

中国东部春季土壤湿度的时空变化特征

左志燕, 张人禾*

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: renhe@cma.gov.cn

收稿日期: 2008-06-16; 接受日期: 2008-09-02

国家重点基础研究发展计划(编号: 2004CB418302)和国家自然科学基金项目(批准号: 40225012)资助

摘要 利用中国气象局提供的土壤湿度观测资料和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-40 土壤湿度再分析资料, 在仔细比较分析两套资料的基础上, 研究了 100°E 以东中国春季土壤湿度的空间分布特征及其在不同时间尺度上的变化特征, 结果表明 ERA-40 资料能很好的再现中国东部春季土壤湿度的时空变化特征, 较好地反映出了中国春季土壤存在东北和西南湿、华北和内蒙古干的地理分布及其年际变化. 在整个中国东部地区, 春季土壤存在不同程度上的干旱化现象; 其中西南地区土壤从浅层到深层都存在一致的变干趋势, 20 世纪 80 年代后这种变干趋势变得显著; 在东部中纬度地区, 浅层土壤湿度具有明显的年际变化特征, 没有明显的干化趋势, 但深层土壤湿度从 1988 年以后存在较为明显的干化现象; 东北地区浅层和深层土壤也存在较明显的变干趋势, 其中浅层土壤在 20 世纪 70 年代初以后变干趋势减缓, 而深层土壤在 70 年代末以后的变干趋势加剧.

关键词

土壤湿度
中国 100°E 以东
春季
时空变化

在气候系统中, 土壤湿度是一个很关键的变量. Walker 和 Rowntree^[1]发现非洲降水对初始的土壤湿度很敏感, 非洲土壤异常干化使得非洲降水持续负异常, 可导致非洲出现沙漠化. Yeh 等^[2]最早提出土壤湿度对气候有记忆功能. Kanae 等^[3]研究发现对于地表潜热和感热负反馈关系比较明显的半干旱地区而言, 土壤湿度在季节时间尺度上的陆气之间相互作用起主导作用, 偏湿的土壤能带来更多的降水. 土壤湿度作为陆面过程的一个重要物理参数, 积累了地表水文过程的大部分信息, 也是固体地球和生命物质的界面及生命物质、生物化学循环的主要过程. 它通过影响地表的反照率、热容量、陆面植被的生长状况以及蒸发和蒸腾来改变陆气之间的感热通量、潜热通量、辐射通量和动量通量, 从而引起气候变化.

土壤湿度的观测对于气候分析、模式发展以及卫星遥感陆面状况都很关键. 由于土壤湿度为非常规

观测量, 且其时空变率大, 观测仪器昂贵, 使得土壤湿度的观测起步很晚. Robock 等^[4]收集了全球大约 600 个站点的土壤湿度资料, 建立了一个土壤湿度站点观测资料库. 研究发现, 除了有限的几个小区域(如前苏联的乌克兰具有 45 a 的较长时间序列的观测资料), 全球范围内都缺乏一个连续的长时间序列土壤湿度观测资料. 虽然在土壤湿度的观测方面取得了一定进展, 但缺乏一个具有区域尺度的长时间序列的土壤湿度观测资料依然是制约土壤湿度气候学进展的关键所在.

关于土壤湿度对气候的影响, Delworth 和 Manabe^[5]提出土壤湿度长时间的异常可能是地表层对随机降水强迫的反应, 降水储存在土壤中然后慢慢释放反馈大气, 从而使其时间尺度变长, 频谱变宽. Vinnikov 等^[6,7]利用该观点分析前苏联和俄罗斯的十几个站点数据, 发现土壤湿度异常主要分为两个部

分: 其一为受土壤类型、地形、植被及其根系结构影响的小尺度白噪音部分, 另一为受降水和蒸发影响的大尺度红噪音部分. Entin等^[8]利用土壤湿度自相关函数方法分析了热带以外的全球土壤湿度站点观测资料库, 结果发现中国 1 m 土壤湿度时间尺度约为 2~3 个月, 空间尺度约为 500 km. Koster等^[9]提出中国东部是个较显著的土壤湿度气候敏感区. 东亚是大气圈、水圈和生物圈相互作用十分活跃的地区, 其土壤湿度对区域气候特别是季风形成和发展具有非常重要的作用. 马柱国等^[10,11]利用中国 11 a 的土壤湿度观测资料详细分析了我国境内土壤湿度的季节循环、年际以及年代际变化及其与气候变率的关系. 何志斌和赵文智^[12]分析了中国半干旱地区流动沙地土壤湿度时空变异特征及其与降水的关系. 张秀芝等^[13]利用中国土壤湿度观测资料, 分析了土壤湿度的垂直分布特征. 孙丞虎等^[14]分析了淮河流域 1990~2000 年期间的土壤湿度资料, 揭示了淮河流域土壤湿度的空间分布型及其与降水、气温的关系.

已有的研究表明土壤湿度对气候的影响具有一个季度的时间尺度, 即春季土壤湿度可以影响夏季气候. 事实上, 左志燕和 张人禾^[15]的研究表明, 中国春季土壤湿度通过影响东亚夏季风的强度, 进而对

中国夏季降水产生影响. 因此, 研究春季土壤湿度的变化规律对认识东亚夏季风的变异具有重要的科学意义. 鉴于截至目前还缺乏对春季土壤湿度长期变化的系统研究, 本文将利用中国土壤湿度观测资料和 ERA-40 资料来分析中国春季土壤湿度的时空变化特征, 同时也利用观测资料来对 ERA-40 土壤湿度资料进行详细的质量评估.

