

中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系*

马柱国 魏和林 符淙斌

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚研究中心,北京,100029)

摘 要

利用中国 100°E 以东地区 98 站共 11 a 的旬土壤湿度、降水和气温资料,对不同区域土壤湿度、降水和气温的变化趋势、年际变率及它们之间的相互关系进行了详尽的分析。结果表明:土壤湿度、降水和气温有较明显的变化趋势;土壤中各厚度层土壤湿度和降水的关系呈正相关关系,与气温呈反相关关系,且可通过 0.01 的置信度检验。这也说明现有土壤湿度观测资料在研究气候变化中的有效性。

关键词:土壤湿度,气候变化,相关,陆面过程。

1 引 言

地球表面由水、冰、雪和陆地等组成。这些不同的下垫面均通过提供和改变输入大气的感热、潜热和辐射能量而影响气候变化。陆面作为其中的重要组成部分有其复杂性,这种复杂性表现在植被的类型、地表覆盖状况、地形变化和土壤的质地、结构和属性等的不同可引起上述各输送量的较大差异,最终导致不同的气候变化。土壤中水分的变化更增加了陆面和大气相互作用的复杂性,首先土壤水能改变土壤表面的反照率,其次是改变土壤的热容量,同时土壤水可改变地表植被的生长状况。以上变化可引起地表能量收支的变化,最终导致气候的改变。因此,土壤水对气候变化影响的研究有其重要意义。

从众多的研究中不难看出土壤水分过程对气候变化的重要影响。Shukla 和 Mintz^[1]利用数值模式对干、湿土壤的影响作了对比试验,结果说明干、湿土壤对后期降水和气温的影响有较大差异;Walker 和 Rowntree^[2]的敏感性试验指出:干土壤可使未来气温升高,湿土壤可使后期降水持续。Yeh 等^[3]用 GFDL 的 GCM 研究了灌溉对气候的影响,结果指出,增加土壤含水量将使降水增加而使气温降低,类似的研究工作还有许多^[4,5],以上这些均指出土壤水对后期的气候有重要影响。但这些工作仅限于模式研究和敏感性试验,实际气候变化和土壤水的相互关系由于受观测资料的限制,至今仍然研究不多,特别是缺乏对土壤水的长期变化与气候变化关系的研究,加之目前所用的大多数 GCM 仍然采用的 Buket 陆面模式^[6,7],而该模式对土壤水文过程的描述显得过分的简单,植被的影响也考虑不够,因此,由此所得结果还需进一步的验证。但也有一些气候模式^[8],已与较复杂的陆面模式耦合^[9]。Robock 等^[10]利用俄罗斯 Valdai(俄罗斯的瓦尔代丘陵地区)流域的土壤湿度观测资料对 Buket 模式和 SSiB 模式^[11]进行了比较分析,结果指出,引起两个模式

* 初稿时间:1998 年 4 月 28 日;修改稿时间:1998 年 11 月 11 日。
资助课题:国家重点基础研究专项经费资助项目 G19990433400 和中国科学院大气物理研究的创新面上基金 8-2305 资助。

对土壤湿度模拟出现较大误差原因是由于两模式在田间持水量的取值不同。虽然目前陆面过程模式众多,但难以说明哪一个模式最好^[12]。模式的改进和发展需要实际资料的验证,不幸的是能用于研究土壤湿度和气候变化关系的实际观测资料有限,特别是时间序列较长的陆面资料。Vinnikov 等^[13,14]利用俄罗斯 Valdai 流域的土壤、水文、地表覆盖状况和表面气象观测资料对该流域的土壤水特征和表面通量进行了详细的分析,这是至今研究土壤湿度资料时间序列最长的工作,但缺乏对土壤湿度和气候变化关系的研究。

本文基于中国东部(100°E 以东)98 个站 11 a(1981~1991)的土壤湿度(用土壤重量含水百分率表示,土壤重量含水百分率 = $\frac{\text{土壤含水量(g)}}{\text{干土重量(g)}} \times 100\%$)、气温和降水旬资料,对不同区域土壤湿度的变率及其和气候(包括气温和降水)变率的关系进行了较为深入的探索。土壤湿度的观测在垂直方向共分 11 层(0~5,5~10,10~20,20~30,30~40,40~50,50~60,60~70,70~80,80~90,90~100 cm),资料的详细情况见文献[15]。

