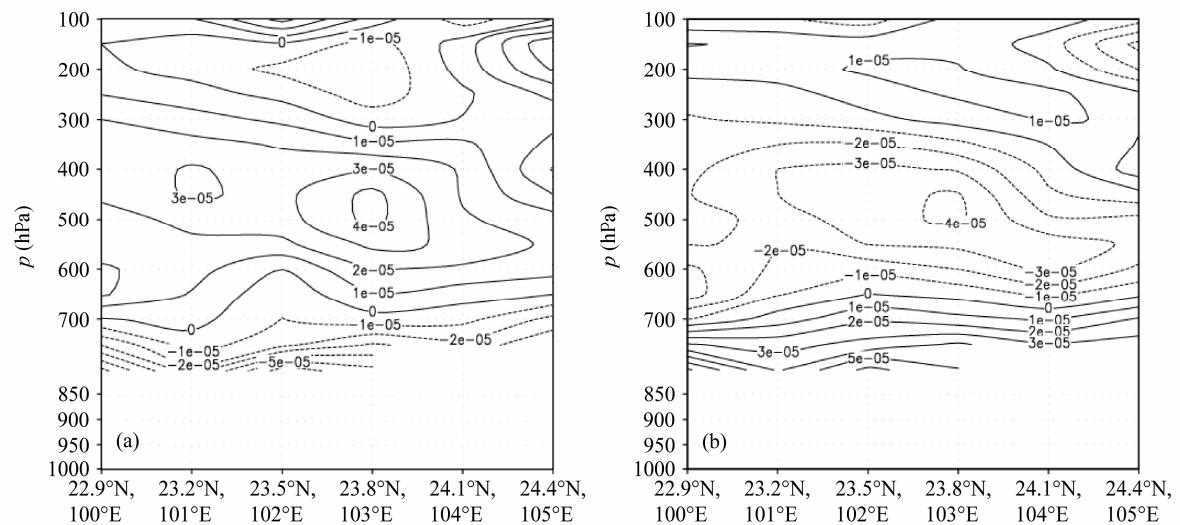


图 10 模拟的 2010 年 1 月 1 日 08:00 散度场的格点—高度剖面: (a) Ctrl 试验; (b) Sen0.5—Ctrl

Fig. 10 The height-grid points section of simulated divergence at 0800 LST 1 Jan 2010: (a) Ctrl simulation; (b) Sen0.5—Ctrl

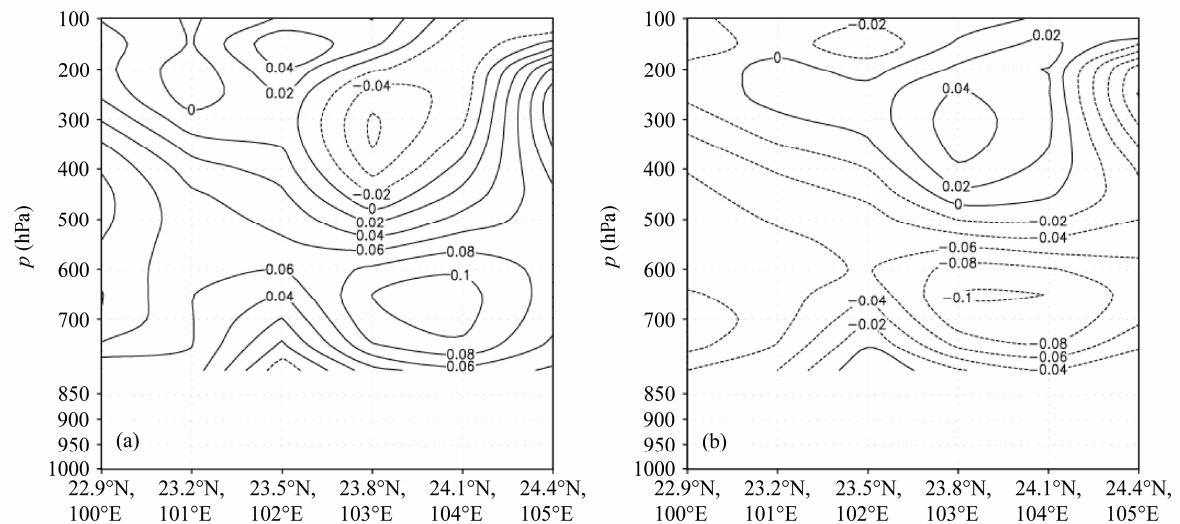


图 11 同图 10, 但为垂直速度场 (单位: m/s)