1 土壤湿度资料

目前中国气象局可以提供 279 个站点的土壤湿度观测资料. 测量方法为烘干称重法. 这套数据测量的土壤湿度为重量含水率. 观测时间在暖季节每 10 d 观测一次(每个月的 8, 18 和 28 日), 冬季在冻土地区没有观测. 观测年限为 1981~2002 年, 1991 年之前为 11 层数据, 分别为 0~5, 5~10, 10~20 cm, 自 20 cm 起逐层增加 10 cm, 直到 1 m 厚度. 1991 年以后为 10 层, 每 10 cm 为一层直到 1 m 厚度. 这些观测站点大多分布在中国东部农业作物区, 数据观测时间在 20 a 以上的区域主要集中在 100°E 以东的江淮流域、中国东北地区以及南方部分地区. 其中接近 20 a 时间尺度的站点大约有 61 个, 这 61 个站点主要分布在东北地区(33 个站)、东部中纬度地区(24 个)和西南地区(4 个)(图 1). 华北、内蒙和东南地区基本没有连续的观

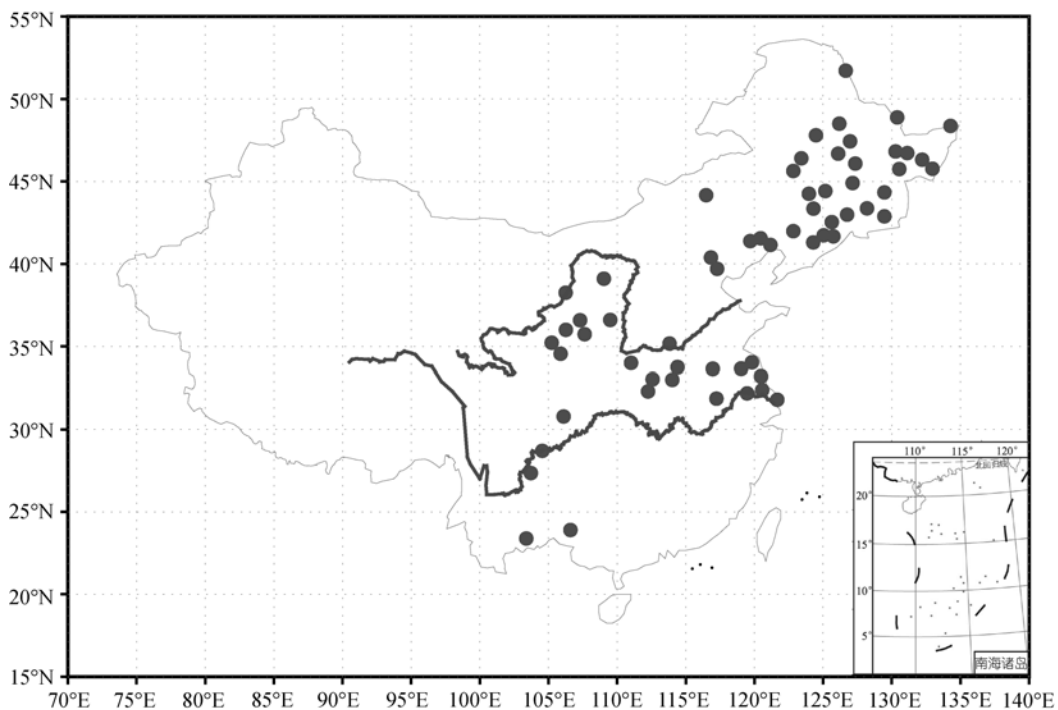


图 1 观测时间达到 20 a 的中国土壤湿度观测站点分布图

测资料. 在中国西部和高原地区测站非常少, 观测时间晚, 且缺测较多, 数据的可利用性很低. 因此, 这些站点资料只能用来分析土壤湿度的一些局地特征, 不足以用来系统研究中国土壤湿度的区域尺度特征.

由于中国土壤湿度观测比较复杂, 目前用于研究的观测资料大多约为 10 a 左右的时间尺度, 这样短的时间序列对于土壤湿度不同时间尺度特征的研究是远远不够的. 另外, 中国土壤湿度观测大多集中在东北、江淮和西南部分地区, 其他如华北, 西北和东南地区基本没有连续的观测资料. 也就是说, 由于土壤湿度观测资料的时空尺度有限性, 迄今为止大多数利用土壤湿度观测资料的研究结果只能说明某些具体的问题, 对于区域尺度或者长时间尺度而言, 并不具有代表性. 因此, 利用模式产生的土壤湿度资料往往成为研究工作的替代品. Li 等^[16]在中国选择了 10 个缺测较少(80%的观测时间都有值)的站点来评估 NCEP 两代和 ECMWF(European Centre of Medium-Range Weather Forecasts)的 ERA-40 土壤湿度再分析资料在中国区域的可信度. 在这 10 个站点中, 1 个位于中国西部地区, 4 个位于东北和 5 个位于江淮和河套地区. 研究发现除了西部站点外, 虽然点对点的对比还存在一定的差异, 但 ERA-40 资料能较好的反映观测资料的年际变化, 其记忆时间也与观测资料相近, 并能抓住春季土壤湿度的高峰期事件. 相对而言, NCEP 两代再分析资料则不能很好的抓住观测资料的这些特征. 张文君^[17]通过把 ECMWF 的 ERA-40 和 NCEP 再分析资料、第二代 GSWP 和 CLM 的土壤湿度资料与中国土壤湿度观测资料进行比较, 发现 ERA-40 资料不论是在土壤表层还是深层, 都较好地揭示出中国东部中纬度地区土壤湿度的干、湿年的变化特征.

鉴于以上的研究, 本文除了利用土壤湿度观测资料外, 也将利用 ERA-40 土壤湿度资料来对中国春季的土壤湿度的时空特征进行探讨, 并细致比较两套资料的异同. ECMWF 的 ERA-40 土壤湿度利用 TESSEL(Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land)^[18]作为地表的交换方案, 该方案分 4 层分别对土壤湿度和土壤温度进行诊断, 其 4 层厚度分别为 7, 21, 72 和 189 cm. 资料的时间从 1957 年 9 月到 2002 年 8 月, 空间分辨率为 T159(约为 125 km).

