

土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨

郭维栋 马柱国 王会军

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 阐述了土壤湿度对短期气候变化的重要作用, 结合我国的业务现状提出亟需将这一因子应用于跨季度降水预测。通过将一个土壤湿度反演模型引入 IAP 跨季度气候预测系统, 探讨了土壤湿度应用于季节降水预测的可行性及其效果。初步的个例分析表明: 前期土壤湿度的异常分布对降水变化有较显著的影响, 继续改进土壤湿度反演模型可望获得更好的降水预测效果。同时, 提出的基于常规气象观测进行反演以获得大范围土壤湿度分布的办法在当前业务预测中具有很强的可操作性。

关键词 土壤湿度 短期气候变化 降水预测

文章编号 1006-9585 (2007) 01-0020-09 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

Soil Moisture——An Important Factor of Seasonal Precipitation Prediction and Its Application

GUO Wei-Dong, MA Zhu-Guo, and WANG Hui-Jun

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Necessity of applying soil moisture to seasonal precipitation prediction is emphasized through addressing the importance of soil moisture to short-term climate change. Impacts of soil moisture on seasonal precipitation are studied by introducing a soil moisture retrieving scheme into an operational prediction model. The results show that soil moisture anomaly could exert distinct influence on precipitation change while better precipitation simulation/prediction could be expected with the improvement of retrieved data. It is pointed out in particular that the scheme suggested in this work, which gets regional distribution of soil moisture based only on available observations is easy to be used for operational purpose.

Key words soil moisture, short-term climate change, precipitation prediction

1 引言

土壤湿度作为气候变化研究中的一个重要的

物理量一直受到有关研究的重视。它的重要性具体表现在它能够通过改变地表的反照率、热容量和向大气输送的感热、潜热等而影响气候变化(见图1)。

收稿日期 2005-11-09 收到, 2006-10-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405014、国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介 郭维栋, 男, 1972 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化及陆气相互作用研究。E-mail: guowd@tea.ac.cn

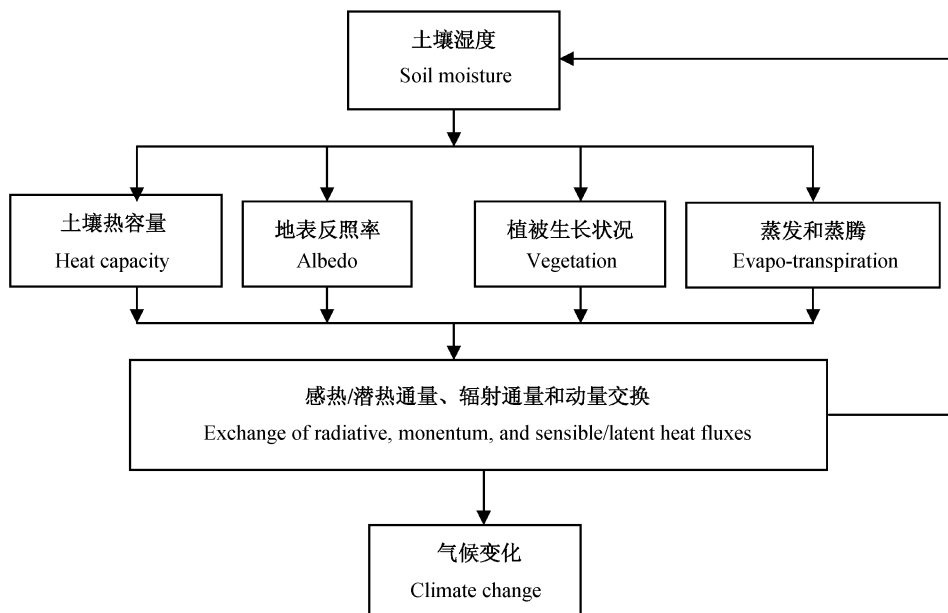


图1 土壤湿度与气候变化的相互关系

Fig. 1 A schematic map on the relationship between soil moisture and climate change