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for vertical speed (m/s)

由于对流层中下层盛行上升运动, 这有利于对流活动的发展。而从 Sen0.5—Ctrl 的模拟结果来看 (图 11b), 除去对流层高层小部分区域外, 其它地方都几乎出现负值, 上升运动被减弱。这表明在前期土壤湿度减小后, 大气中上升运动被削弱, 因此降水也随之减少。

大气中的水汽含量无疑对降水有重要作用, 因此, 我们进一步对模拟的相对湿度场的结果进行分析。图 12 是 2010 年 1 月 1 日 08:00 模式得到的相对湿度场的高度剖面图。从 Ctrl 试验的结果来看 (图 12a), 在对流层中下层有相对湿度的大值区存在。这一方面是平流输送作用; 另一方面是由于上升运动的存在, 有利于地面湿空气的上升, 从而在

研究区域上空的低层水汽含量较大, 在其它条件配合下可形成一定的降水。

从 Sen0.5—Ctrl 的模式结果来看 (图 12b), 在降水区域的上空有大范围的负值区, 相对湿度被明显减小。这表明在前期土壤湿度减小后, 大气环流特别是大气边界层的变化使空气中的水汽含量也明显减少, 因此也就使降水量减小。

进一步对 2010 年 1 月 22 日 08:00~23 日 08:00 发生的降水过程进行分析。图 13 是 2010 年 1 月 22 日 08:00~2010 年 1 月 23 日 08:00 敏感性试验与控制试验的降雨量之差值分布。从中可以看出, 当前期土壤湿度改变后, 在云南中南部地区, 降水也都出现了不同程度的减小, 最大的降水减小超过 40

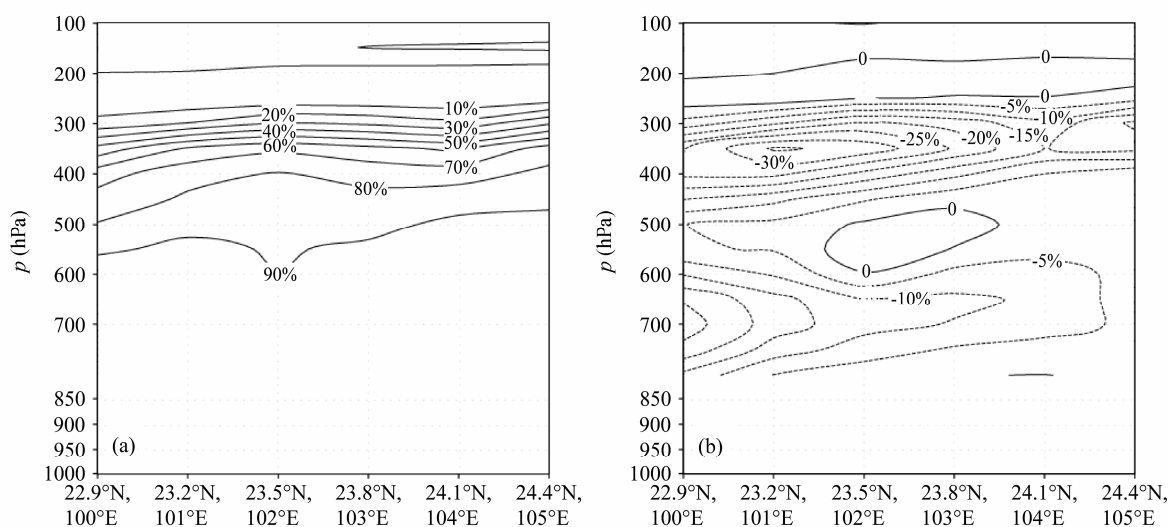
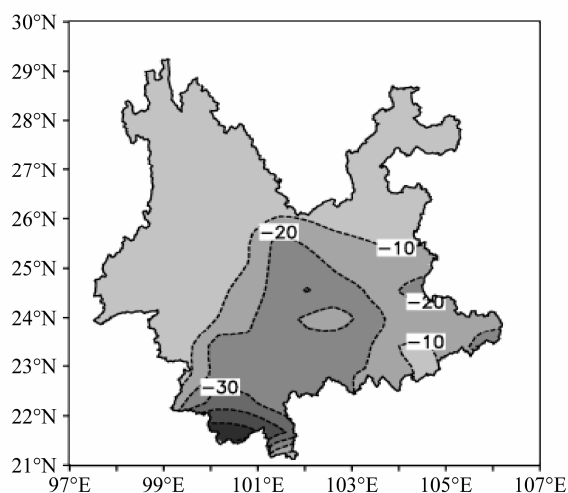