把中国东部地区可划分为 3 个区域,南方地区指 30°N 以南地区,中纬度指 30~40°N 之间地区,北方指 40°N 以北地区。表 1 为 3 个区域各参量观测站点的数目统计,表中气温和降水的站指既有土壤湿度又有降水和气温。分区的目的就是为了更好地分析不同地区土壤湿度变率的特征及其和气候变率的关系。

表 1 不同地区各参量的站数分布

观测参量	南方地区		中纬度地区		北方地区	
	土壤湿度	气温和降水	土壤湿度	气温和降水	土壤湿度	气温和降水
站 数	22	14	33	15	43	14

2 土壤湿度和气候的年际变率

由于本文的重点在于分析 3 个不同区域土壤湿度、气温、降水的年际变率以及它们之间的关系。因此,首先计算 3 个区域土壤湿度、降水、气温的区域平均时间序列,然后对该序列进行 37 旬的算数滑动平均。图 1 为 3 个区域平均的 4 个不同土壤层(0~5,20~30,50~60,90~100 cm)的土壤湿度、降水和气温的年际变化曲线。以下将分区讨论土壤湿度的年际变率特征及其与气候变率之间的关系。

2.1 中国南方

由图 1 a~c 可以看出,随着深度的增加,土壤湿度的年际变化曲线上小波动的振幅依次减小。在深层(90~100 cm),土壤湿度只是一种变化趋势而不存在周期性变化,另外,表层土壤湿度对降水的依赖关系非常明显,但其变幅比降水小。因此,可以说表层土壤湿度的年际变化主要受降水的年际变化控制。值得注意的是,从深层到浅层,该区域土壤从 1980 年代开始变干,其年际变化在深层可达 -10.4/9 a(见表 2)。表 2 还给出,深层土壤干化的强度大约是表层土壤干化的 3 倍。不难看出,该地区土壤干化现象与降水的减小(图 1c)和由气温升高(图 1d)所引起地表蒸发的增加有关,然而为什么深层的干化强度大于浅层值得进一步研究。

