

中国土壤湿度的时空变化特征

张 蕾¹, 吕厚荃¹, 王良宇¹, 杨冰韵²

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 基于中国 155 个农业气象观测站 1981-2010 年逐旬土壤湿度资料, 分析了全国和 12 个气候区域 0~50 cm 逐层的土壤湿度时空分布规律, 采用趋势分析和 Cramér-von Mises (CVM) 方法探究了土壤湿度的变化趋势及突变性。结果表明: 西南、江淮、东北、江南、江汉、黄淮和华南地区各层土壤湿度均高于全国平均值, 内蒙古地区最低; 随着深度增加, 西南地区土壤湿度增加最明显, 仅青藏高原地区土壤湿度减小。不同区域 0~50 cm 各层土壤湿度年变化和季节变化差异明显, 并具有阶段性特征, 大部地区深层土壤湿度高于浅层; 总体上, 新疆、华南、华北、青藏高原、东北、黄淮地区 1981-2010 年土壤湿度减小趋势显著, 其中新疆地区减小最为明显。除江淮地区外, 各区域土壤湿度均存在较为明显的年际差异, 突变时段主要集中在 20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期、90 年代后期两个时间段。

关键词: 土壤湿度; 气候区划; 线性趋势; CVM 检验; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201609003

1 引言

土壤水分对植物生长发育、土壤生产力起着十分重要的作用, 进一步也会通过与植被、大气之间的传输改变能量收支平衡, 影响气候和生态系统分布^[1-2]。土壤湿度作为对气候较敏感的因子, 与气候变化相互作用、相互影响, 土壤湿度能通过热量传输改变气候, 气候变化又在长期时间内反馈影响土壤湿度变化^[3-5]。因此, 分析土壤湿度的时空变化特征, 对掌握土壤水分变化、进行土壤水资源合理利用以应对气候变化显得尤为重要。

目前, 中国区域土壤湿度的研究主要集中在土壤湿度本身的规律特点及其应用方面。多数学者利用实际观测土壤水分, 针对不同区域尺度, 分析了土壤湿度在水平和垂直方向上时空分布特征和周期性变化趋势^[6-8], 通过规律性分析反映土壤水分的动态变化; 同时, 分析土壤湿度与气象因子, 尤其与温度、降水、相对湿度等^[9-10]因子之间的相互关系, 用以反映土壤水分对气候变化的响应, 并基于影响因子建立区域土壤湿度定量模型^[11-13], 用来对土壤的旱涝状况进行监测预警, 制定针对性的土壤水分管理措施^[14-15]。目前这些研究工作中, 受研究站点数量限制, 从全国尺度分析土壤水分变化动态的研究较少。正是受观测资料欠缺的制约, 土壤湿度在大尺度范围的研究工作存在一定局限性, 从而使得利用 RS 和多种模式资料反演土壤湿度成为了近年来土壤湿度研究的一个重要方向^[16-19]。同时, 通过反演资料的应用, 将土壤湿度作为一个重要输入参数和影响因

收稿日期: 2016-04-29; 修订日期: 2016-06-16

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306045) [Foundation: Meteorological Public Welfare Profession of China, No.GYHY201306045]

作者简介: 张蕾(1987-), 男, 江苏南通人, 硕士, 主要从事农业气象灾害预警与风险评估。E-mail: leizhang@cma.gov.cn

通讯作者: 吕厚荃(1957-), 女, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要从事农业气象灾害监测预报评估及土壤水分监测预报研究。E-mail: lvhq@cma.gov.cn

子, 在陆面过程模拟^[20]、短期天气预报和中长期气候预测^[21-22]中起着重要作用, 其数据的有效性决定了结果的准确性。尽管通过土壤湿度反演扩宽了研究尺度, 能够在一定程度上反映不同区域尺度土壤湿度变化特性, 但反演资料本身仍存在一定的不确定性, 无法完全替代实际观测结果。

本研究从实际准确性出发, 利用全国范围内农业气象观测站的逐旬土壤湿度资料, 分析了全国和12个气候区域尺度近30年土壤湿度时空分布规律, 并进行了土壤湿度趋势分析及突变检测, 以全面而准确地掌握不同区域实际土壤水分动态。

2 材料与方法

2.1 资料来源

本文所用的土壤水分数据来源于国家气象信息中心, 包括全国155个农业气象观测站点(图1)1981-2010年0~100 cm逐层的土壤重量含水率、土壤容重等, 其中土壤重量含水率的获取采用烘干称重法, 其时间分辨率为每旬一次(逢8日、18日、28日观测), 土壤容重为按年观测。考虑到50~100 cm土壤重量含水率的资料较少, 因此土壤深度选取0~10 cm(1991年之前分0~5 cm、5~10 cm两个层次)、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 5个层次, 通过格式检查、界限值检查、垂直一致性检查等质量检查, 对数据集进行了核查修正, 保证了数据质量良好。由于观测固定地段没有进行灌溉, 故土壤湿度不受灌溉的影响, 反映农田自然条件下的状况。为了核定155个农业气象观测站的固定地段代表性作物, 所选资料还包括农业气象观测站所在地段种植的作物名称和作物品种等。

2.2 数据处理方法

2.2.1 气候分区 由于农业气象观测站点分布区域广, 为了细化分析中国区域内土壤水分的变化规律, 根据中国气候特点, 将中国划分为12个气候区域^[23]: 东北、内蒙古、华北、黄淮、新疆、西北地区中东部、江淮、江汉、江南、华南、西南和青藏高原地区(图1)。区域气候特点和农业生产结构的差异, 可通过区域内农业气象观测站点土壤湿度的分析, 反映不同区域土壤湿度的分布及其变化差异。

2.2.2 土壤和作物类型划分 为了考虑区域内站点土壤的可代表性, 对各个站点0~50 cm土壤质地类型进行划分。以土壤容重作为划分指标, 参考土壤类型分类标准^[24], 具体将各个层次土壤划分为: 黏土($0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \leq \text{容重} < 1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、黏壤土($1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \leq \text{容重} < 1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、壤土($1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \leq \text{容重} < 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、砂壤土($1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \leq \text{容重} < 1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、壤砂土($1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \leq \text{容重} < 1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、砂土($\text{容重} \geq 1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

从不同地区的土壤质地来看(表1), 不同地区各个层次的土壤质地存在一定的差异。东北地区以黏壤土或黏土为主, 各个层次所占比例超过57%, 且随着深度而增大;

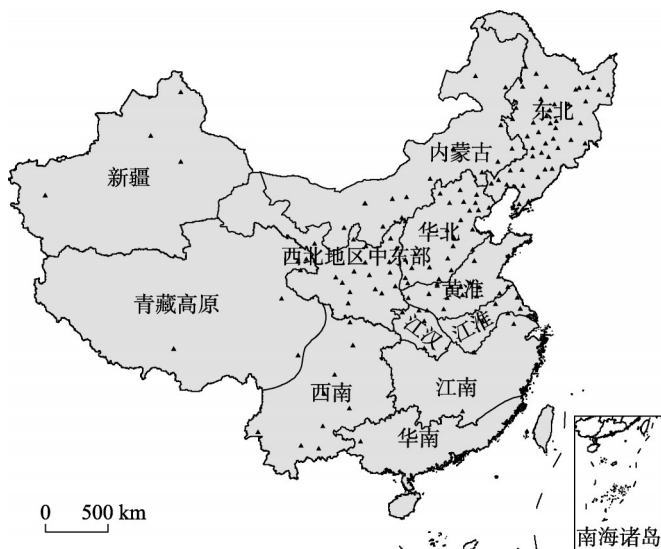


图1 中国土壤湿度站点分布及气候分区

Fig. 1 Distribution of soil moisture stations and climatic regions in China

表1 中国各气候区不同区域0~50 cm土壤质地分类

Tab. 1 Classification of soil texture at each depth (0-50 cm) in climatic regions in China