ERA-40 土壤湿度资料为土壤的体积含水量, 观测资料为土壤的重量含水量. 根据以下公式可以对土壤的体积含水量和重量含水量进行换算:

$$q = w \times \rho,$$

其中 q 为土壤的体积含水量, w 为土壤的重量含水量, ρ 为干土壤的容重(g/cm^3). 目前中国气象局提供的干土壤容重资料大多只是在 1996~2001 年之间有较为连续和大范围的观测, 且在 1996~2001 年期间干土壤的容重几乎没有变化, 相对土壤的重量含水量的而言, 土壤容重的变化是小量. 鉴于此, 我们不考虑干土壤容重的变化, 而将其作为一个常数. 将 1996 年的干土壤容重资料推广到 1982~2001 年期间而不考虑土壤容重在这期间随时间的变化. 对于土壤湿度和干土壤容重资料中的缺测部分, 我们利用最优插值法对缺测的土壤湿度资料进行插值.

在冬季中国基本没有土壤湿度观测, 较连续的观测一般从 4 月份开始, 因此文中的春季是指在 4 和 5 月平均. 同时因为观测资料在 50 cm 以下层缺测较多, 因此本文只对 10, 20 和 50 cm 层的土壤湿度时空特征进行探讨. 10, 20 和 50 cm 层分别代表表层、次表层和中层土壤湿度. 为了便于进行比较, 我们将 ERA-40 土壤湿度资料线性插值到 10, 20 和 50 cm 层.

2 土壤湿度及其异常的空间分布特征

为了与观测资料进行比较, 图 2(a)给出了中国 100°E 以东地区 ERA-40 表层(10 cm)土壤湿度资料近 20 a(1982~2001)平均的春季土壤湿度的地理分布特征. 次表层(20 cm)和 50 cm 土壤湿度的地理分布特征与表层基本一致(图略). 可以看到, 春季中国土壤湿度从内蒙和华北向东北和东南逐渐增加, 即呈现华北干, 东北和东南湿的分布特征. 这种分布具有较大的合理性. 中国东北森林覆盖比较高, 属于亚寒带针叶林的原始森林地带, 中国华南位于亚热带地区, 水分和热量条件充足, 具有较多的植被覆盖. 高的植被覆盖具有较强的固水能力, 对应着为土壤湿度高值区. 而中国华北和内蒙古地区为干旱半干旱气候带, 降水少, 且其植被类型多为草原, 地表固水能力差, 因此该区域的土壤湿度较低. 土壤湿度的这种地理分布特征较好的反应了每个区域气候带和下垫面植被类型特征.