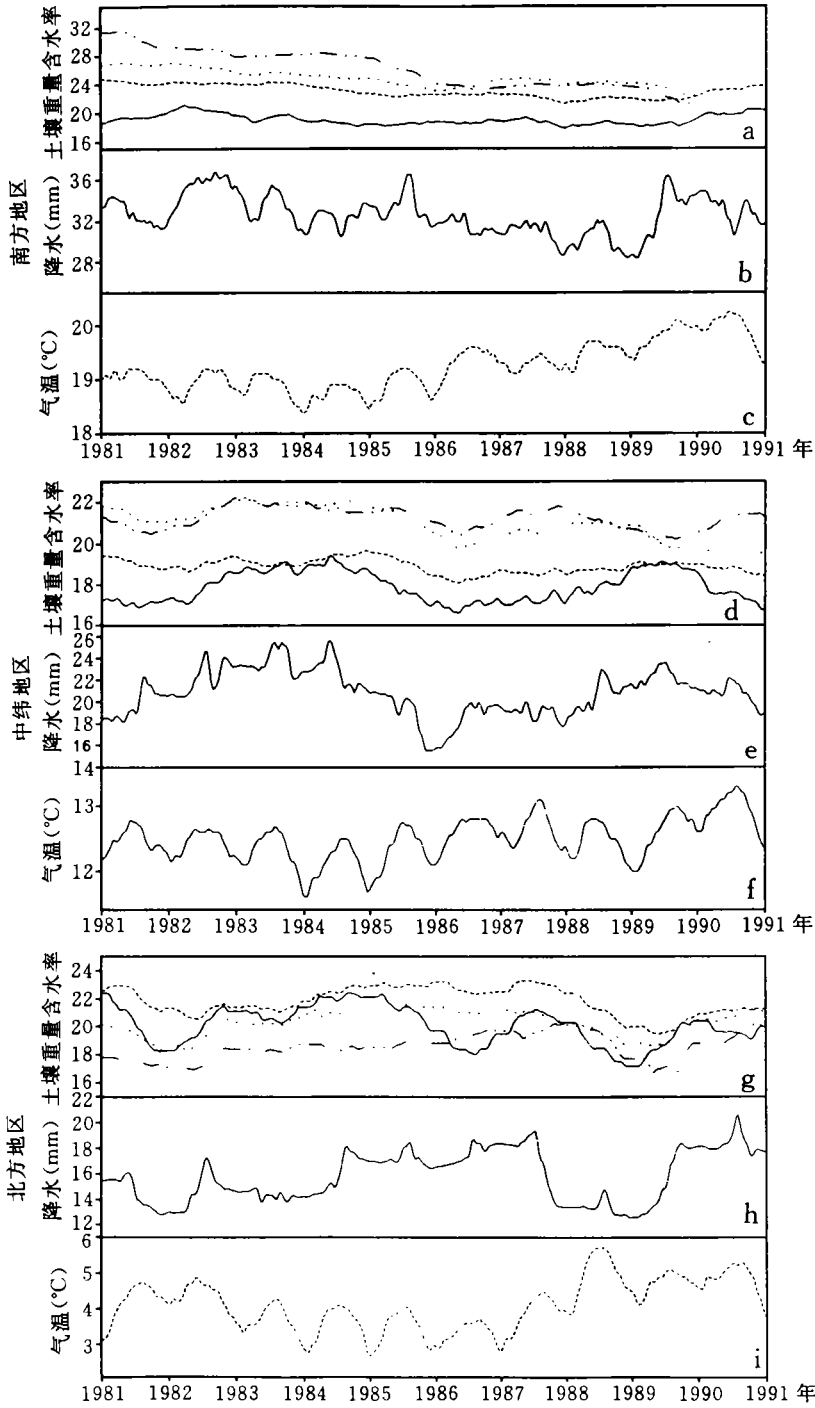


图 1 土壤湿度、降水和气温的年际变化曲线

(37 个旬的滑动平均土壤湿度分 4 层: 实线 0~5 cm, 短线为 20~30 cm, 点线为 50~60 cm, 点画线为 90~100 cm)

表 2 土壤湿度、降水和气温的年际变率

气温	降水	土壤湿度(%)			
		0~5 cm	40~50 cm	80~90 cm	90~100 cm
0.6°C/5 a	-4.8/6 a	-2.3/6 a	-0.3/7 a	-10.4/9 a	-10.4/9 a

以上事实说明,该区域土壤从 1980 年代开始正逐渐干化,降水呈减小趋势,温度升高。另外,作为一个相互反馈的过程,土壤变干将使土壤温度升高,土壤温度的升高使得地表输送到大气的感热增大,随之表面大气的温度增高,形成一个土壤湿度与大气温度的负反馈过程。可以肯定,土壤干化所引起的气温升高更加剧了土壤的干化。也许中国南方温度的升高与土壤湿度的干化有关,两者具有相互增强的作用。

2.2 中纬度地区

从图 1d~f 可以看出,无论深层还是浅层土壤,土壤湿度的年际变幅均较南方的大,且存在明显的年际变化。在深层,土壤湿度存在一个 3~4 a 的周期变化;而表层土壤湿度年变化为两波型,周期的长度大约为 4~5 a,深层土壤湿度的 3~4 a 的周期变化在降水和气温的表现并不十分清楚。有意思的是,50~60 cm 土壤层的土壤湿度既不同于表层土壤也不同于深层土壤,而是在其周期振动的基础上叠加了一个土壤湿度降低的趋势。在此对滑动序列的极小值和极大值进行统计列于表 3。可以看出,除表层土壤外,其它层次的土壤湿度、极大值和极小值随着时间不断减小,说明土壤干化现象在中纬度深层土壤中同样存在,变干的原因也与降水的减小和气温升高所引起的地表蒸发的增加有关。而表层土壤湿度干化现象弱于深层又是一个值得研究的问题。

表 3 土壤湿度、气温和降水的极值统计

	降水(mm)		气温(°C)		土壤湿度(%)							
	极大值	极小值	极大值	极小值	0~5 cm		40~50 cm		80~90 cm		90~100 cm	
	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值
1	25.9	18.1	12.7	11.6	19.5	16.9	21.4	19.5	22.1	20.5	22.2	20.6
2	23.8	15.4	13.1	12.0	19.1	16.6	20.3	19.2	21.8	20.3	21.7	20.4
3		19.2	13.3	12.3		16.7		18.4	21.3	20.2	21.5	20.2