研究表明, 土壤湿度在气候变化中的作用是仅次于海表面温度 (SST) 的重要参量, 在陆地上, 它的作用甚至超过 SST 的作用。据统计, 就全球陆地而言, 65% 的降水来自于地表面的蒸发, 而仅有 35% 来自于海洋的水平输送^[1]。Trenberth^[2]和 Brubaker 等^[3]的工作表明对空间尺度在 1 000 km 以上的区域, 局地蒸发对降水的贡献可以达到 10%~40%, 而蒸发又是一个与土壤湿度密切相关的量。Namias^[4,5]最早发现, 土壤湿度的季节性异常对大气的季节变化有重要作用; Manabe 等^[6,7]首次把水文过程引入气候模式。Rowntree 等^[8]的敏感性试验指出: 干土壤可使未来气温升高、降水减少, 湿土壤可使气温降低、降水持续; Yeh 等^[9]用 GFDL 的 GCM 研究了灌溉后土壤对气候的影响, 结果指出: 增加土壤含水量将使降水增加, 而使气温降低; Xue 等^[10]用一个耦合植被过程的气候模式, 对 Sahara 沙漠进行了不同地表条件下的两个对比试验, 结果表明: 表面条件的变化对气候变化有重要的反馈作用, 它不仅影响降水和云量, 对气温也有重要影响。

除此之外, 土壤湿度对中小尺度天气过程有同等重要性, 如 Fast 等^[11]指出, 土壤湿度的梯度能够激发局地环流的形成和发展; Chang 等^[12]认

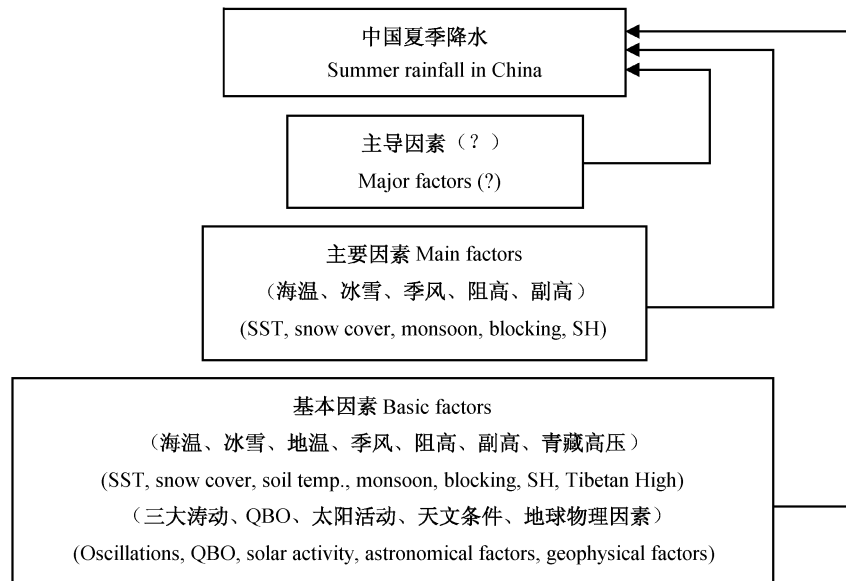
为, 植被和土壤湿度的空间变化改变了表面大气的斜压结构而激发了对流风暴的形成。因此, 认知土壤湿度和大气的相互作用机制, 在模式中客观地描述土壤湿度对短期气候变化及中尺度天气过程研究十分重要。

2 存在的问题及解决方案

如第 1 节所言, 土壤湿度毫无疑问是陆面过程的一个重要的物理参数。遗憾的是, 如此重要的物理量在目前的陆面过程模式和 GCM 中却没有得到客观的描述^[13], 其中的主要原因有两个: 其一, 大范围的土壤湿度观测是非常困难的; 其二, 土壤湿度具有非常大的时空变率。这些都造成了土壤湿度观测资料的缺乏, 作为模式变量的土壤湿度无法用观测资料来验证, 也无法产生 GCM 所需要的土壤湿度的初始场。

国内有关土壤湿度和短期气候变化的研究也比较缺乏, 主要集中在一些有限的资料分析及敏感性数值试验方面^[14~18]。更重要的是, 到目前为止, 在对我国国民经济非常重要的短期气候预测业务中, 土壤湿度这一重要因子仍未得到足够的重视, 从图 2 的总结中不难发现这一问题。

当前, 我国短期气候业务预测中应用到的物

图 2 影响中国夏季降水的基本因素和主要因素^[19]Fig. 2 Main and major factors influencing China's precipitation in summer^[19]