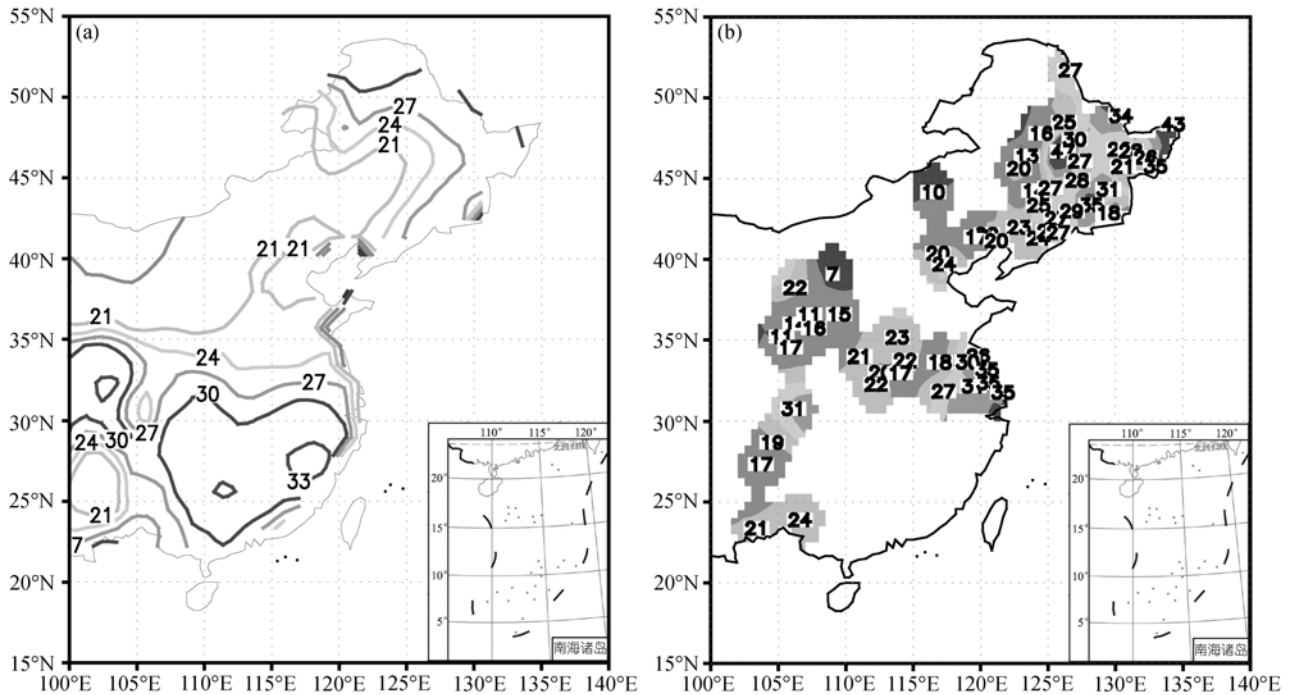


图 2 20 a(1982~2001 年)平均的 10 cm 层土壤湿度地理分布图

(a) ERA-40 资料; (b) 观测资料

在观测资料(图2(b))中, 100°E 以东的东北地区是一个土壤湿度相对高值区, 其体积百分比约为 30%, ERA-40 资料较好的再现了该土壤湿度高值区; 在长江和黄河流域之间的中国东部中纬度地区, 土壤体积含水量的观测值约在 0.2~0.3 之间, 从南往北呈梯度递减. ERA-40 资料量级也基本与观测资料相当. ERA-40 资料甚至抓住了观测资料中中国 100°E 以东的西南地区(100~105°E, 小于 30°N)宜宾站的土壤相对周围土壤偏干的特征. 另外也看到, 在 100°E 以东的中国华北到内蒙古地区, ERA-40 的 10 cm 层土壤湿度大致约为 15~20 个体积百分比, 而观测资料中该区的土壤湿度大致为 10~15 个体积百分比. 说明 ERA-40 资料对该区土壤湿度的模拟略有偏高.

由此可看出, ERA-40 资料的地理分布特征能较好的反映气候带和下垫面的植被覆盖状况, 同时也能较好的反映观测资料中的地理分布特征. 除了在内蒙古干旱半干旱地区的土壤湿度的再分析值略有偏高外, ERA-40 资料较好地给出了东北土壤湿度的高值区特征, 其在中国东部中纬度地区土壤湿度的量级与观测资料也基本相当, 甚至给出了西南地区

小尺度土壤相对较干的特征.

我们利用 EOF 方法来分析土壤湿度异常的空间分布特征. 图 3 给出了春季 10 cm 层标准化的土壤湿度 ERA-40 和观测资料的 EOF 分析的第一空间模态. 次表层(20 cm)和 中层(50 cm)土壤湿度的 EOF 分析结果与表层类似(图略). 从图 3 可以看到, 中国东部中纬度大部分地区(105°~120°E, 30°~40°N)的土壤湿度异常特征一致, 是土壤湿度变率最大区, 说明该区是一个土壤湿度异常的气候敏感区. 这个区域是中国南北气候的过渡带, 气候变率非常大, 陆-气相互作用很活跃, 因而土壤湿度异常相对较为显著. 这个结果与孙丞虎等^[14]利用 1990~2001 年中国东部 114 站的土壤湿度观测资料的 EOF 空间第一模态基本一致. 左志燕和张人禾^[15]的研究表明此区域春季土壤湿度异常对中国夏季降水有重要影响. 61 个站点的土壤湿度观测资料得到的结果与 ERA-40 资料类似, 从中可以看到中国东部中纬度地区确实是一个土壤湿度异常的显著区. 另外从图 3 还看到东部中纬度地区与东北和西南地区的土壤湿度呈现相反的变化特征, 也就是说当中国东部中纬度地区春季土壤偏湿时, 西

南和东北地区土壤是偏干的. 两套资料的EOF第一模态的时间系数的变化也基本一致, 进一步证实 ERA-40 资料能较好的抓住观测资料中土壤湿度异常的变化特征. 两套资料的EOF第一模态都有较大的方差贡献(表 1).

从前面的分析可以看到, ERA-40 资料能较好地再现土壤湿度观测资料的空间分布特征. 同时也看到中国东部中纬度地区是土壤湿度异常的气候敏感区. 根据土壤湿度异常的地理分布特征以及观测资料的站点分布特征, 我们将中国 100°E 以东的部分分为 3 个区域, 即西南地区(100~110°E, <30°N), 东部中纬度地区 (105°~120°E, 30°~40°N) 和东北 (>115°E, >40°N)3 个地区, 进一步讨论春季土壤湿度随时间演

变的特征. 需要指出的是, 文中的西南地区位于 100°E 以东, 因此我们在文中将该区纳入中国东部的范围.

3 土壤湿度的年际变化

图 4 给出了 3 个地区 ERA-40 和站点观测的 10 cm 层土壤湿度距平随时间的演变. 从图 4 中可以看到, 在中国东部中纬度地区, 两套资料的年际变化特征基本一致, 其年际变化距平量级也基本相当. 在东北和西南地区, 两套资料的变化趋势也基本一致, 但观测资料相对 ERA-40 资料变化幅度要大一些. 总体而言, 两套资料在中国东部中纬度地区吻合最好, 西南地区其次, 而东北地区两套资料存在一定的差异.