1:表示时间序列的第一个极大值或极小值,依次类推。

2.3 北方地区

40°N 以北地区的土壤湿度观测站主要分布在东北地区,因此这里所说的北方地区也就是东北地区。图 1g~i 土壤湿度、降水和气温的年际变化曲线。可以看出,尽管土壤湿度的变化曲线与降水的变化曲线并不吻合,但 1982 年和 1989 年的极干土壤对应的是同期降水的极小值。另外,从图可以看出,表层土壤湿度和深层土壤湿度具有相反的变化趋势,表层土壤变干,深层土壤的趋势为变湿。降水的变化趋势难以直观判断,但气温的升高趋势是明显的。我们认为,该区域表层土壤的干化现象与区域增暖有关,而这种增暖对深层土壤影响不大。比较该区域与上述两区域的特征发现,在不同地区,大气温度对土壤湿度的影响深度不同。

综合上述分析可知:在 40°N 以南地区,尽管影响土壤湿度的降水增加,但仍逐渐干

化,这种干化现象理论上与气温上升有关;40°N 以北地区,表层土壤受区域增暖的影响具有变干的趋势,而这种影响却难以到达土壤深层,该区域深层土壤变湿。

2.4 用 M-K 法检验土壤温度的变化

前述的不同区域、不同土壤层的土壤湿度、降水和气温存在着变化趋势。而这种趋势是否客观存在有必要进行检测。为此引入 M-K 法^[16,17](Mann-Kendall 方法)对土壤湿度、降水和气温的趋势加以验证,在给出检测结果以前,首先简要介绍 M-K 法。

M-K 法假设被分析要素的序列 x_1, x_2, \dots, x_n 为平稳的时间序列,遵从正态分布,各样本之间是相对独立的。设某一元素 x_i 大于前面要素 x_{i-1}, \dots, x_1 的累积数为 m_i ,总累积数计为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N)$$

而新建序列 d_2, \dots, d_N 的均值和方差可计为:

$$E_{(d_k)} = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2 \leq k \leq N)$$

$$\text{Var}_{(d_k)} = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$

将新建序列 d_k 标准化得:

$$U_{(d_k)} = \frac{[d_k - E_{(d_k)}]}{\sqrt{\text{Var}_{(d_k)}}}$$

其中 $U_{(d_k)}$ 为标准分布,若概率分布为 $a_1 = \text{prob}(|U| > |U_{(d_k)}|)$,给定显著水平 a_0 ,当 $a_1 > a_0$ 时,原假设成立,若 $a_1 < a_0$,则原假设不成立,说明该要素存在明显的变化趋势。标准化的新序列 $U_{(d_k)}$ 将组成一条新的时间变化曲线,如果该曲线落在置信区间内,那么原序列不存在变化趋势,反之,原序列存在显著的变化趋势。

图 2 为 3 个区域不同土壤层土壤湿度、降水和气温用 M-K 法所计算的 $U_{(d_k)}$ 的分布曲线。查表可知,变化趋势要达到 95% 的可信度, $U_{(d_k)}$ 须落在置信区间 $|U| \leq 1.96$ 之外。图 2 为 3 个区域不同深度土壤湿度和降水、气温的 $U_{(d_k)}$ 分布。可以看出:在南方,从深层到浅层土壤,土壤有显著的变干趋势,且降水有明显减少的趋势,气温增加;在中纬度地区,表层土壤没有明显的变化趋势,而深层土壤显著变干,降水减少,气温增加显著;北方地区深、浅层土壤湿度变化趋势相反,表层变干,深层变湿,降水和气温均为增加趋势。北方土壤湿度深、浅层的相反变化趋势说明,受该地区温度增加的影响,地表蒸发增大,因而浅层土壤变干,而这种影响对深层土壤湿度却影响不大。这是北方地区与中纬度和南方地区的不同之处,以上结果说明,不同区域土壤湿度、降水存在显著的变化趋势,而 40°N 以南地区土壤的干化现象是不容置疑的事实。