地区	土壤	北方地区土壤类型所占比例(%)					地区	土壤	南方地区土壤类型所占比例(%)				
		0~10	10~20	20~30	30~40	40~50			0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
东北	黏土	41	31	16	16	12	江淮	黏土	0	20	0	0	0
	黏壤土	39	29	43	41	45		黏壤土	40	20	40	20	20
	壤土	14	29	22	20	20		壤土	60	40	40	20	20
	砂壤土	4	6	10	8	10		砂壤土	0	20	20	40	40
	壤砂土	2	6	6	12	2		壤砂土	0	0	0	20	20
	砂土	0	0	2	2	10		砂土	0	0	0	0	0
内蒙古	黏土	20	0	0	7	0	江汉	黏土	0	0	0	0	0
	黏壤土	13	33	13	27	7		黏壤土	33	67	33	0	0
	壤土	27	20	33	7	40		壤土	33	33	0	0	0
	砂壤土	27	27	13	27	7		砂壤土	33	0	67	67	33
	壤砂土	7	7	40	33	40		壤砂土	0	0	0	33	33
	砂土	7	13	0	0	7		砂土	0	0	0	0	33
华北	黏土	12	8	0	4	4	江南	黏土	0	0	0	0	0
	黏壤土	40	16	12	20	16		黏壤土	25	0	25	0	0
	壤土	32	40	52	36	44		壤土	75	75	25	50	50
	砂壤土	8	20	24	8	12		砂壤土	0	25	25	0	25
	壤砂土	8	12	8	24	20		壤砂土	0	0	25	25	0
	砂土	0	4	4	8	4		砂土	0	0	0	25	25
黄淮	黏土	22	6	0	0	0	华南	黏土	0	0	0	0	0
	黏壤土	50	22	11	11	17		黏壤土	50	50	0	0	0
	壤土	17	44	28	33	22		壤土	50	50	100	0	0
	砂壤土	6	22	22	33	22		砂壤土	0	0	0	100	50
	壤砂土	6	6	22	17	22		壤砂土	0	0	0	0	0
	砂土	0	0	17	6	17		砂土	0	0	0	0	50
新疆	黏土	0	0	0	0	0	西南	黏土	22	33	11	11	33
	黏壤土	25	25	0	25	0		黏壤土	56	0	0	33	11
	壤土	50	25	50	25	75		壤土	0	44	44	22	22
	砂壤土	0	25	0	0	0		砂壤土	11	0	22	0	0
	壤砂土	25	0	25	25	0		壤砂土	11	11	11	22	11
	砂土	0	25	25	25	25		砂土	0	11	11	11	22
西北中东部	黏土	35	29	6	0	6	青藏高原	黏土	17	0	0	0	0
	黏壤土	47	35	53	35	47		黏壤土	50	50	33	17	33
	壤土	18	29	24	41	18		壤土	17	17	33	67	33
	砂壤土	0	6	18	12	24		砂壤土	0	0	17	0	17
	壤砂土	0	0	0	12	0		壤砂土	17	33	17	0	0
	砂土	0	0	0	0	6		砂土	0	0	0	17	17

华北、黄淮和青藏高原地区以黏壤土和壤土为主，两种类型所占比例分别大于56%、54%和66%，随着深度的增大，土壤砂性有所增强；新疆地区以壤土和砂土为主，比例超过50%；西北地区中东部0~20 cm土壤以黏土和黏壤土为主，20~50 cm以黏壤土和壤土为主，比例超过55%；内蒙古、江淮、江汉、江南和华南地区土壤质地介于黏壤土和砂壤土之间，西南地区以黏土和壤土为主，各个层次有所差异。因此，站点所代表的各个区域土壤质地一致性较好，可以反映出区域的土壤水分变化。

通过分析155个农业气象观测站对应的固定地段代表性作物情况,发现各个区域内站点地段种植作物一致性较好,北方大部以小麦、玉米、大豆为主,南方大部以早晚稻、一季稻、夏玉米为主,可以反映整个区域的作物类别。

2.2.3 土壤湿度年变化趋势及差异性检验 为了反映1981-2010年土壤水分的变化趋势,采用线性倾向估计:

$$\hat{y}_i = a + b \times t_i \quad (1)$$

式中: \hat{y}_i 为土壤湿度; t_i 为对应的时间; i 为土壤湿度序列; a 、 b 系数由最小二乘法估算得到,回归系数 b 即可反映土壤湿度的变化趋势, $b > 0$ 表示呈增加趋势, $b < 0$ 表示呈减小趋势。同时,计算 \hat{y}_i 与 t_i 间的相关系数与显著性水平作比较,来判断变化趋势是否显著^[25]。

在土壤水分时间变化序列中,找到突变的时间对了解土壤湿度变化趋势有重要意义。这里,采用Cramér-von Mises (CVM) 检验方法^[26-27]来评估土壤水分的变化差异性水平,该方法主要用于两个独立同分布变量时间序列的差异性检验,也可以应用于单变量不同时间序列对比及突变点分析。具体方法是通过比较两个样本序列的累计分布函数平均差异水平来计算检验统计量:

$$W_{t,i} = \sum_{i=1}^n \left| \hat{F}_s(x_i) - \hat{F}_h(y_i) \right|^2 \quad (2)$$

式中: $\hat{F}_s(x_i)$ 、 $\hat{F}_h(y_i)$ 分别是两个时间序列土壤水分的累计分布函数,将时间 t 从1到 n (时间长度) 进行逐步计算检验统计量 $W_{t,i}$ ^[28],在所有检验统计量中最大的 $W_{t,i}$ 所对应的时间 t 即为差异最大的点,其前后时段内土壤湿度数据序列差异最明显。在检验统计量过程中原假设为两个序列差异不显著,通过计算与检验统计表^[29]进行对比,找到统计量对应的显著性水平。

3 结果与分析

3.1 土壤湿度空间差异

不同层次平均土壤湿度存在明显的区域差异(表2)。0~50 cm平均土壤湿度高值依次为西南(24.4%)、江淮、东北、江南、江汉、黄淮、华南,高于全国均值,内蒙古地区土壤湿度最小(9.5%); 0~10 cm,高于全国平均土壤湿度的依次是江淮、江南、东北、江汉、西南、青藏高原、黄淮、华南,内蒙古土壤湿度最小(8.9%); 10~20 cm,高于全国平均值有江淮、东北、西南、江南、江汉、华南、黄淮、青藏高原,内蒙古最小(9.1%); 全国20~30 cm平均土壤湿度为18.2%,高于该值有江淮、西南、东北、江南、江汉、华南、黄淮,内蒙古最小为9.4%; 全国30~40 cm平均土壤湿度为18.7%,高于其值的分别为西南、江淮、东北、江汉、江南、黄淮,内蒙古地区最小(10.0%); 40~50 cm,高于全国平均土壤湿度的区域分别为西南、江淮、江汉、东北、江南、黄淮,内蒙古土壤湿度最小(10.4%)。随着深度增加,除青藏高原土壤湿度减小($-0.36\% \cdot (10 \text{ cm})^{-1}$)外,其余地区均呈增加趋势,西南地区增加最明显,速率达 $1.84\% \cdot (10 \text{ cm})^{-1}$ 。