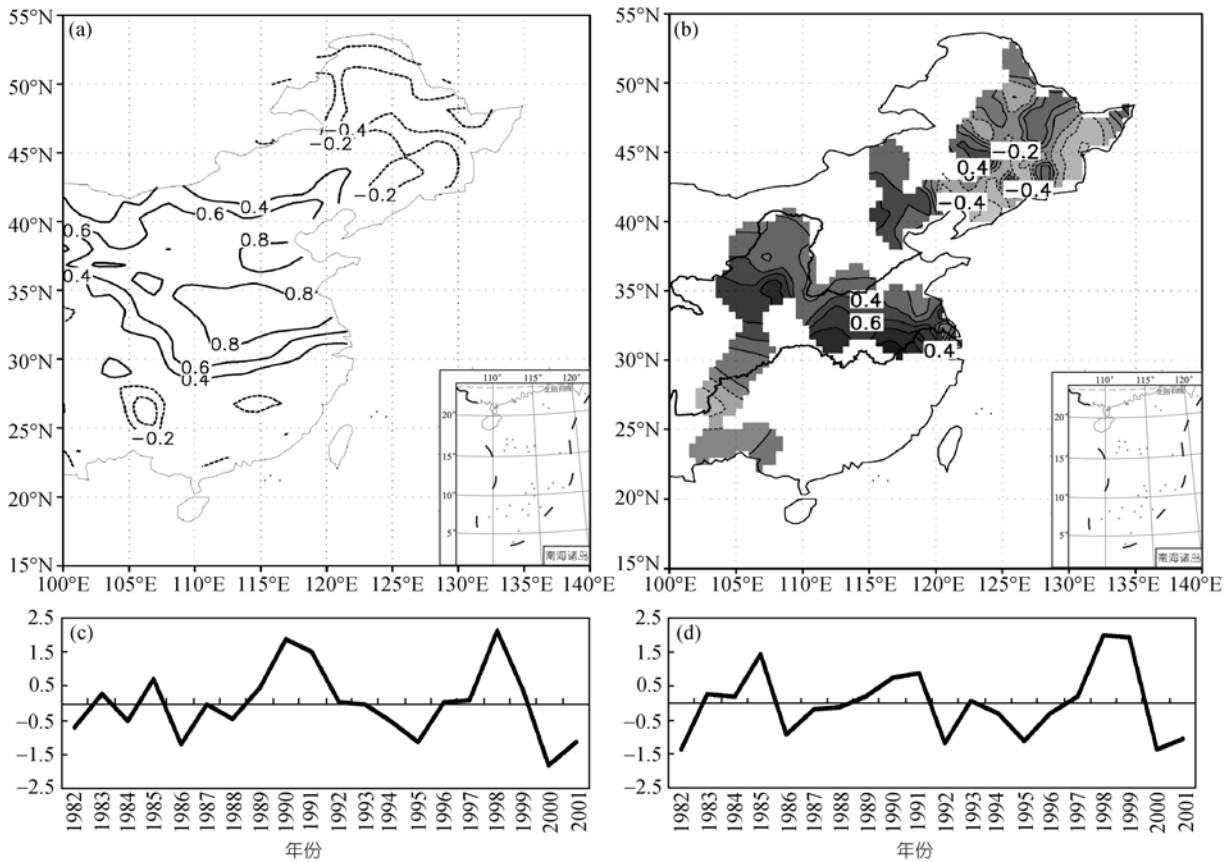


图 3 10 cm 层土壤湿度 EOF 第一模态空间分布((a), (b))和相应的时间系数((c), (d))

(a), (c)为 ERA-40 资料; (b), (d)为观测资料

表 1 土壤湿度观测资料和 ERA-40 资料的 EOF 第一模态的方差贡献

	10 cm 层土壤湿度 EOF1 方差贡献	50 cm 层土壤湿度 EOF1 方差贡献
观测资料	34.5%	29.3%
ERA-40	21.3%	20.3%

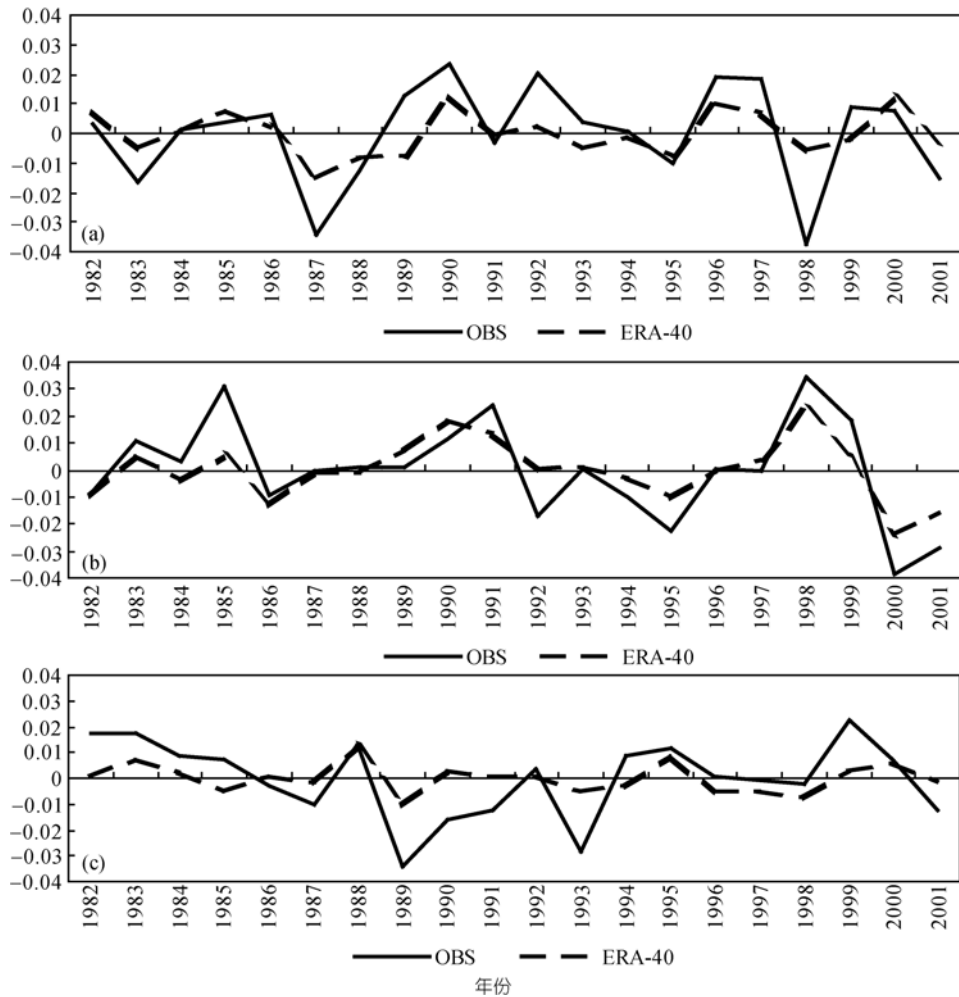


图 4 10 cm 层春季土壤湿度距平随时间的演变图

(a) 西南地区; (b) 中纬度地区; (c) 东北地区

表 2 三个地区各层土壤湿度观测资料和 ERA-40 资料在近 20 a(1982~2001 年)的相关系数

深度/cm	东部中纬度地区	西南地区	东北地区
10	0.86	0.73	0.59
20	0.84	0.71	0.59
50	0.78	0.67	0.49

如在 1985, 1990 和 1994 年, 与观测资料相比, ERA-40 出现相反的年际变化特征. 这可能是因为 ECMWF 的陆面模式对于处理冻土的蒸发作用方面仍然不够完善. 目前, 大多数陆面模式对冻土的“零”蒸发模拟仍然存在较大的困难. 在中国的东北地区, 其冬春两季的冻土现象具有一定的普遍性, 这给土壤湿度的反演带来一定的难度.