3 区域平均土壤湿度和气候的相关

3.1 时滞相关系数的计算方法

对 3 个不同地区区域平均的土壤湿度、降水和气温做 37 个旬的滑动平均,然后计算不同地区、不同土壤层土壤湿度与降水和气温的时滞相关系数。

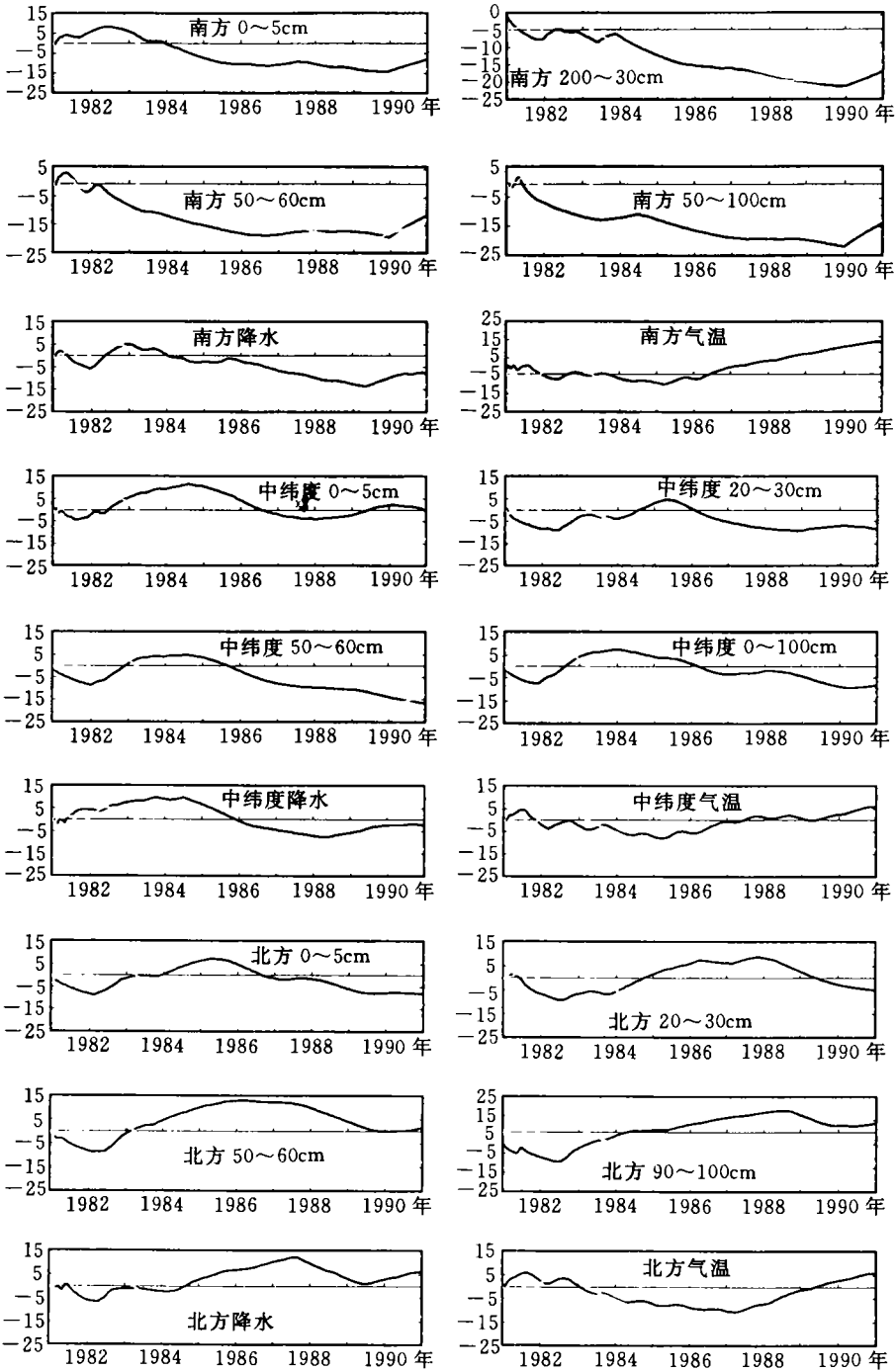


图 2 M-K 法计算的土壤湿度、降水和气温的 $U(a_k)$ 分布

(纵轴为 $U(a_k)$ 值, 横轴为年份)

3.2 结果分析

3.2.1 土壤湿度和降水的关系

根据地表水收支方程可知,降水的增多有利于土壤湿度的增加,而土壤湿度的增加(在未饱和土壤中)同样使得地表蒸散增加,地表蒸散的增加为后期降水的增加提供了水气,最终将使降水进一步增加。