3.2 土壤湿度季节变化

由于地区气候条件差异,区域土壤湿度季节变化存在明显阶段性特征。其中,东北、内蒙古、新疆、西北地区中东部、华北地区土壤存在封冻期,此期间不进行土壤湿度观测,故观测数据以土壤解冻后可进行观测时段为主。

表2 中国各气候区域各层次平均土壤湿度及其倾向率

Tab. 2 Mean value and tendency of soil moisture at each depth (0-50 cm) in climatic regions in China

	土壤湿度均值(%)						土壤湿度倾向率(%·(10a) ⁻¹)					
	0~50	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	0~50	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
全国	18.3	17.4	18.0	18.2	18.7	19.2	-0.8	-0.5	-0.9	-0.7	-0.9	-0.9
东北	21.7	20.8	21.7	21.9	21.9	22.0	-0.6*	-0.3	-0.8*	-0.8*	-0.6*	-0.7*
内蒙古	9.5	8.9	9.1	9.4	10.0	10.4	-0.3	-0.1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3
华北	16.1	15.3	15.8	16.0	16.3	17.0	-1.3*	-1.1*	-1.4*	-1.4*	-1.2*	-1.3*
黄淮	19.5	18.7	19.2	19.2	19.9	20.5	-0.6*	-0.1	-0.6*	-0.7*	-1.0*	-1.0*
新疆	11.3	9.5	10.7	11.5	12.0	12.9	-3.8*	-3.6*	-4.0*	-3.5*	-3.0*	-2.3*
西北地区中东部	13.9	13.5	14.2	14.0	13.9	13.9	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
江淮	24.1	23.6	23.6	23.9	24.3	24.8	-0.1	0.1	0.0	0.0	-0.5*	-0.6*
江汉	21.0	20.3	20.5	20.6	21.6	22.3	0.3	0.8*	0.4	0.3	-0.3	-0.7
江南	21.3	21.3	21.1	21.2	21.4	21.6	-0.3	0.0	-0.3	-0.4	-0.5*	-0.7*
华南	18.9	18.2	19.7	19.3	18.7	18.7	-1.8*	-1.8*	-2.7*	-1.7*	-0.8*	-0.4
西南	24.4	20.1	21.6	23.6	27.4	29.3	0.1	0.0	-0.4	0.2	0.6	0.5
青藏高原	17.9	19.0	18.8	17.6	17.1	17.2	-1.2*	-0.5	-1.4*	-1.2*	-1.6*	-2.4*

注：*表示通过0.05的显著性水平检验。

东北、内蒙古、新疆地区封冻期后，土壤湿度总体呈增大—减小—增大的趋势（图2）。2月下旬开始土壤解冻，土壤湿度逐渐增大，东北、新疆、内蒙古地区3月中旬至4月上旬先后达到最大值，内蒙古各层土壤湿度最大值的出现时间平均滞后2旬（图2b），东北地区深层土壤水分因上移补充浅层水分而出现下降（图2a），随土壤化冻浅层水分逐渐下渗，3月中旬至5月上旬土壤湿度逐渐增大；随春玉米、大豆、棉花等作物根系伸长、耗水量增大，土壤湿度逐渐降低；7、8月份降水量增多，东北和新疆地区土壤湿度明显增大，内蒙古地区土壤湿度波动较小。整体看，深层土壤湿度均高于浅层，尤其在进入作物生长季后更明显，新疆地区土壤湿度变化幅度最大（各层土壤湿度变化幅度为2.6%~8.0%），其次是东北地区（2.6%~4.6%），内蒙古地区变化最小（2.1%~2.5%）。

西北地区中东部、华北、黄淮地区土壤湿度呈减小—增大—波动（图3）。华北、西北地区东部在12月中旬至1月处于封冻期，黄淮地区土壤湿度冬季平稳波动；春季温度回升，冬小麦返青后生长，耗水量增大，湿度明显下降，5月下旬至6月上旬降至最小；6月降水量增大，冬小麦成熟收获、夏玉米处生长前期，土壤湿度增大；8月虽然夏玉米等进入需水关键期，但降水量仍较多，基本能满足作物需水，土壤湿度变化平稳，而西北地区中东部作物耗水小、土壤湿度呈增大趋势（图3a）；进入秋冬季，夏玉米、大豆等成熟收获，冬小麦处播种出苗一越冬期，土壤湿度波动较小。垂直变化上看，华北、黄淮地区深层土壤湿度均大于浅层；西北地区中东部以10~20 cm较高，而夏初之前和10月下旬后以0~10 cm较低，这种分布主要与地区降水变化、土壤耕作层深度和作物耗水量相关^[30]。

江淮、江汉和江南地区各层土壤湿度多阶段性变化，总体呈增大—减小—增大—减小—增大（图4）。随着冬小麦、早稻等进入快速生长阶段，土壤湿度下降；雨季各区降水量明显增加，湿度增大；随着一季稻、晚稻移栽后返青生长，需水量增多，但由于降水仍较多，土壤湿度下降幅度不大；冬季，作物生长需水较少，土壤湿度波动较小。垂直方向上，各区均是深层土壤湿度高于浅层，江南地区各层变化幅度最大（3.6%~5.5%），其次是江淮（3.0%~4.7%）、江汉（2.3%~4.5%）。

华南和西南地区存在明显的旱季，土壤湿度总体呈减小—增大—减小（图5a、5b）。华南冬季湿度平稳波动，随着温度升高有所下降；进入雨季，湿度明显增加，随着8月

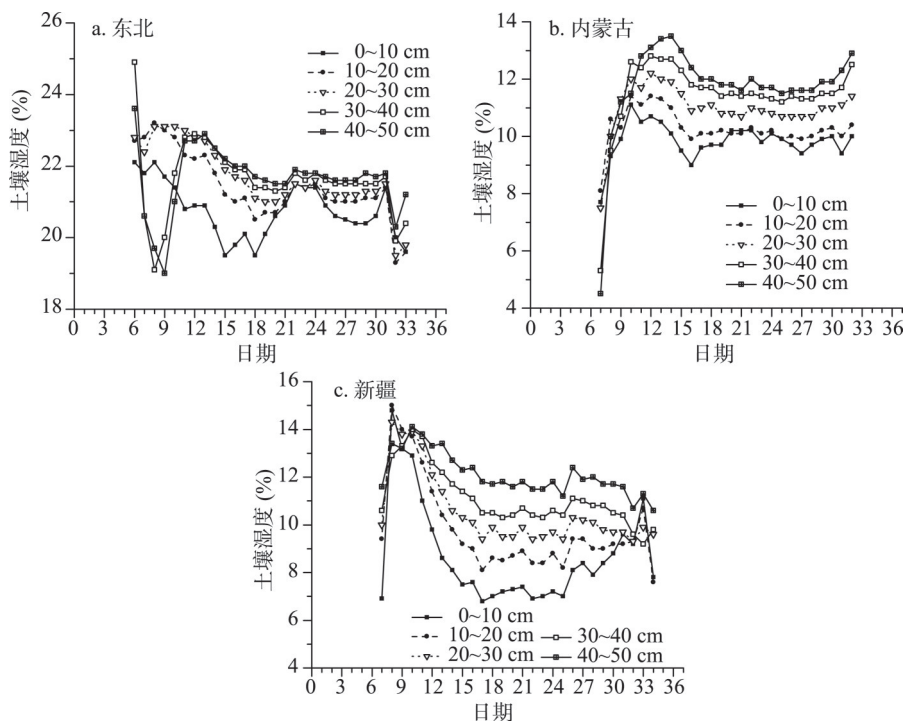


图2 东北、内蒙古和新疆0~50 cm土壤湿度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil moisture at each depth (0-50 cm) in Northeast China, Inner Mongolia and Xinjiang