从表层、次表层以及中层土壤湿度的 ERA-40 资料和观测资料之间的相关系数(表 2)可以看到, 无论是东部中纬度地区还是西南和东北地区, 两套资料

的相关系数都通过了 99% 以上的置信度, 这也说明了 ERA-40 资料能较好的再现观测资料的年际变化特征. 进一步分析看到, 相对于西南和东北地区, 两套资料在东部中纬度地区的一致性最好. 而 ERA-40 对浅层土壤湿度的描述也比深层土壤湿度更为准确.

4 土壤湿度的年代际变化特征

从前面的研究我们看到, ERA-40 资料能较好的抓住中国春季土壤湿度的时空变化特征. 而土壤湿度观测资料只具有 20 a 的时间尺度. 鉴于此, 我们利

用 ERA-40 的 45 a(1958~2002 年)土壤湿度资料来研究中国境内春季土壤湿度的年代际变化特征.

图 5 给出了 3 个地区标准化的 ERA-40 土壤湿度资料随时间的演变图. 分析看到, 由于南方热带雨林

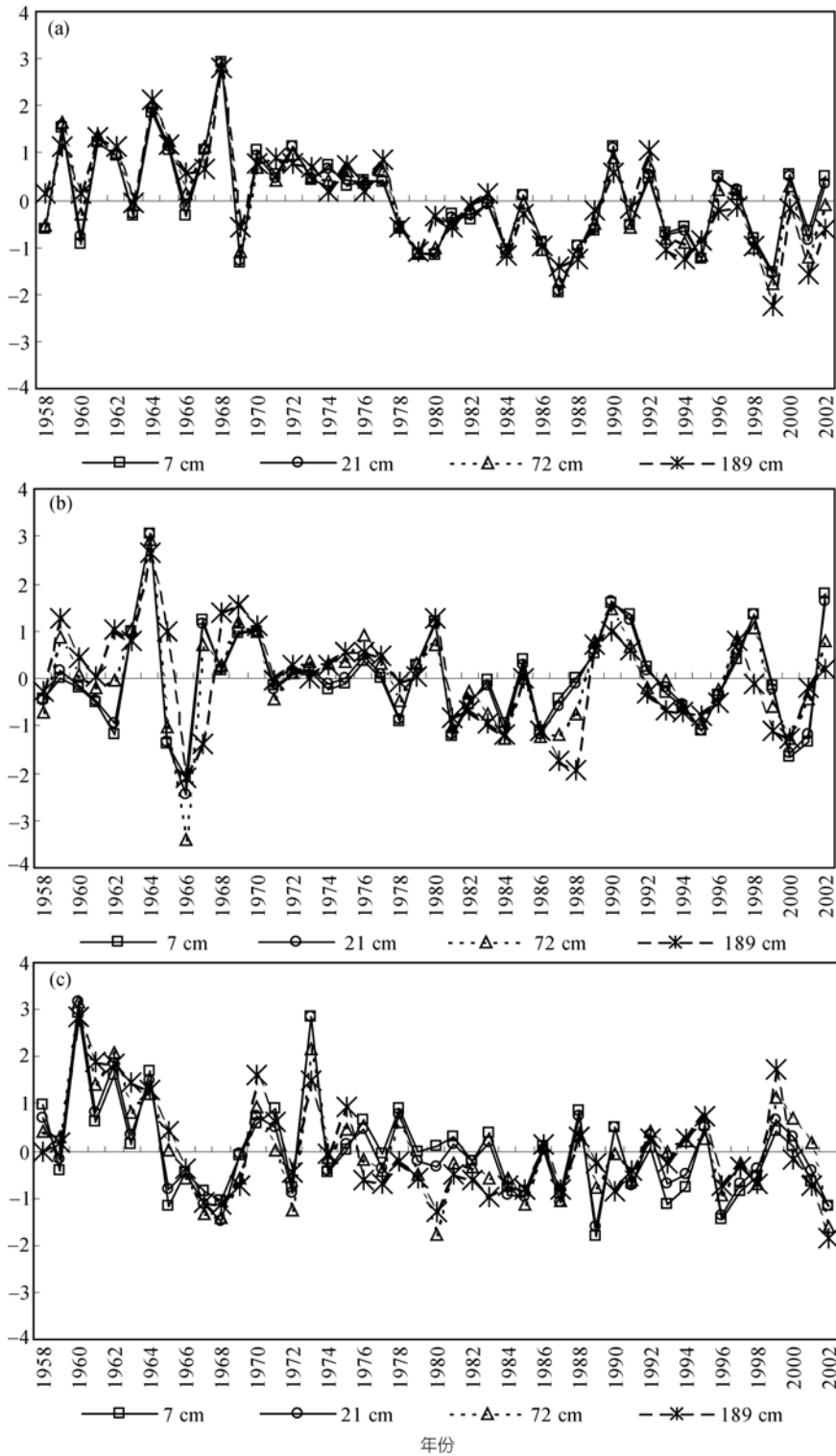


图 5 标准化的 ERA-40 土壤湿度资料随时间变化图

(a) 西南地区; (b) 中纬度地区; (c) 东北地区

地表强烈的固水作用, 南方 4 层土壤湿度的年际变化特征基本一致, 但从 1976 年以后存在一个较显著的长期变干趋势, 呈现出 20 世纪 80 年代以前西南地区土壤偏湿、80 年代以后土壤偏干的特征. 该结果与马柱国等^[11]利用土壤湿度观测资料分析的结果一样. 分析看到西南地区在 20 世纪 80 年代前存在一个较为显著的 2~4 a 的变化周期, 80 年代以后其土壤的偏干趋势变得明显.