从图 3a 可以看出,中国南方在大约 50 个旬左右,地表层(0~5,20~30 cm)土壤湿度和降水呈现显著的正相关关系,且通过 $\alpha=0.01(r_c=0.135)$ 的显著性检验。有意思的是,在 20~30 cm 土壤层,土壤湿度和降水的时滞(包括超前和滞后)相关系数最大,且超过 $\alpha=0.01$ 显著性检验的时滞时间最长。随着深度的增加,两者的时滞相关性越来越弱,在 50~60 cm 层以下,相关仅表现在降水超前土壤湿度 33 个旬的时段内,而在其它时段内,土壤湿度和降水的时滞相关系数非常小。综合以上分析,可以断定,在湿润的南方,土壤湿度和降水的关系主要表现在土壤的表层,随着深度的增加,两者的关系逐渐减弱,在深层,土

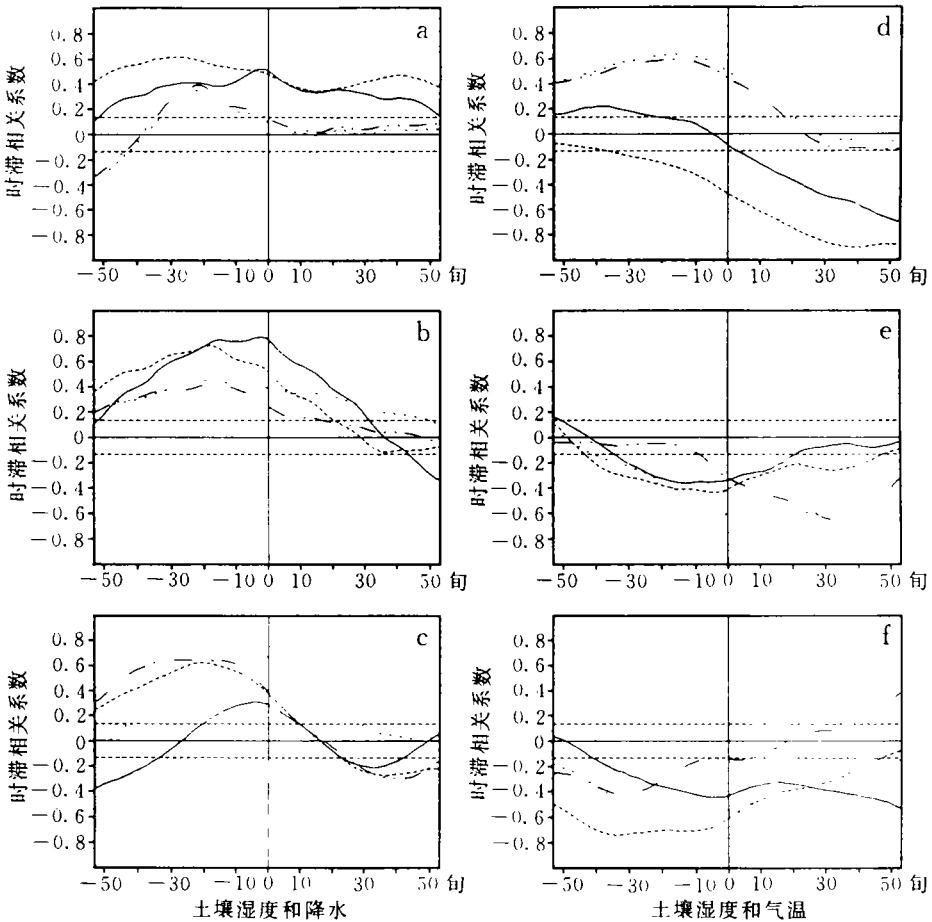


图 3 土壤湿度和降水、气温的时滞相关系数

(实线为 0~5 cm,短线为 20~30 cm,点线为 50~60 cm,点画线为 90~100 cm。
平行于横轴的两条虚线为时滞相关系数超过 99% 显著性检验的临界值 $r_c=0.135$)