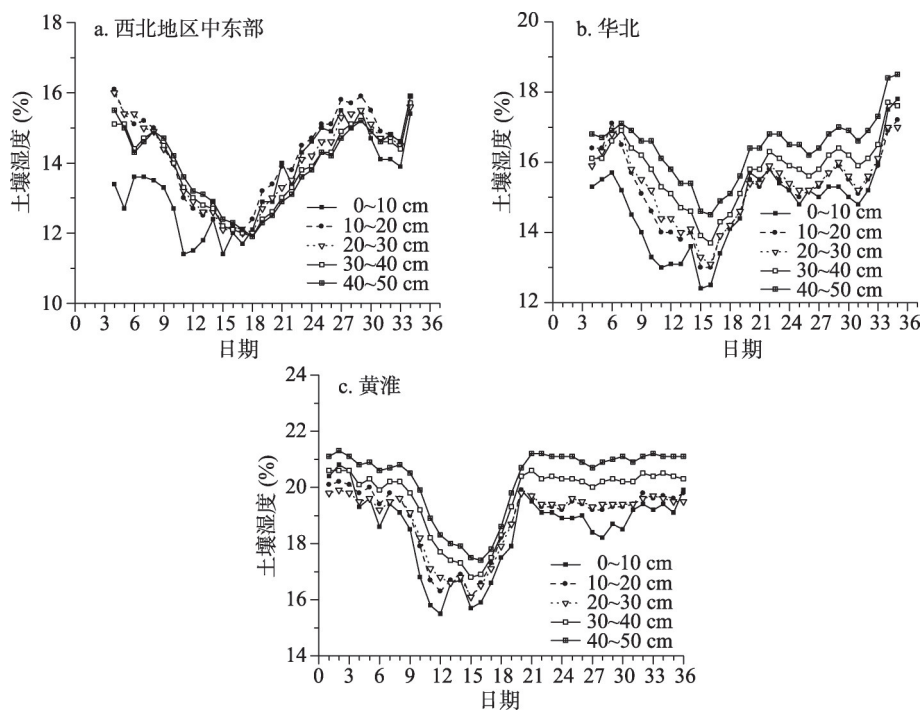


图3 西北地区中东部、华北和黄淮0~50 cm土壤湿度季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil moisture at each depth (0-50 cm) in Eastern Northwest China, North China and Huanghuai

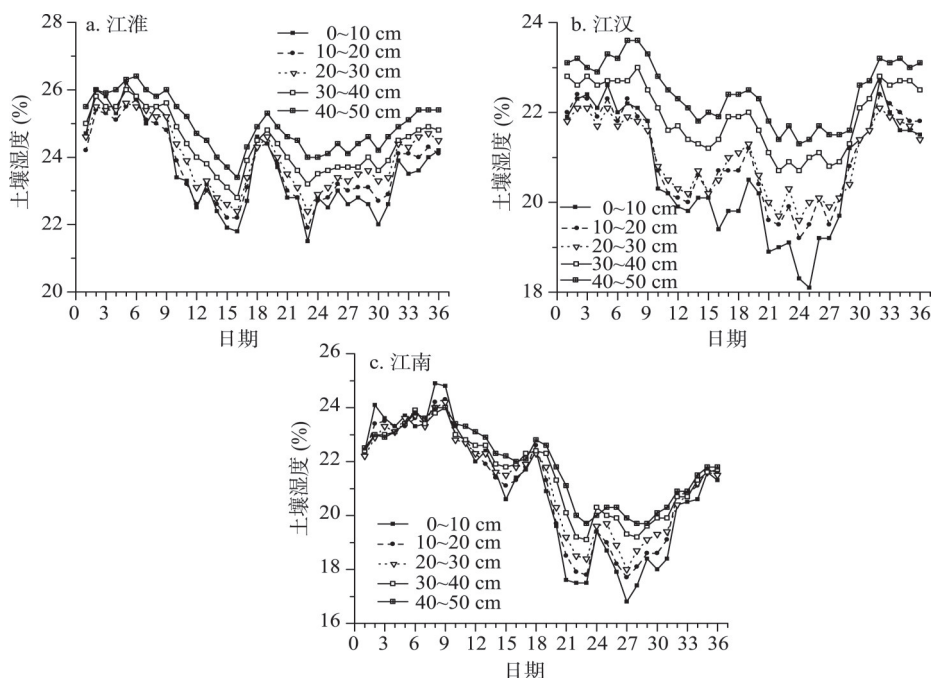


图4 江淮、江汉和江南0~50 cm土壤湿度季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil moisture at each depth (0-50 cm) in Jianghuai, Jiangnan and Jiangnan

晚稻进入移栽后返青生长, 土壤湿度逐渐减小。垂直上看, 0~10 cm 土壤湿度最小、10~20 cm 土壤湿度最大, 20~50 cm 差异较小, 可能是因地区土壤多以棕色土为主, 土壤湿度表现为垂直变化急剧型, 存在一个湿度活跃层 (20 cm 以上), 活跃层内土壤湿度梯度大, 活跃层以下土壤水分容易保持、变化较缓。西南地区2月中旬至3月下旬冬小麦处拔节至孕穗抽穗期, 需水量大, 10月上旬至12月地区降水量较少, 土壤湿度均有下降; 4月受季风影响, 降水量逐渐增多, 加上冬小麦处于成熟收获阶段耗水较少, 湿度明显增加; 夏季, 尽管降水较多, 但温度高增大土壤水分蒸发, 加上一季稻、甘蔗等作物耗水增加, 导致土壤水分呈稳定、略有下降趋势。随深度增加, 土壤湿度变化幅度减小。

青藏高原地区各层土壤湿度呈增加—减少趋势, 且深层土壤湿度低于浅层 (图5c)。冬季, 土壤处于封冻阶段, 解冻后土壤湿度有一定波动; 进入3月, 降水量增加, 该区以牧草等浅根系作物为主, 耗水量较小, 湿度基本稳定在16.0%~20.0%。