中国东部中纬度地区虽然深层和浅层土壤湿度年际变化特征在个别年份有些差异, 如 1989 年深层和浅层土壤湿度异常是反位相的(实际上在观测资料中, 1989 年的东部中纬度地区深层和浅层土壤湿度确实是反相变化的), 但整体变化趋势基本一致. 与南方土壤湿度不同的是, 东部中纬度地区的土壤湿度并没有一个明显的长期变化趋势, 1985 年之前土壤湿度存在较明显的 2~4 a 的变化周期, 而 1985 年之后存在一个 6~8 a 的变化周期.

中国东北地区浅层和深层土壤从 20 世纪 80 年代以后都普遍偏干, 但其深层和浅层土壤湿度年际变化特征差异较大, 这可能与东北地区的北方森林作用有关. 很多研究表明, 植被根系的分布对土壤湿度尤其是深层土壤水的作用很显著.

进一步利用 Mann-Kendall 方法^[19,20]对中国东部地区土壤干化趋势做进一步的分析, 检验各区土壤干化趋势是否显著. 图 6 给出了 3 个地区土壤湿度的 *M-K* 检验曲线, 分析看到, 西南地区土壤从浅层到深层存在明显的一致变干趋势, 1980 年后这种趋势变得显著, 落在置信区间 $|U| \leq 1.96$ 之外, 通过了 95% 的置信度. 中国东北地区浅层和深层土壤湿度在整个时间序列内都变干, 其中浅层土壤湿度从 20 世纪 70 年代初开始变干趋势减缓, 但土壤依然在变干, 而深层土壤在 70 年代末之后变干趋势却加剧, 通过了 95% 的置信度. 在中国东部中纬度地区, 除了 189 cm 层的土壤湿度在 1988 年以后有较为显著的变干趋势, 其他 3 层土壤湿度没有明显的变化趋势. 就整个东部土壤湿度而言, 深层土壤变干趋势较浅层显著, 而东北和西南地区较东部中纬度地区显著.

马柱国等^[11]利用观测资料研究发现在 1981~1991 年期间, 除江淮流域外, 中国东部大部分地区的土壤湿度从浅层到深层都存在一致的变干趋势, 且

这种变干的趋势达到 99% 的显著性检验. 我们的结果则进一步给出了近 20 a 来中国东部的土壤湿度变化状况, 说明了整个东部 ERA-40 土壤湿度资料的变化趋势与观测资料分析的结果具有较好的一致性, 即 ERA-40 资料较好地抓住了中国东部土壤湿度的长期变化趋势, 也进一步说明了 ERA-40 土壤湿度资料在中国东部的可信度.

5 结论

对比中国 100°E 以东地区春季土壤湿度的观测资料和 ERA-40 资料的结果表明, ERA-40 资料能较好地反映观测资料中的地理分布特征. 除了在内蒙古干旱半干旱地区的土壤湿度再分析值略有偏高外, ERA-40 资料较好地给出了东北土壤湿度的高值区特征, 其在中国东部中纬度地区土壤湿度的量级与观测资料也基本相当, 甚至给出了西南地区小尺度土壤相对较干的特征. 观测和 ERA-40 资料都表明中国东部中纬度地区是土壤湿度变率最大的区域, 东部中纬度地区与东北和西南地区的土壤湿度呈现相反的变化, 即当中国东部中纬度地区春季土壤偏湿时, 西南和东北地区土壤偏干. 无论是东部中纬度地区还是西南和东北地区, ERA-40 资料能较好地再现了观测资料的年际变化特征, 两套资料的相关系数都通过了 99% 以上的置信度. 相对于西南和东北地区, 两套资料在东部中纬度地区的一致性最好. 而 ERA-40 对浅层土壤湿度的描述也比深层土壤湿度更为准确.

整个中国东部地区的春季土壤存在不同程度的干旱化现象. 其中西南地区土壤从浅层到深层都存在明显的变干趋势, 20 世纪 80 年代以后变干趋势显著. 在东部中纬度地区, 除了 189 cm 层土壤湿度在 1988 年以后有一个较为显著的变干趋势, 其他 3 层土壤湿度没有明显的长期变化趋势. 东北地区土壤也存在一致的变干趋势, 其中浅层土壤湿度在 20 世纪 70 年代初之后干旱趋势减弱, 而其深层土壤在 70 年代末之后变干趋势变得显著起来, 通过了 95% 的置信度. 总体而言, 中国西南和东北土壤变干趋势较东部中纬度地区显著, 深层土壤变干趋势较浅层显著.