理因子已不下十几个，如何在我国短期气候异常尤其是降水异常的研究乃至业务预测中考虑土壤湿度的影响？这正是本文的研究动机所在。

造成土壤湿度这一重要的短期气候变化因子迟迟不能在业务预测中应用的原因主要在于两个方面：首先，如前所述，目前我们得到的土壤湿度观测资料的时空尺度都非常有限，从而难以细致考察不同区域土壤湿度与短期气候变化的统计关系，导致难以用统计手段考虑土壤湿度对短期气候的影响；那么，借助动力模式又如何呢？这时的最大困难就是土壤湿度的初始化问题。这一问题一直是陆面模式和 GCM 所面临的重要研究课题，由于观测资料的缺乏，难以建立全球尺度和区域尺度高分辨率的土壤湿度初始场。至今，在全球和区域气候模式中还没有一个客观、合理的土壤湿度初始化方案。

分析以上两方面的困难，为达到我们的研究目的，看来借助动力模式，通过改进其中的土壤湿度初始化方案从而合理地引入前期土壤湿度的异常分布来考查土壤湿度与短期气候变化的关系不失为一条可行的路子。因为从统计分析的角度看，为得到可靠的结论必须有足够长的资料序列，而我们对如何延长有限的观测资料还无能为力。

目前，在大气环流模式中，土壤湿度的初始化主要有以下几个途径^[20]：其一，简单地将土壤湿度的初始值取为常数，如模式多年积分后输出的“气候值”。我们即将用到的 IAP PSSCA 模式系统即采用此方案；其二，用陆面模式的土壤湿度预报值作为 GCM 或区域模式的初始场；其三，利用水文模式的输出结果作为 GCM 模式的初始场；其四，用遥感资料提供土壤湿度的初始值；最后是目前被 GCM 普遍采用的方法，基本思路是根据土壤湿度和其他地表气象参数的统计关系建立土壤湿度的计算方案，以此方案的计算结果作为大气环流模式的初始场。

由于土壤湿度具有很大的时空变率，因此，第一种方法显然是不合理的；第二种方法由于陆面过程模式自身的局限性，目前还难以对土壤湿度进行很好地模拟；方法三则需要大量的地表观测资料；用遥感资料反演土壤湿度具有很好的前景，但目前仍限于对土壤表层水分的观测，对深层土壤湿度却无能为力。最后一种方法的优点在于能从常规的气象观测资料中获得土壤湿度，在当前不失为一种理想的方法。本文用到的土壤湿度反演模型正是基于这一思想，通过将它引入到一个用于短期气候预测的 GCM 模型中来达到我们的研究目的。

3 预测模型及土壤湿度反演方案简介

3.1 跨季度气候距平数值预测系统

本文用到的数值模式为中国科学院大气物理研究所跨季度气候距平数值预测系统——IAP PSSCA^[21,22]。该系统除其核心——一个海气耦合的 GCM 外,还包括一套较完善的大气海洋资料同化方案,集合预测技术及误差订正方案和预测结果评估方案。自 1991 年投入实际预测以来,经过逐步改进已经交付业务使用,图 3 为其简单结构框图。

IAP PSSCA 对我国夏季 6~8 月的降水进行跨季度预测,取 2 月的观测大气及同化后的海洋初始场积分至 8 月底。对我国东部地区的重大事件如 1989 年的江淮多雨、1991 年的苏皖洪涝、1992 年的东北、华北及山东大旱、1994 年两广洪涝和中原干旱、1995 年江南至华南多雨、1996 年长江中下游多雨、1998 年的全国性多雨以及 1999 年的江南多雨都预测得较好^[23,24]。

3.2 土壤湿度反演模型 MRSM

为给模式提供合理的土壤湿度初值,我们用了马柱国发展的一个能够反演中国东部土壤湿度的模式 MRSM^[20]。该模式利用常规的降水和气温资料,考虑了土壤水分收支的两个主要因素——大气降水和地表蒸发的综合效应(图 4)。

该模型通过引入地表湿润指数来表示土壤水分的收支情况,表示为

$$H_i = \frac{P}{P_e}, \quad (1)$$

其中 H_i 为湿润指数, P 为降水量(单位: mm), P_e 为最大潜在蒸发(单位: mm)。计算湿润指数 H_i 的关键在于最大潜在蒸发 P_e 的计算。该模型中较详细地考虑了土壤冻结和积雪融化情形下土壤水分的收支状况,细节可参见文献[20]。

MRSM 模型将 0~100 cm 的土壤分为 11 层,其中 0~5 cm 及 5~10 cm 各为一层,再向下每隔 10 cm 为一层。首先建立表层土壤湿度和地表湿润指数的关系来反演土壤湿度。然后,再依据表层土壤湿度和深层土壤湿度的关系来建立反演深层土壤湿度的模型。