3.3 土壤湿度年变化

土壤湿度年变化的区域特点是, 东北和内蒙古地区呈波动变化, 新疆呈减小趋势 (图6)。东北地区0~50 cm 各层土壤湿度阶段性较大值的时段主要集中在1981、1994、1998、2005、2010年, 较小值在1982、1989、2001、2007年 (图6a); 从0~50 cm 平均土壤湿度的CVM统计检验 (图6d) 看, 1998年检验统计量达最大值 (1.40), 且达到0.01显著性水平, 可见东北地区1998年前后时段内土壤湿度差异明显。内蒙古地区土壤湿度1984-1989、1993-1998年减小, 1990-1993年、2000-2010年增加 (图6b); 2002年CVM检验统计量达到最大值0.78 (图6e), 通过0.05显著性水平检验, 则以2002年作为土壤湿度突变年份。新疆地区土壤湿度呈明显下降 (图6c), 1993年之前维持在较高水平 (13.5%以上), 1993-1997年土壤湿度明显下降, 1998年后较为稳定; 0~50 cm 平均土壤湿度的CVM统计检验 (图6f) 表明, 1994年前后时段的土壤湿度差异最显著 (0.01水平), 检验统计量达2.45。

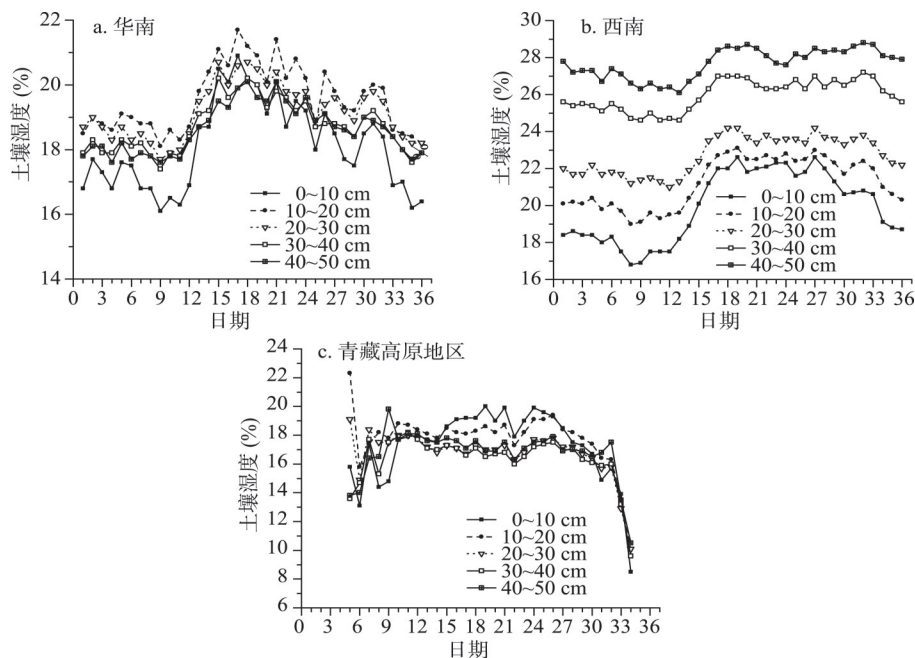


图5 华南、西南和青藏高原地区0~50 cm土壤湿度季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of soil moisture at each depth (0-50 cm) in South China, Southwest China and Tibetan Plateau

西北地区中东部、华北和黄淮地区0~50 cm土壤湿度波动较大, 总体呈减少趋势(图7)。西北地区中东部各层湿度总体下降、趋于稳定, 1997年前波动较大, 最小值在1987年, 之后波动逐渐减小(图7a); 0~50 cm平均土壤湿度CVM统计检验量1985年最高为0.95(图7d), 通过0.05显著性水平。华北地区1981-1989年土壤湿度较大, 1990年之后明显波动下降(图7b); 1989年CVM统计检验量达最大值2.09(图7e), 通过0.01显著性检验。黄淮地区1985年之前土壤湿度上升明显, 之后波动较大, 1993-2000年、2003年后较稳定, 2001-2002年出现最小值(图7c); 平均土壤湿度的CVM统计检验值在1999年最大(图7f), 为1.41, 达到0.01显著性水平。

江淮、江汉和江南地区各层土壤湿度波动较大、趋势不明显(图8)。江淮土壤湿度较小值在1981、1987、1995、2004年, 较大值在1985年、1987年、1993年、1999年、2003年(图8a); 平均土壤湿度CVM统计检验(图8d)显示, 1987年达最大值0.39, 但没有达到0.05的显著性水平, 因此没有明显的突变年份。江汉地区1999年之前土壤湿度波动较大, 1999年最低, 2003年之后稳定在20.8%~23.2%(图8b); 平均土壤湿度CVM统计检验2000年为1.05(图8e), 达到0.05的显著性水平。江南地区1981-1989年、1994-1997年、2004-2010年土壤湿度增加, 1990-1993年、1998-2003年减小(图8c); 平均土壤湿度CVM统计在1989年前后通过0.05显著性水平检验, 统计量达0.63(图8f)。

华南地区各层土壤湿度增大时段集中在1990-1992年, 减小集中在1982-1989年、1994-2004年(图9a); 1997年平均土壤湿度的CVM统计检验量达到最大值1.53(图9d), 且通过0.05显著性水平。西南地区各层土壤湿度呈减小—增大(图9b), 随深度增加, 变幅增大; 1998年之前逐渐减小, 随后有所增大。从西南平均土壤湿度CVM统计检验(图9e)结果看, 2002年前后土壤湿度差异显著, 统计量达1.02。青藏高原地区各层土壤湿度总体上增大—减小(图9c), 且深层低于浅层; 1994年以前, 各层土壤湿度