图 12 同图 10, 但为相对湿度场

Fig. 12 Same as Fig. 10, but for relative humidity

图 13 同图 9, 但为 2010 年 1 月 22 日 08:00~23 日 08:00 的模拟结果
Fig. 13 Same as Fig. 9, but during 0800 LST 22 Jan 2010 to 0800 LST 23 Jan 2010

mm 以上。

与对前一次降水过程的分析类似, 沿着降水变化的大值区走向, 图 14 给出了 2010 年 1 月 23 日 08:00 模拟的散度场的高度剖面。就 Ctrl 试验的结果而言(图 14a), 在降水变化比较强烈的地区上空, 对流层 600 hPa 以下是散度的正值(辐散)区, 而 600~200 hPa 之间则是散度的负值(辐合)区, 200 hPa 以上是散度的正值区。研究区域上空自下而上的这种辐散-辐合-辐散的配置形势, 使得 600 hPa 以下出现了弱的下沉运动, 而 600 hPa 以上则出现了比较强的上升运动(图 15a)。散度场的这种配置形势有利于对流活动的发展, 因此对降水有利。

从模拟的 Sen0.5-Ctrl 的结果来看(图 14b),

在降水变化比较大的区域上空, 相对于 Ctrl 试验的结果几乎都出现了相反的差值, 表明 Sen0.5 试验中散度场也被削弱了。异常的辐合辐散场自然也就导致垂直速度的异常分布, 因此在 Sen0.5-Ctrl 中主要出现大片负值(图 15b), 这表明在土壤湿度减小后, 研究区域的上升运动被明显减弱。在土壤湿度减小后, 研究区域的辐合辐散场和垂直运动场都不利于对流的发展, 当然降水也随之减弱(图 13a)。

对第二次降水过程的相对湿度场进行分析也表明(图略), Ctrl 试验的结果在对流层中下层相对湿度相对还是比较高的, 但从 Sen0.5-Ctrl 的结果来看几乎整层都明显减小。说明在前期土壤湿度减小后, 种种因素使得大气相对湿度场整体减小, 也就在一定程度上导致了降水的减弱。

上面通过对发生在 12 月 31 日 08:00~2010 年 1 月 1 日 08:00 和 2010 年 1 月 22 日 08:00~23 日 08:00 的两次模拟降水过程结果, 分别对比分析研究了土壤湿度减小后所导致的降水量减少及其原因。模拟结果首先表明, 土壤湿度减小后两次降水过程的降水量都明显减少; 模拟结果还表明, 大气环境因素(包括散度场、相对湿度场和垂直速度场等)在土壤湿度减小后都出现明显的改变, 而这些因素的异常改变都对降水有削弱的作用, 从而使得每个降水过程的降水量都减少。