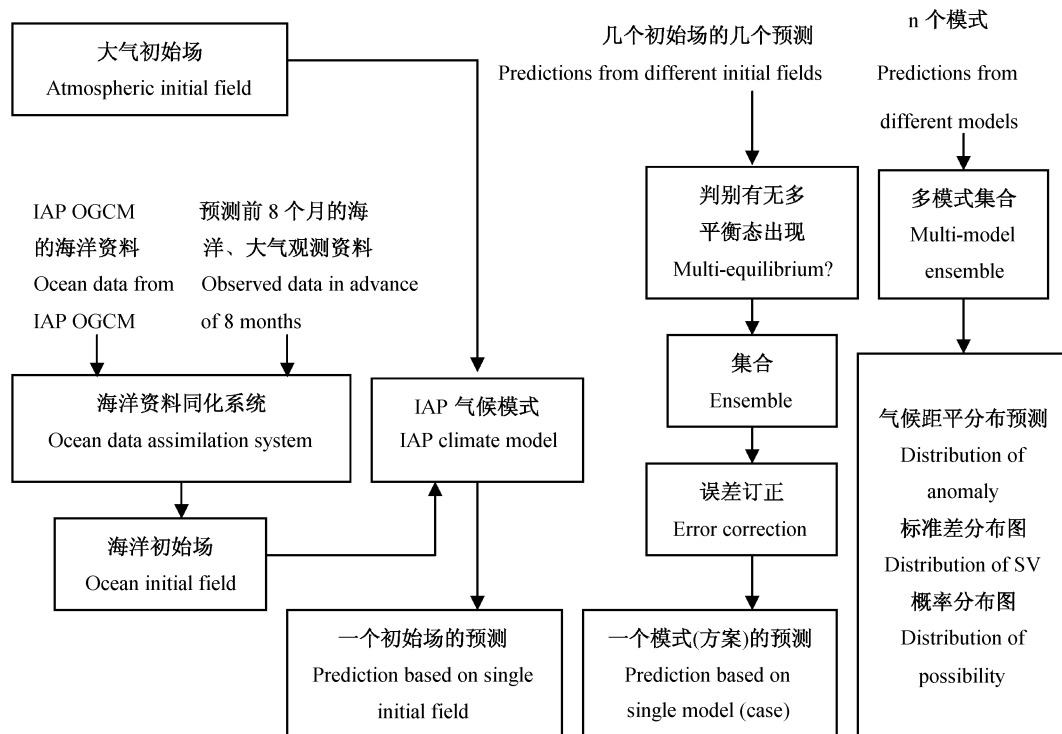


图 3 IAP PSSCA 流程图^[19]

Fig. 3 Flow chart of IAP PSSCA^[19]

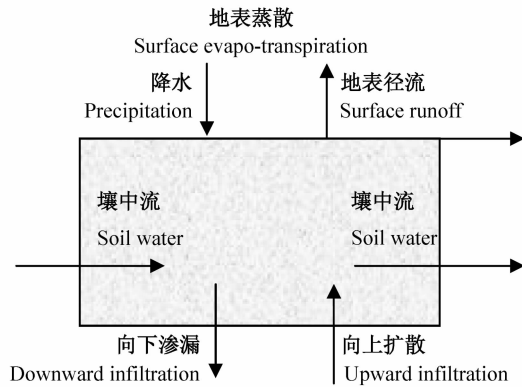


图4 土壤水分收支示意图

Fig. 4 A schematic map of water budget in soil layers

求解某一地区土壤湿度的经验方案可表示为

$$s_m = c_0 + c_1 H_i + c_2 H_i^2 + c_3 \lg H_i, \quad (2)$$

其中, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为经验常数, s_m 为土壤重量含水率, H_i 为湿润指数。在不同地区, 依据土壤性质及与观测土壤湿度资料的对比, 式 (2) 中参数的取值不同。

文献 [20] 通过与土壤湿度观测资料的对比表明, MRSMS 对不同深度土壤湿度的地理分布、季节变化和年际变化有较强的反演能力。说明该模式是一个可行的、能够用于反演土壤湿度的理想模型。

4 试验方案设计

1998 年夏季长江及嫩江流域的严重洪涝作为典型的短期气候异常事件引起了广泛关注, 许多学者从海温、积雪、大气环流初始状况、地球物理因素等方面分析了这次气候异常事件的成因。本文试图探讨前期土壤湿度的异常分布对 1998 年洪涝事件的影响。