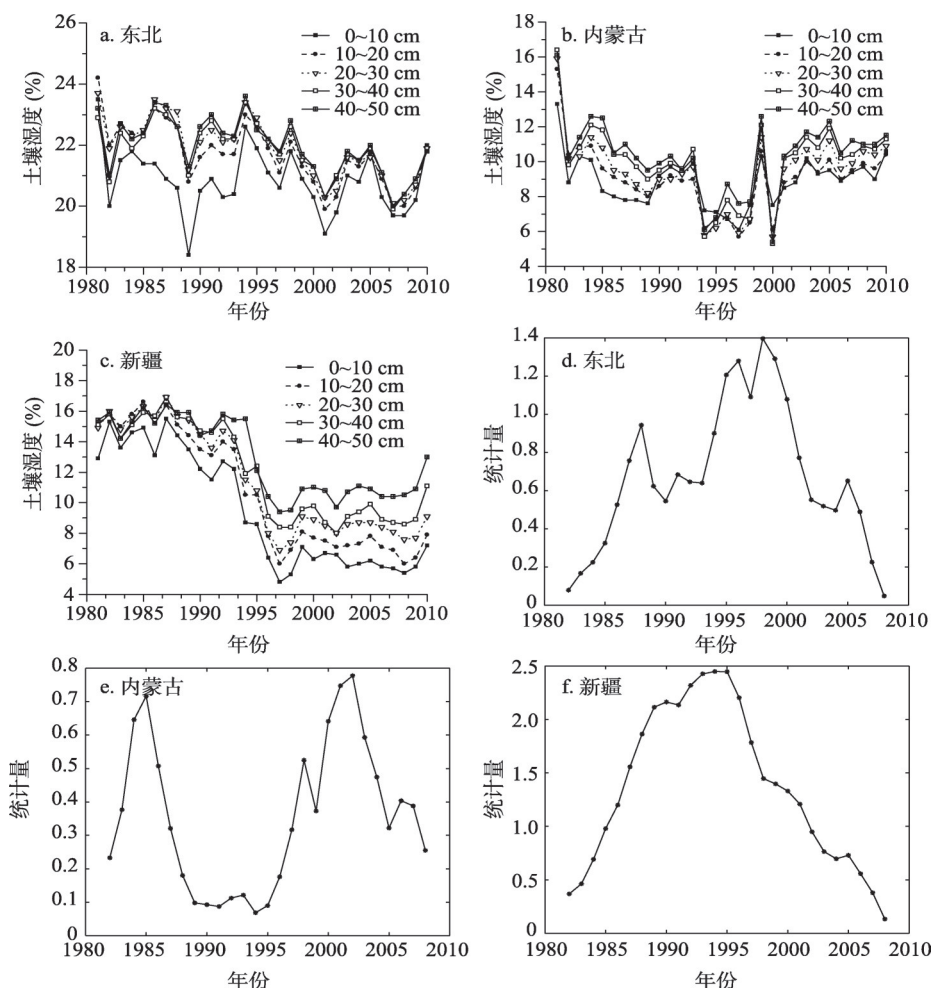


图6 东北、内蒙古和新疆地区0~50 cm土壤湿度年变化及CVM差异检验

Fig. 6 Annual variation and CVM test of soil moisture at each depth (0-50 cm) in Northeast China, Inner Mongolia and Xinjiang

增大, 1997-2002年减小, 2002年后上下波动。0~50 cm平均土壤湿度CVM统计检验(图9f)结果表明, 1998年前后时段土壤湿度存在显著差异, 统计量为2.01。

1981-2010年土壤湿度年际变化的倾向率(表2)显示, 全国0~50 cm平均土壤湿度呈减小趋势。西南和江汉地区平均土壤湿度呈增加, 但趋势不明显, 其余地区均呈减小, 其中新疆、华南、华北、青藏高原、黄淮和东北地区趋势明显, 新疆减小速率达 $-3.8\% \cdot (10a)^{-1}$, 通过0.05的显著性水平检验。就各层平均土壤湿度而言, 新疆、华南、华北地区0~10 cm湿度呈明显减小趋势, 速率分别为 $-3.6\% \cdot (10a)^{-1}$ 、 $-1.8\% \cdot (10a)^{-1}$ 、 $-1.1\% \cdot (10a)^{-1}$, 仅江汉地区以 $0.8\% \cdot (10a)^{-1}$ 的速率增大, 其余地区趋势不显著; 新疆、华南、华北、青藏高原、东北、黄淮地区10~20 cm湿度呈明显减小, 新疆地区减小速率达 $-4.0\% \cdot (10a)^{-1}$; 新疆、华南、华北、青藏高原、东北、黄淮地区20~30 cm湿度明显减小, 新疆减小速率为 $-3.5\% \cdot (10a)^{-1}$; 新疆、青藏高原、华北、黄淮、华南、东北、江南、江淮地区30~40 cm湿度呈明显下降, 新疆下降速率达 $-3.0\% \cdot (10a)^{-1}$; 青藏高原、新疆、华北、黄淮、东北、江南、江淮地区40~50 cm湿度减小趋势明显, 青藏高原减小速率最大分别为 $-2.4\% \cdot (10a)^{-1}$ 。

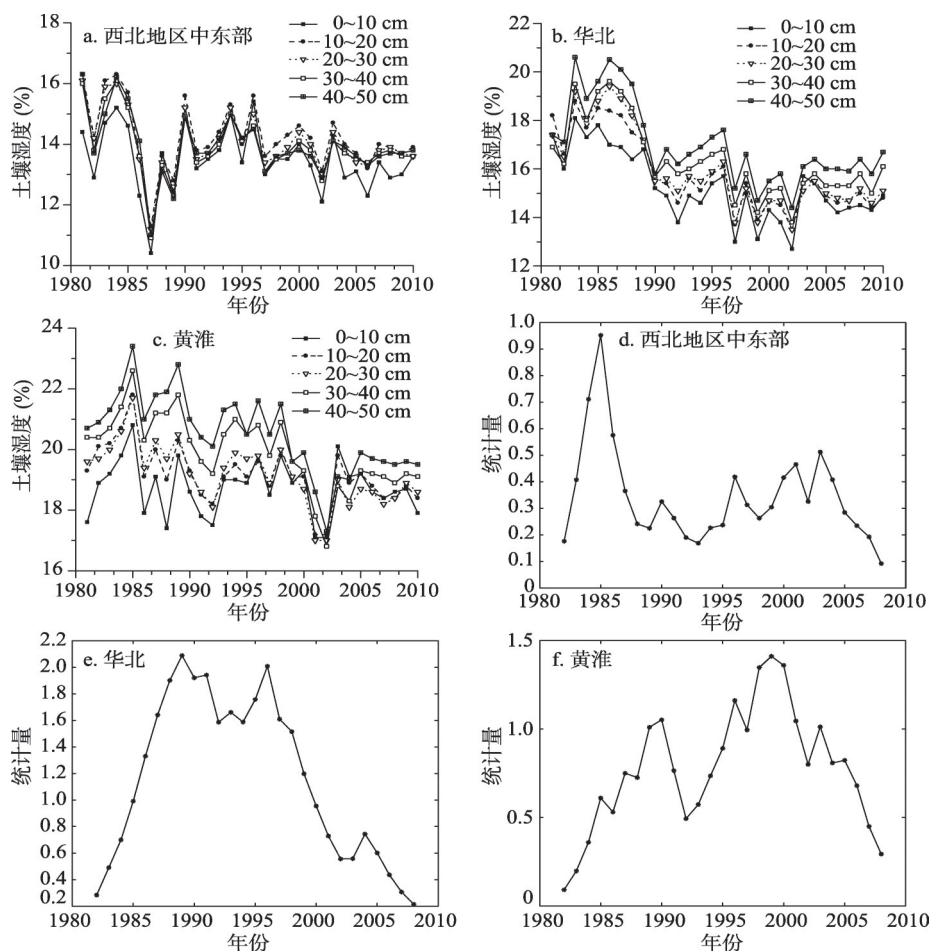


图7 西北地区中东部、华北和黄淮地区0~50 cm土壤湿度年变化及CVM差异检验

Fig. 7 Annual variation and CVM test of soil moisture at each depth (0~50 cm)
in Eastern Northwest China, North China and Huanghuai

4 结论与讨论

4.1 结论

利用全国农业气象观测站人工土壤水分观测数据,分析全国和12个气候区域0~50 cm土壤湿度的时空分布规律,并探究了土壤水分变化趋势及突变年份,主要结论为:

(1) 西南、江淮、东北、江南、江汉、黄淮和华南地区各个层次土壤湿度均较高,内蒙古地区最小;西南地区土壤湿度随着深度增加最明显,青藏高原地区呈减小趋势。

(2) 各区域0~50 cm土壤湿度存在明显的阶段性变化特征。总体来看,东北、内蒙古、新疆地区存在封冻期一增大一减小一增大趋势,西北地区中东部、华北、黄淮呈减小一增大一波动,江淮、江汉、江南地区多阶段性变化,华南和西南地区呈减小一增大一减小趋势,青藏高原地区呈增加一减少趋势。大部地区深层土壤湿度均高于浅层土壤湿度。