6 结语和讨论

本文的数值模拟试验结果和一系列分析已清

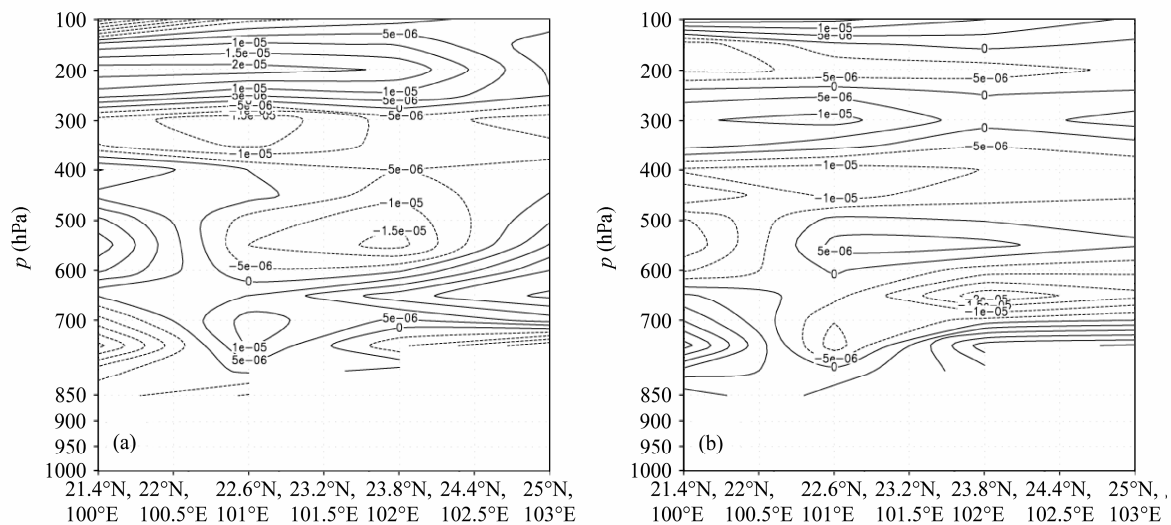


图 14 同图 10, 但为 2010 年 1 月 23 日 08:00 的过程

Fig. 14 Same as Fig. 10, but for 0800 LST 23 Jan. 2010

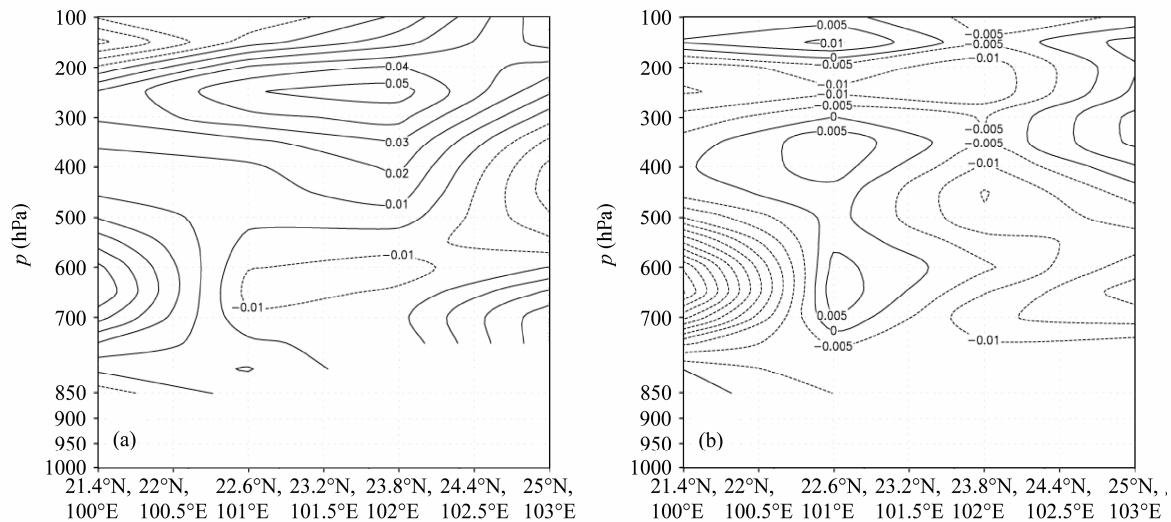


图 15 同图 14, 但为垂直速度 (单位: m/s) 场

Fig. 15 Same as Fig. 14, but for vertical speed (m/s)