在介绍试验方案之前, 不妨先了解一下 IAP PSSCA 模式系统中原先的土壤湿度初值方案。

图 5 给出了 IAP PSSCA 每年 2 月的土壤湿度地理分布 (图中数字表示体积含水率), 它其实是以模式 30 年积分后输出的该月土壤湿度的“气候值”作为模式在某年积分时所需的土壤湿度的初值。从图 5 不难看出, 由于代之以气候平均, 这样的初值场并不能反映土壤湿度实际的年际变化特征。更重要的是, 这一“气候态”的土壤湿度

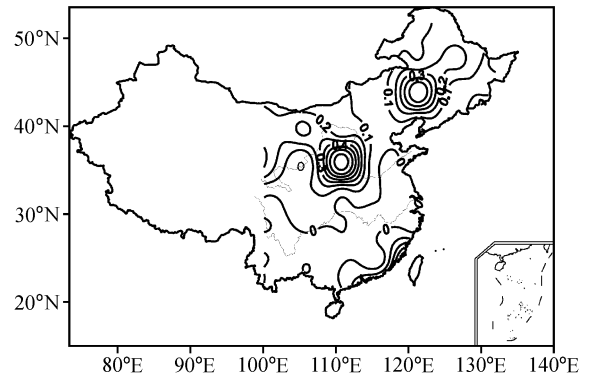


图5 IAP PSSCA 中土壤湿度的地理分布 (2月, 0~10 cm 平均)

Fig. 5 Distribution of soil moisture in IAP PSSCA (February, 0—10 cm mean)

分布图上所呈现的“南干北湿”的分布特征与实况出入甚大。这也凸显出我们着眼于改进这一模式系统的土壤湿度初值方案的意义所在。

控制试验用 IAP PSSCA 对 1998 年春夏季降水进行模拟时, 所选取的集合样本为 15 个, 以更好地消除大气初始场的影响。亦即对于大气初值, 选取 1998 年 2 月 1~15 日的 NCEP 资料^[25], 然后再插值到模式的网格点和层次上, 从而得到进行集合预测所需的 15 个大气初值。积分过程中所采用的逐月海温距平是由全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 最优内差海温资料得来的^[26]。模式的积分时段为 1998 年 2 月 15 日~8 月 31 日, 并取 3~5 月的平均为春季平均, 6~8 月的平均为夏季平均。在处理 15 个集合样本时是采用简单的算术平均。

对比试验中我们引进了 MRSMS 模型来改善土壤湿度的初值。限于所需的土壤参数, MRSMS 目前还只能反演我国大陆 100°E 以东 139 个台站的土壤湿度。对比试验中保持其他步骤不变, 2 月的土壤湿度初值则以 MRSMS 的反演值 (0~10 cm 平均) 代替。由于 MRSMS 是对台站资料进行反演, 我们需要将反演值插值到模式格点上。图 6 为 1998 年 2 月土壤湿度反演值在不同分辨率下的一个对比, 其中图 6a 为高分辨率 ($0.3^\circ \times 0.3^\circ$) 的情形, 图 6b 为模式分辨率 ($4^\circ \times 5^\circ$) 的情形。

与图 6a 对比, 图 6b 整体的分布形式与前者保持了很好的一致。其中长江中游及其以南的高值区、江南到江淮地区的相对高值区以及四川盆地、黄河上中游的低值区都反映得很清楚。说明