(3) 各区域0~50 cm各层土壤湿度年际间差异明显。除江淮外,各区域均存在明显的土壤湿度突变年份,集中在20世纪80年代后期至90年代初期、90年代后期2个时间段。

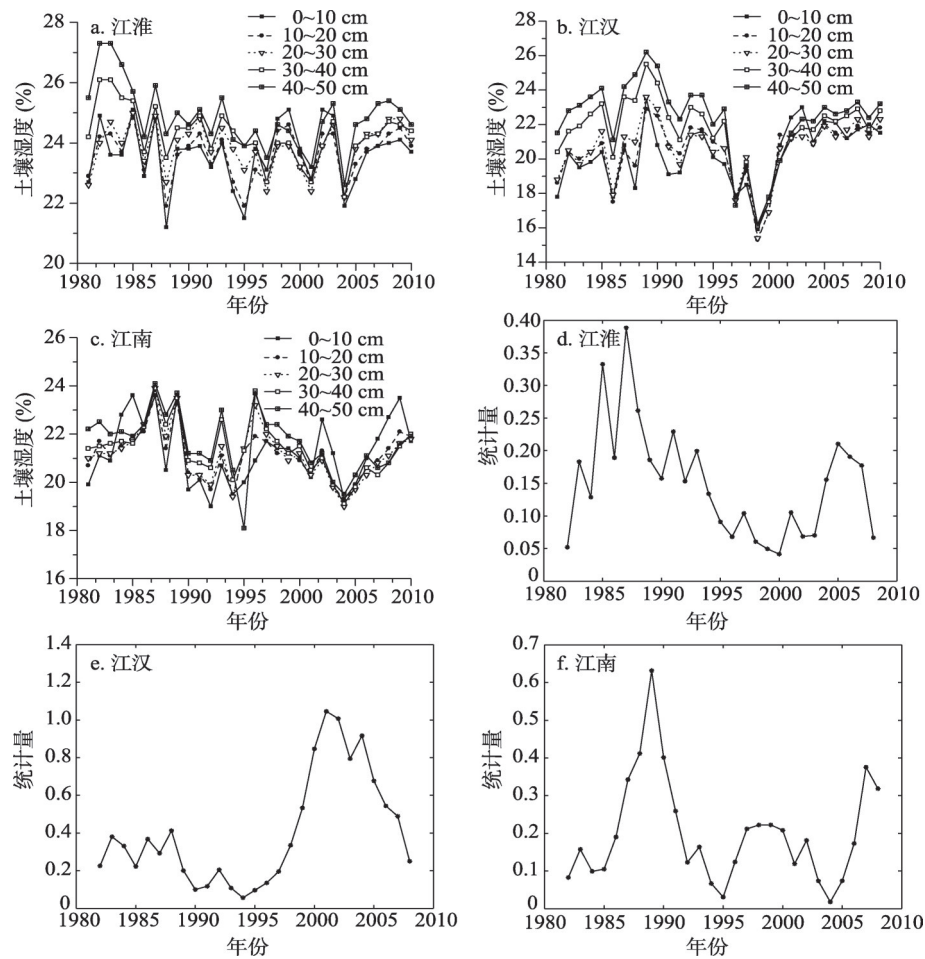


图8 江淮、江汉和江南0~50 cm土壤湿度年变化及CVM差异检验
Fig. 8 Annual variation and CVM test of soil moisture at each depth (0-50 cm)
in Jianghuai, Jiangnan and Jiangnan

(4) 1981-2010年, 全国0~50 cm平均土壤湿度呈减小趋势。各层土壤湿度年变化趋势差异明显, 总体上新疆、华南、华北、青藏高原、东北、黄淮地区减小趋势明显, 其中新疆地区减小趋势最显著, 速率超过 $2.3\% \cdot (10a)^{-1}$ 。

4.2 讨论

在土壤湿度变化趋势显著差异分析中, 受一般统计检验方法本身算法及其敏感性分析的限制^[31], CVM方法在时间序列突变分析更为敏感, 不仅可以用于两个变量序列之间的比较, 还可以通过变量自身逐步调整时间尺度, 逐步解决最明显突变问题, 探究不同区域土壤湿度明显差异的年份。当然, 本研究是针对各区域平均而言的, 而前期较多的研究是针对空间尺度较小的区域开展^[32], 因此两者之间会存在一定的差异, 但通过与区域一致性较好的相关研究结果进行对比^[9], 可以发现CVM方法具有较好的适用性。

分析不同区域1981-2010年土壤湿度与气温、降水因子的相关性, 发现除江淮、江汉、西南、内蒙古地区土壤湿度与平均温度相关性没有达到0.05的显著性水平, 其余地区相关性均超过0.35, 达到0.05的显著性水平; 新疆、江南、华南、西南、青藏高原和内蒙古地区土壤湿度与降水量关系不显著, 其余地区相关性均超过0.38, 且达到0.05的

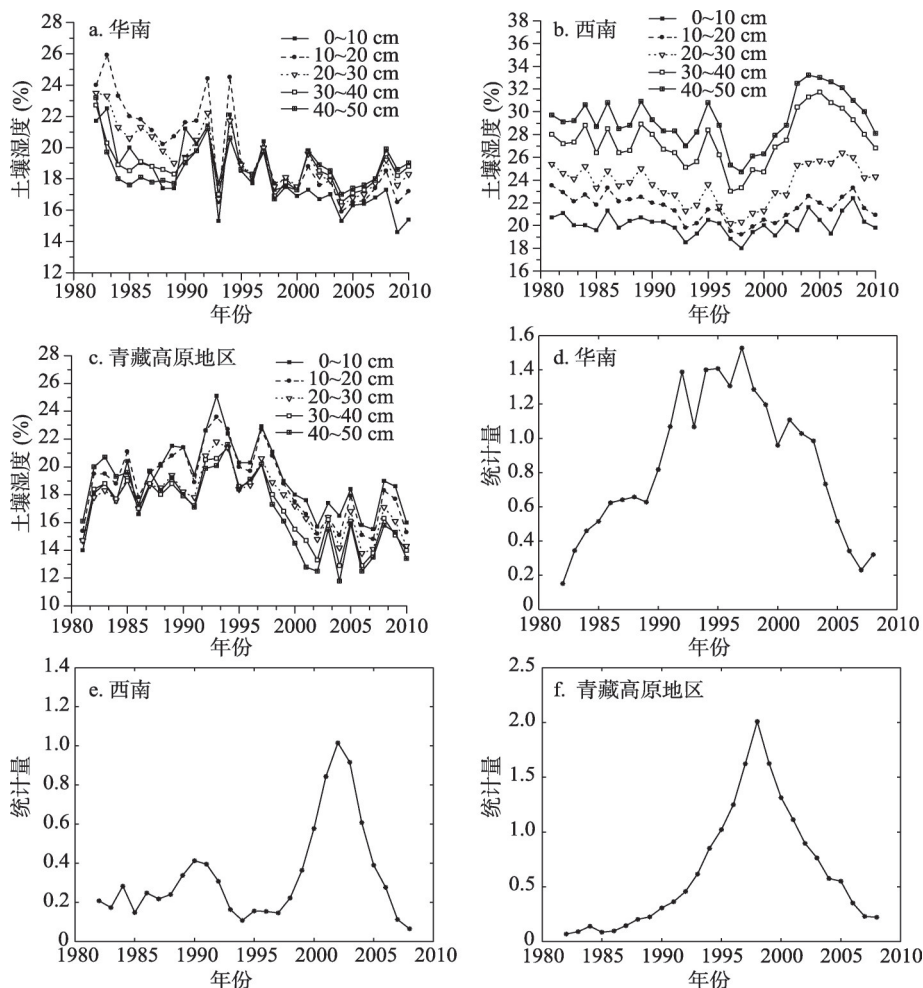


图9 华南、西南和青藏高原地区0~50 cm土壤湿度年变化及CVM差异检验

Fig. 9 Annual variation and CVM test of soil moisture at each depth (0-50 cm) in South China, Southwest China and Tibetan Plateau