壤湿度仅表现在对降水的响应,对降水的影响却非常小。

在中纬度,可以看出(图 3b)表层(0~5 cm)土壤湿度和降水的关系的大约 20 个旬的时滞时间内相关系数大于其它各层,且同期(时滞时间等于 0)相关系数为最大。相关系数随着深度的增加而减小,但超过 $\alpha=0.01$ 信度检验的时滞时间增加,与南方深层土壤与降水的关系比较可知,中纬度深层土壤湿度和降水的关系较密切,在土壤湿度超前降水 21 个旬的时段内,土壤湿度与降水显著相关。也就是说,土壤湿度对半年左右的降水有重要的影响。

在北方(图 3c),相关系数的时滞时间分布与中纬度基本相似。它的显著特征是随着深度的增加,时滞相关系数增大,时滞时间增加。这是与上述两个地区的显著差异。

归纳起来,可以得出:土壤湿度与降水在基本呈正的时滞关系,在不同地区不同深度,时滞相关系数的大小和时滞时间的长短均有差异。另外,分析结果也说明了数值实验结果^[3,5]的可靠性。

3.2.2 土壤湿度和气温的关系

土壤湿度对大气温度的影响是通过其对土壤表层能量收支的影响而产生的。首先,土壤湿度的变化可改变土壤内部的热容量;其次,土壤湿度的变化可改变土壤表面的反照率(含水量的变化可改变土壤的颜色),使得地表的热能收支发生变化;还有,不饱和和土壤湿度的变化影响了地表蒸散(植被表面和土壤表面的蒸发和蒸腾之和)的大小。这一系列的变化,使得地表向大气输送的感热和潜热发生变化,从而产生不同的气候变化。Shukla 和 Mintz^[1]的数值试验结果也指出:干、湿土壤向大气所输送的感热和潜热有显著差异,这种差异与土壤湿度的大小密切相关。以下从观测资料出发,用土壤湿度和气温的关系分析证明这一点。

首先,在南方(图 3b),表层(20~30 cm 以上)与深层的土壤湿度和气温关系有显著差异。在表层,0~5 cm 层土壤湿度超前气温呈反相关关系,而前期气温和后期土壤湿度为微弱的正相关关系(时滞相关系数小,不能通过置信度检验)。在深层,土壤湿度和气温的时滞关系呈显著的正相关关系。土壤湿度和气温相反的时滞相关性(时滞相关系数为负)从能量平衡角度很容易理解。在地表能量收支方程中 $R_n = H + LE + G$,假定 R_n 和 G 均为常数,而 H 随气温的增高而变小(假定地表温度 $T_s = \text{常数}$),这时 $LE (= R_n - H - G)$ 必然增大,土壤将失去更多的水分,土壤湿度势必降低,因此,前期大气温度和后期土壤湿度呈反相关关系。但在深层,后期土壤湿度对前期大气温度有正的反馈作用的原因尚不清楚。

根据中纬度土壤湿度和气温的关系(图 3e)可以看出:在 40~50 cm 以上土壤层中,通过信度检验的时滞相关系数的分布为一个偏态分布,正的时滞时间最大为 23 个旬,负的时滞时间最大为 35 个旬。在深层,同样存在这种偏态分布,但所不同的是偏态分布的重心在时滞时间为正的一方。由此可以看出:前期大气温度对浅层土壤湿度影响的时间较长,而土壤湿度对气温的影响相对较短。相反,深层土壤湿度对后期大气温度影响的时间较长,而大气温度对深层土壤湿度影响的时间相对较短。深层土壤湿度对大气温度影响的最长时滞时间可达 67 个旬。这表明,气温对土壤湿度的影响主要表现在浅层,而深层土壤湿度对后期气温有重要影响。

从北方各层土壤湿度和气温的相关图(图 3f)来看,无论在表层还是深层,土壤湿度

在超前和滞后均呈反相关关系。在 0~5 cm 层,前期土壤湿度与后期温度有较好的负相关关系,且这种负相关关系可持续两年以上;在深层,气温对后期土壤湿度的影响较显著,且有较长时滞相关。综合以上分析可知,土壤湿度和气温的相关关系既存在不同层次之间的差异,同样也存在不同区域之间的差异。总体来讲,气温和土壤湿度的反相关关系是普遍的,且可达到 0.01 置信度检验,但南方地区深层土壤湿度和气温的正相关关系的原因有待于进一步研究。

4 结论与讨论

综合以上分析,可得如下结论:

- (1)不同区域土壤湿度有不同的变化趋势。40°N 以南地区,从 1981~1989 年,深层土壤逐渐干化,这种干化现象随着深度的增加而逐渐增大,降水减小,气温增高,土壤的干化现象和降水的变化趋势并不吻合;在中纬度地区,土壤湿度存在 3~4 a 的周期变化。40°N 以北地区,深层土壤变湿,浅层变干,降水增加,温度上升。从位相差分析可知,40°N 以南地区,土壤湿度变化的位相超前于气候变化时,但这种关系在土壤表层的表现并不清楚,其中的原因尚待研究。
- (2)土壤湿度和气候的相关分析指出,土壤湿度和降水的关系呈正相关关系,与气温呈反相关关系。不同层次不同区域,这种关系有显著差异。

从以上对土壤湿度和区域气候的关系进行的初步分析的结果来看,无论超前还是滞后,土壤湿度和气温、降水均有密切的关系。我们认为,在研究气候变化的模式或预测气候变化时,土壤湿度应是一个值得重视的因素,但如何考虑土壤湿度的变化仍然是当前气候模式研究中的一个重要问题。

参考文献

- 1 Shukla J, Mintz Y. The influence of land-surface evaporation on the earth's climate. *Science*, 1982, 215, 1498—1501
- 2 Walker J, P R. Rowntree The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1977, 103, 29—46
- 3 Yeh T C, Wetherald R I, Manabe S. The effect of soil moisture on the shortterm climate and hydrology change= A numerical experiment. *Mon Wea Rev* 1984, 112, 474—490
- 4 Rind D. The influence of ground moisture conditions in North America on summer climate as modeled in the GISS GCM. *Mon Wea Rev*. 1982, 110, 1487—1494
- 5 Rowntree P R, Bolin J A. Experiment with soil moisture anomalies over Europe, The GARP Programme on Numerical Experimentation; Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling. R. Asselin (Ed.), GARP Report, NO. 18, WMO/ICSU, Geneva, August 1978, pp63
- 6 Manabe S. Climate and ocean circulation I: The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon Wea Rev*. 1969, 91, 739—774
- 7 Manabe S, Smagorinsky J, Stricker R J. Simulated climatology of general circulation model with a hydrological cycle. *Mon Wea Rev*, 1965, 93, 769—798
- 8 Giorgi F. Perspectives for regional earth system modeling. *Global and Planetary Change*, 1995, 10, 23—42
- 9 Dinkinson R E, Henderson-sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. 1986. NCAR Tech. Note NCAR/TN-275+STR, 69pp [Available from National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307.]

- 10 Robock A, Vinnikov K Ya, Schlosser C A. Use of Midlatitude soil moisture and meteorological observations to validate soil moisture simulations with biosphere and Bucket models. *J Climate*, 1995, 7, 15—35
- 11 Xue Y, Sellers P J, Kinter J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. *J Climate*, 1991, 4, 345—364
- 12 Shao Y P, Henderson-sellers A. Validation of soil moisture simulation in landsurface parameterisation schemes with HAPEX data. *Global Planet Change*, 1996, 13, 11—46
- 13 Vinnikov K Ya, Yeserkepova I B. Soil moisture: Empirical data and model results. 1991, 1, 66—79
- 14 Vinnikov K Ya, Robock A, Speranskaya N A, et al. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. *J Geop Res*, 1996, 101, 7163—7174
- 15 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式的建立; [学位论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1999, P121
- 16 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482~493
- 17 Snyers R. On the statistical analysis of series of observations. 1990, Technical Note, 143, WMO, Geneva, 11

RELATIONSHIP BETWEEN REGIONAL SOIL MOISTURE VARIATION AND CLIMATIC VARIABILITY OVER EAST CHINA

Ma Zhuguo Wei Helin Fu Congbin

*(START Regional Center for Temperate East Asia Institute of Atmospheric Physics
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)*

Abstract

Based on the data of soil moisture, precipitation and temperature every ten-day over the east of China from 1981 to 1991, their trend, interannual variability and relationship among them were analyzed. The results indicate the notable trend of soil moisture, precipitation and air temperature, positive correlation between soil moisture in every layer and precipitation, and negative correlation soil moisture and air temperature can be found, the correlation coefficient reaches the testing of degree of confidence of 0.01. Also the results mean the data is useful for analyzing the relationship between soil moisture and climate change.

Key words: Soil moisture, Climate Change, Correlation, Land-surface process.