由于目前中国土壤湿度观测资料依然存在较大的缺陷, 不能满足区域尺度和长时间尺度的气候研

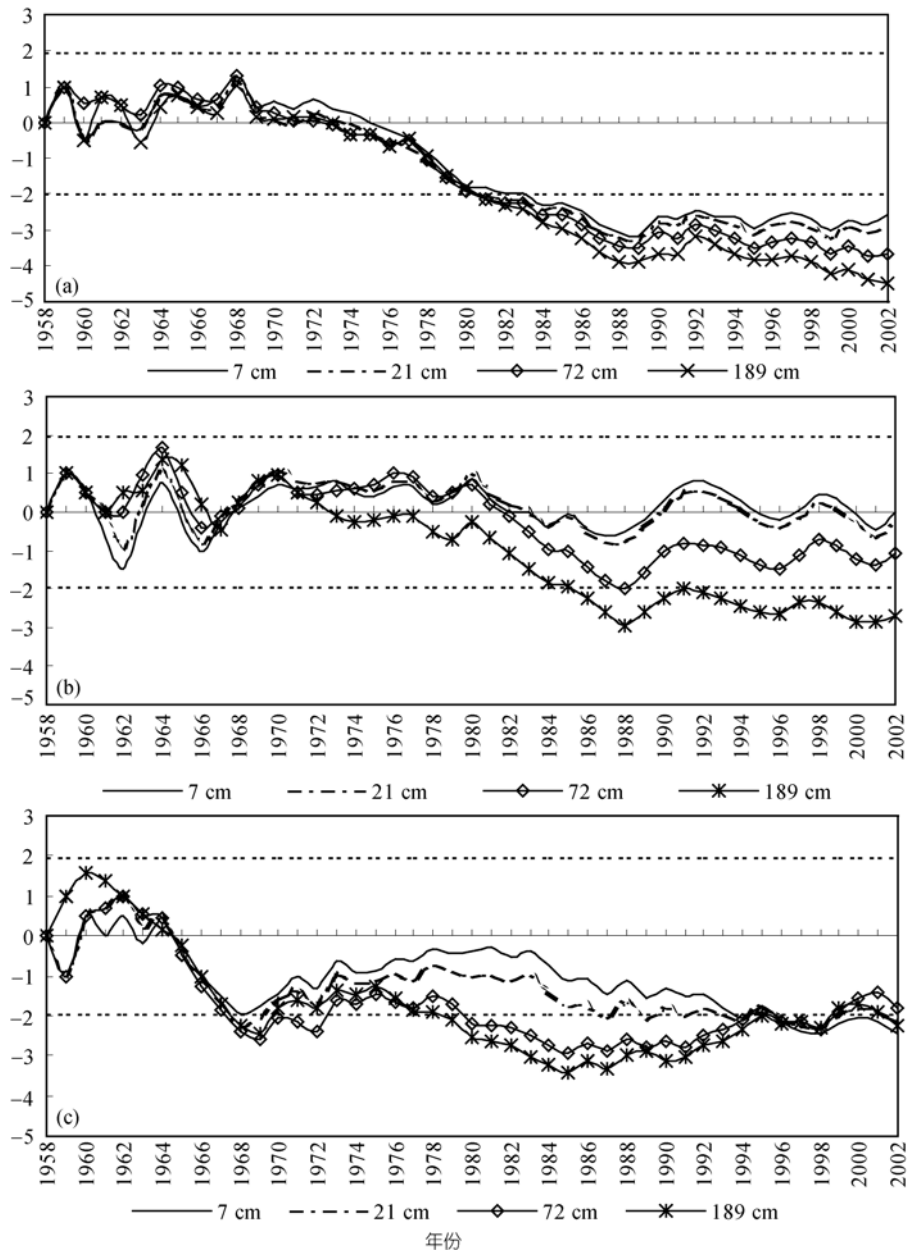


图6 ERA-40土壤湿度的M-K检验曲线

(a) 西南地区; (b) 中纬度地区; (c) 东北地区. 图中水平点线为95%的信度检验线

究, 而来自 ECMWF 的 ERA-40 土壤湿度再分析资料能较好的描述中国东部土壤湿度的时空特征, 且 ERA-40 土壤湿度资料具有分布均匀、长时间尺度和

高时空分辨率的优势, 因此对于中国区域尺度和长时间尺度的气候研究, ERA-40 土壤湿度资料是个较好的选择.

致谢 审稿人提出了建设性的修改意见, 作者对此表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Q J R Meteorol Soc*, 1977, 103: 29—46[[doi](#)]
- 2 Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment. *Mon Weather Rev*, 1984, 112: 474—490[[doi](#)]
- 3 Kanae S, Hirabayashi Y, Yamada T, et al. Influence of “realistic” land surface wetness on predictability of seasonal precipitation in Boreal summer. *J Clim*, 2006, 19: 1450—1460[[doi](#)]
- 4 Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2000, 81: 1281—1299[[doi](#)]
- 5 Delworth T L, Manabe S. The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *J Clim*, 1988, 1: 523—547[[doi](#)]
- 6 Vinnikov K Y, Yeserkepova I B. Soil moisture: empirical data and model results. *J Clim*, 1991, 4: 66—79[[doi](#)]
- 7 Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. *J Geophys Res*, 1996, 101: 7163—7174 [doi]
- 8 Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J Geophys Res*, 2000, 105: 11865—11877[[doi](#)]
- 9 Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305: 1138—1140[[doi](#)]
- 10 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 299—305
- 11 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 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, 5(3): 278—287
- 12 何志斌, 赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 359—362
- 13 张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征. *气象学报*, 2004, 62(1): 51—61
- 14 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 129—138
- 15 左志燕, 张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. *科学通报*, 2007, 52(14): 1722—1724
- 16 Li H B, Robock A, Liu S X, et al. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations. *J Hydrometeorol*, 2005, 6: 180—193[[doi](#)]
- 17 张文君. 中国土壤湿度分布和变化的观测与模拟. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. 26—51
- 18 Van den Hurk B, Viterbo P, Beljaars A, et al. Offline validation of the ERA-40 surface scheme. *ECMWF Tech Memo*, 2000, 295: 42
- 19 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检验方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482—493
- 20 Sneyers R. On the statistical Analysis of series of observations. *WMO Technical Note*, 143. 1990