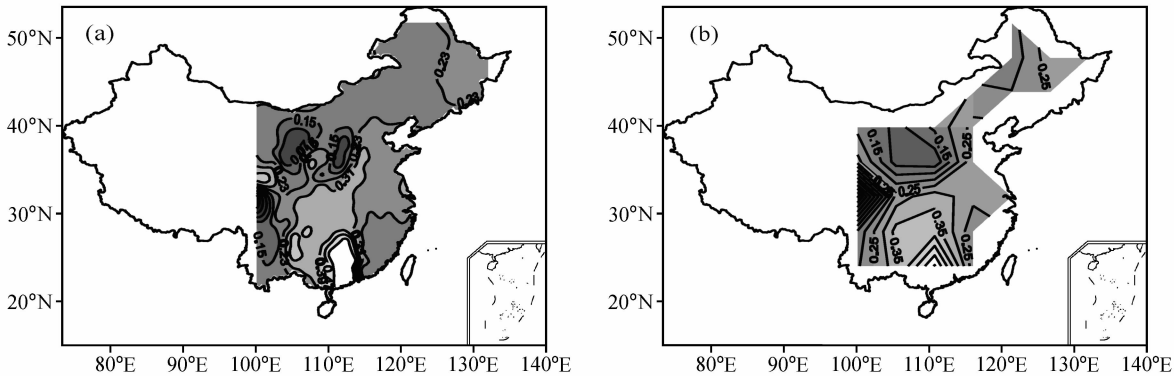


图6 1998年2月土壤湿度反演值在不同分辨率下的分布：(a)分辨率为 $0.3^{\circ}\times0.3^{\circ}$ ；(b)分辨率为 $4^{\circ}\times5^{\circ}$ （阴影区为中国范围内有土壤湿度数据的范围）

Fig. 6 Distribution of retrieved soil moisture at different resolution in Feb 1998: (a) at the high resolution of $0.3^{\circ}\times0.3^{\circ}$; (b) at the model resolution of $4^{\circ}\times5^{\circ}$ (shaded area indicates the region with soil moisture data within mainland China)

将台站资料插值到模式的分辨率后仍能很好地反映出土壤湿度的分布特征，从而保证了我们提供的土壤湿度初值的质量。

5 结果分析及讨论

IAP PSSCA 对季节降水的模拟和预测能力是按照国家气候中心的评分标准，通过与 160 个基准站的观测进行对比来评定的。这一评分体系兼顾了对总体旱涝形势及不同等级严重旱（涝）事件的预测效果，具有意义明确、客观定量的特点。其降水预测评分定义为^[27]

$$P = \frac{N_0 + f_1 \times n_1 + f_2 \times n_2}{N + f_1 \times n_1 + f_2 \times n_2} \times 100, \quad (3)$$

其中， P 为预测评分， N 为预测区域内基准测站的总数， N_0 为该区降水距平符号报对及预报与观测同属降水正常级的站数， n_1 和 n_2 分别为一级和二级降水异常报对的站数。降水距平等级及其权重系数列于表 1。

表 1 降水距平等级及权重系数

Table 1 Degree of precipitation anomaly and its weight coefficients

等级	降水距平百分率 ($R'\%$)	权重系数
正常级	$ \Delta R' \% \leq 15$	
二级降水异常	$ \Delta R' \% \geq 20$	$f_2 = 1.60$
一级降水异常	$ \Delta R' \% \geq 50$	$f_1 = 4.39$

改进土壤湿度初始化方案前 IAP PSSCA 模拟的 1998 年春季降水（3~5 月平均）在中国东部（ 100°E 以东，有反演值的地区）的评分为 72.0，夏季（6~8 月平均）该区降水的评分为 66.2；而引入 MRSM 模型改进 IAP PSSCA 土壤湿度初始化方案后该区春夏两季降水的评分分别升至 83.2 和 76.5，平均增幅达 10 分左右。这一增幅若出现在短期气候业务预测中将是十分可观的！

仅从这一成功的个例就得出乐观的结论未免过于仓促。为此，再对 1990 年代我国东部又一典型大涝年——1991 年江淮流域的大涝进行分析，试验方案的设计与前节一致，不再赘述。

相比 1998 年的结果，1991 年的个例并不乐观，春夏两季降水评分分别从 75.0、62.1 下降到 66.2、51.5，反而出现了 10 分左右的下降！这一结果颇使人疑惑，为找出其中原由，很自然地想到反演土壤湿度的质量问题。

图 7 是 1991 年 2 月土壤湿度的观测场，图上有两个明显的高值中心（浅色区域），其一中心在湘黔桂交界，另一区域分布在长江下游至黄河下游之间。前者从观测看本身就是一高湿度区（因为该区降水较充足而蒸发又不很强）。倒是后者值得注意，因为 1991 年汛期江淮流域的大涝正好出现在这一地区。可以认为，该区前期异常高的土壤湿度对后期洪涝格局的形成有重要影响。那么，我们的反演资料是否将这种土壤湿度的分布形式正确地提供给模式了呢？