楚表明, 前期 (秋季) 土壤湿度的异常偏低, 会导致云南地区冬季降水的显著减少。前期土壤湿度减少一半, 可以使云南冬季 (12 月 1 日~2 月 28 日) 的降水量平均减少 30% 以上, 小部分区域减少达 50% 以上, 影响十分明显。

大气环流及其主要参量的模拟结果, 以及对分析清楚表明, 不利于冬季云南降水的环流形势的产生和各种物理量场的异常对降水量减少有重要作用。持续的东西偏北气流和干气团的控制, 云南地区大气散度场和垂直运动场等的异常是导致降水量减少的直接原因。

对降水过程的分析表明, 前期土壤湿度减少对降水过程的频次和发生时间的影响不是很大, 主要

是对各次过程的降水强度影响更为明显。这是前期土壤湿度减少所导致的大气物理过程包括区域性蒸发量和热通量等的改变决定的。

关于区域性土壤湿度异常影响天气气候 (特别是降水) 的机理过去已有一些探讨, 主要是认为土壤含水量的增加 (降低) 会使得地表蒸发量增加 (减少), 进而使地表净辐射增加 (减少)、潜热通量增加 (减少)、感热通量减少 (增加)。这样, 土壤湿度的改变就导致地-气间的物质和能量交换异常, 使得大气中水汽变得比较充裕 (稀少)、气温比较低 (高), 有利于 (不利于) 对流和降水的发生。本文的数值模拟及其结果与这些已有分析结果是基本一致的。

参考文献 (References)

- 陈文, 康丽华, 王珂. 2006. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 259–269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 259–269.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. 大气科学, 29 (1): 20–36. Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2005, 29 (1): 20–36.
- 李崇银. 1992. 华北地区汛期降水的一个分析研究 [J]. 气象学报, 50: 41–49. Li Chongyin. 1992. An analytical study on the precipitation in the flood period over Huabei area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 50: 41–49.
- Li C Y, Xian P. 2003. Atmospheric anomalies related to interdecadal variability of SST in the North Pacific [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20: 859–874.
- 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.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 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, Bueh Cholaw. 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.
- 秦剑, 琚建华, 谢明恩, 等. 1997. 低纬高原天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 210pp. Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en, et al. 1997. Weather and Climate of Plateau at Low Latitudes (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 210pp.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. Science, 215: 1498–1501.
- 宋洁, 杨辉, 李崇银. 2011. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析 [J]. 大气科学, 35 (6): 1009–1019. Song Jie, Yang Hui, Li Chongyin. 2011. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 2011, 35 (6): 1009–1019.
- 王万秋. 1991. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 15 (5): 115–122. Wang Wanqiu. 1991. Numerical experiments of the soil temperature and moisture anomalies effects on the short term climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 15 (5): 115–122.
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2004. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析 [J]. 大气科学, 28 (1): 125–137. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2004. Physical causes of the 1999 and 2000 summer severe drought in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 2004, 28 (1): 125–137.
- 晏红明, 程建刚, 郑建萌, 等. 2012. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析 [J]. 大气科学学报, 35 (2): 229–239. Yan Hongming, Cheng Jiangang, Zheng Jianmeng, et al. 2012. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 229–239.
- Yang H. 2011. The significant relationship between the Arctic Oscillation (AO) in December and the January climate over South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28: 398–407.
- 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 315–326. Yang Hui, Song Jie, Yan Hongming, et al. 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 315–326.
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1984. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 112: 474–485.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 318–328. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 318–328.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 1–13. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air temperature in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 1–13.