图 8 是同月反演资料的分布，图上最明显的

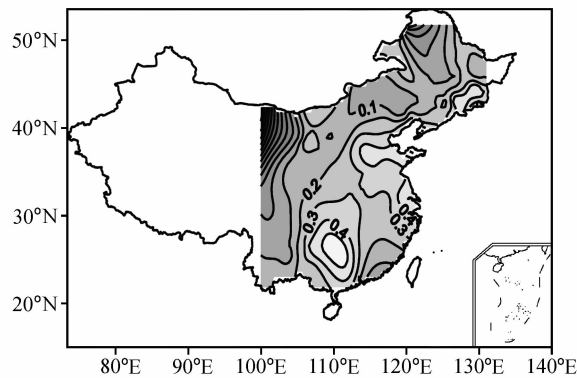


图7 1991年2月中国东部土壤湿度的观测场(0~10 cm平均)
Fig. 7 Distribution of observed soil moisture over eastern China in February 1991 (0—10 cm mean)

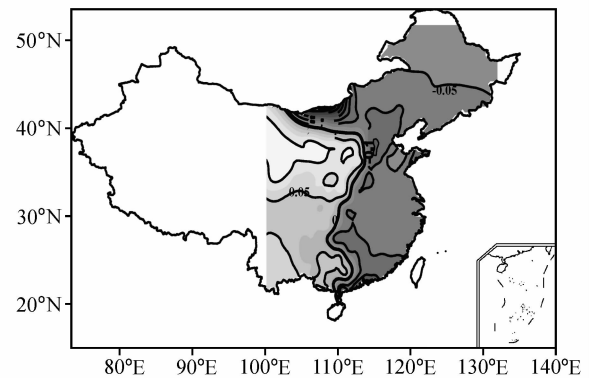


图9 反演的土壤湿度的距平分布(1991年2月, 0~10 cm平均)
Fig. 9 Distribution of retrieved soil moisture anomaly in February 1991 (0—10 cm mean)

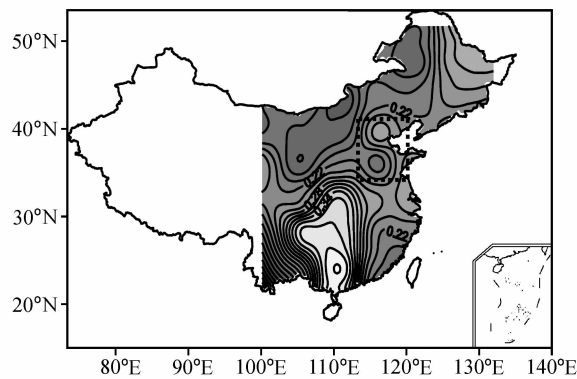


图8 同图7, 但为反演资料
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for retrieved data

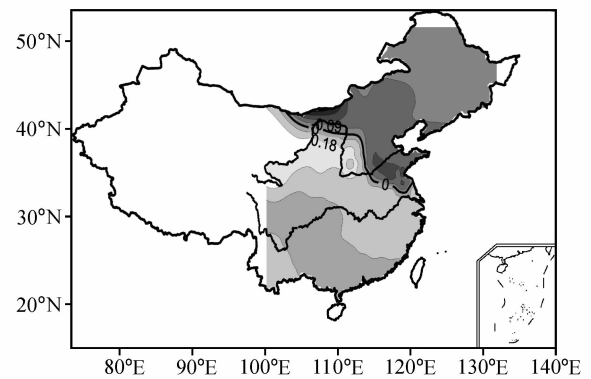


图10 同图9, 但为1998年2月
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for February 1998

变化是原先在江淮地区的土壤湿度高值中心不见了! 据此可认为, 反演资料中的失误对于模拟结果变差有直接影响。

为进一步验证这一想法, 基于 MRSIM 模型反演的 1951~1999 年共 49 年的逐月土壤湿度资料求得我国 100°E 以东 139 站 1991 年 2 月土壤湿度的距平值。

图 9 是 1991 年 2 月的情形, 图中粗线为零线。可以看到, 110°E 以东基本为土壤湿度的负距平区, 江淮流域也包括在内, 这显然与实况不符(参见图 7)。另外, 图 8 上湘黔桂交界的高值中心依然存在, 但图 9 本月的距平图上该区基本处于零线附近, 说明该区土壤湿度通常较高, 与前面提到的事实相符, 也说明 MRSIM 模型能很好地反演出这一高湿度区。综合图 7、8 和 9 的分析, 可以认为: 1991 年江淮大水模拟不好的原因和该区

前期土壤湿度初值与实况不符有直接的关系。

图 10 是反演的 1998 年 2 月土壤湿度的距平分布, 图上长江中下游乃至江南大部的高土壤湿度区十分清楚。虽然还没有观测资料直接验证, 但从降水和温度条件看, 该区前期降水频繁、气温偏低、长江水位持续偏高已是不争的事实。这期间出现较高的土壤湿度是合理的。这也进一步说明 MRSIM 模型反演的土壤湿度的质量对我们的模拟结果有重要影响。

6 结论

(1) 1998 年和 1991 年的典型个例分析表明, 前期土壤湿度异常对月季尺度的短期气候变化尤其是降水异常有重要影响, 应在预测实践中给予足够的重视。

(2) 改进了土壤湿度初始化方案的 IAP PSS-CA 对降水的模拟效果和土壤湿度初值的质量有密切的关系。这提醒我们虽然 MRSIM 模型的总体反演质量是较好的, 但仍需改进。

(3) 本文用到的土壤湿度初始化方案只需用到常规的前期气象观测资料来反演土壤湿度, 在实践中有很强的可操作性。

必须指出, 本文的工作只是一些初步的探索, 为得到更确定的结论, 今后更多个例的深入研究是十分必要的。

参考文献 (References)

- [1] Chahine T M. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 1992, **359**: 373~380
- [2] Trenberth K E. Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation. *J. Climate*, 1999, **12**: 1368~1381
- [3] Brubaker K L, Entekhabi D, Eagleson P S. Estimation of continental precipitation recycling. *J. Climate*, 1993, **6**: 1077~1089
- [4] Namias J. Persistence of mid-tropospheric circulations between adjacent months and seasons. In: *Rossby Memorial Volume*. Rockefeller Institute Press and Oxford University Press, 1958. 240~248
- [5] Namias J. Surface-atmosphere interactions as fundamental causes of droughts and other climatic fluctuations. *Arid Zone Research*, 1963, **20**: 345~359
- [6] Manabe S, Smagorinsky J, Stricker R J. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 1965, **93**: 769~798
- [7] Manabe S. Climate and ocean circulation, the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 739~774
- [8] Rowntree P R, Bolton J R. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1983, **109**: 501~526
- [9] Yeh T C, Wetherald R I, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 474~490
- [10] Xue Y, Sellers P J, Kinte J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J. Climate*, 1991, **4**: 345~364
- [11] Fast J D, McCordle M D. The effect of heterogeneous soil moisture on a summer baroclinic circulation in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2140~2167
- [12] Chang J T, Wetzel R J. Effects of spatial variations of soil moisture and vegetation on the evolution of a prestorm environment: A numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 1376~1390
- [13] Dimeyer P A. Problems in initializing soil wetness. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, **76**: 2234~2240
- [14] 马柱国, 魏和林. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. *气象学报*, 2000, **58**: 278~287
Ma Zhuguo, Wei Helin. Variation of soil moisture in eastern China and its relationship with climatic variability. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**: 278~287
- [15] 朱乾根, 兰红平. 土壤湿度和地表反射率变化对中国北方气候影响的数值研究. *气象学报*, 1996, **54**: 493~500
Zhu Qiangen, Lan Hongping. A numerical study of effects of soil moisture and surface albedo on climate in northern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**: 493~500
- [16] 刘永强, 叶笃正. 土壤湿度和植被对气候的影响 (II). *中国科学 (B辑)*, 1992, **22**: 554~560
Liu Yongqiang, Ye Duzheng. Effects of soil moisture and vegetation cover on climate (II). *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 1992, **22**: 554~560
- [17] 王万秋. 土壤湿度异常对短期气候影响的数值模拟试验. *大气科学*, 1991, **15**: 56~63
Wang Wanqiu. Numerical simulation of the effects of soil temperature and humidity anomaly on short-term climate change. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1991, **15**: 56~63
- [18] 李国平, 符淙斌, 叶笃正. 大尺度降雨异常对地面过程的影响——一类气候反馈机制的初步研究. *大气科学*, 1991, **15**: 23~31
Li Guoping, Fu Congbin, Ye Duzheng. Influences of large-scale persistent rainfall anomalies on the land surface process—One kind of climatic feedback processes. *Scientia Atmospherica sinica* (in Chinese), 1991, **15**: 23~31
- [19] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001. 458pp
Wang Shaowu. *Advances in Modern Climate Studies* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 458pp
- [20] 马柱国. 中国东部土壤湿度和区域气候变化的关系及一个土壤湿度反演模型的建立. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 1999
Ma Zhuguo. Relationship between soil moisture and regional climate change in eastern China and the establishment of a numerical model for retrieving soil moisture. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1999
- [21] 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等. 跨季度气候距平数值预测试验. *大气科学*, 1990, **14**: 10~25