显著性水平。可见, 东北、华北、黄淮和西北地区中东部土壤湿度受到降水和气温因子的综合影响, 新疆、江南、华南和青藏高原地区主要受温度的影响, 江淮、江汉主要受降水影响, 土壤湿度的变化与影响因子变化相呼应。具体而言, 如东北地区受温度、降水影响波动较大, 其相关性与降水更密切, 相关系数可达0.74, 土壤湿度出现较大值年份(1981年、1994年、1998年、2005年、2010年)降水量均超过600 mm, 而较小值的年份(1982年、1989年、2001年、2007年)降水量低于450 mm; 华北地区1995年后增温、降水明显减少, 持续性干旱, 导致土壤湿度减小; 江淮地区降水量波动较大, 土壤湿度主要受温度的影响, 出现高值(1985年、1987年、1993年、1999年、2003年)和低值(1981年、1987年、1995年、2004年)的年份与气温的高、低值相对应。

从长期来看, 大部地区, 尤其是北方地区土壤湿度有变干的趋势, 这可能是伴随着气候变暖所致。1981-2010年各区域平均温度呈明显的上升趋势, 增加速率为 $0.21^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1} \sim 0.65^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 北方地区降水量普遍较少, 土壤湿度整体下降。气候变暖变干, 与土壤湿度的突变性密切相关。如新疆地区土壤湿度1994年发生突变, 分析发现1981-

2010年降水量以 $2.98\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 上升,但趋势不显著;而气温以 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率显著上升,尤其是1994年后平均温度比1994年前高 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温升高导致土壤蒸发加强,湿度下降,因此1994年是新疆地区土壤湿度干化突变的年份。

由于各个区域内土壤和作物类型代表性较好,可以用来反映整个区域内土壤水分的动态变化规律。但就不同地区而言,土壤质地、植被类型、地形等因素还是存在一定差异的,也会对土壤水分分布规律产生影响。例如,王磊等^[9]研究发现西北区西部土壤水分明显受到土壤质地影响,持水性从东到西、由北至南降低,蒸发却逐渐增加,导致土壤干化也随之严重。而且,即使土壤质地一致,由于土壤类型的不同,土壤水分仍会出现差异,如李宁等^[33]研究发现棕钙土、栗钙土和灰漠土3种土壤中,以栗钙土土壤湿度变化最明显,棕钙土具有较好的土壤结构使其水分变化较小。当然植被对土壤湿度的影响也不容忽视,由于不同作物生长对水分的需求差异较大,加上根系吸水性差异,导致土壤湿度必然存在明显差异。以河北省黄骅冬小麦地块和自然地块为例,在冬小麦生长前期和缓慢生长期由于需水少,根系吸水较少,两地块的土壤湿度差异较小,当进入冬小麦旺盛生长阶段时,需水明显增加导致土壤湿度比自然地段低10%左右,甚至达15%以上。

参考文献(References)

- [1] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305: 138-1140.
- [2] Lin Jie, Chen Xiaoming, Zhang Yong. Progress in the research on the relationship between climate change and soil moisture. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5): 1271-1276. [林洁, 陈效民, 张勇. 气候变化与土壤湿度关系的研究进展. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1271-1276.]
- [3] Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Tubin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over east China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(3): 278-287. [马柱国, 魏和林, 符涂斌. 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, 58(3): 278-287.]
- [4] Yang Yonghui, Watanabe Masataka, Wang Zhiping, et al. Impacts of temperature and precipitation changes on soil moisture of Taihang Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 56-63. [杨永辉, 渡边正孝, 王智平, 等. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响. *地理学报*, 2004, 59(1): 56-63.]
- [5] Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(1): 1-11. [李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 1-11.]
- [6] Zhao Wenju, Li Xiaoping, Fan Yanwei, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(17): 144-151. [赵文举, 李晓萍, 范严伟, 等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 144-151.]
- [7] Yu Jiehui, Liu Xinsheng, Luo Tianxiang, et al. Seasonal variations of soil temperature and moisture at the upper limit of alpine meadow in north-facing slope of the Nianqingtanggula Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1246-1254. [俞洁辉, 刘新圣, 罗天祥, 等. 念青唐古拉山北麓草甸海拔分布上限土壤湿度的季节变化. *地理学报*, 2012, 67(9): 1246-1254.]
- [8] Fan Feng. Preliminary results on long-term soil moisture variation in Yunnan. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(4): 409-421. [樊风. 云南土壤湿度长期变化的初步研究. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 409-421.]
- [9] Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. Soil moisture over the west of Northwest China and its response to climate. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(6): 1257-1266. [王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应. *高原气象*, 2008, 27(6): 1257-1266.]
- [10] Yang Yuguang, Liu Zhihui, Qiao Peng. Study on soil humidity and its affecting factors on northern slope of the Tianshan Mountains in snow melting season. *Arid Zone Research*, 2012, 29(1): 173-178. [杨与广, 刘志辉, 乔鹏. 天山北坡融雪期土壤湿度特征及其影响因子. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 173-178.]
- [11] Zhang Congcong, Chen Xiaomin, Zhang Yong, et al. Influence of meteorological factors on soil moisture dynamics of upland soil in Taihu Lake region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21): 4454-4463. [张聪聪, 陈效民, 张勇, 等. 气

- 象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动态的影响. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4454-4463.]
- [12] Yang Na, Liu Liangming, Xiang Daheng, et al. Applying BP neural network to estimate soil moisture with meteorologic parameters. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 42(6): 1324-1329. [杨娜, 刘良明, 向大亨, 等. 利用BP神经网络由特征气象要素预测土壤湿度. 土壤通报, 2012, 42(6): 1324-1329.]
- [13] Zhang Qiang. Simulation and prediction of soil moisture based on support vector machine technique. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 69-67. [张强. 基于支持向量机的土壤湿度模拟及预测研究. 土壤学报, 2013, 50(1): 69-67.]
- [14] Cammalleri C, Micale F, Vogt J. On the value of combining different modeled soil moisture products for European drought monitoring. Journal of Hydrology, 2015, 525: 547-558.
- [15] Li Y, Zhou J, Wang H J, et al. Integrating soil moisture retrieved from L-band microwave radiation into an energy balance model to improve evapotranspiration estimation on the irrigated oases of arid regions in Northwest China. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 214/215: 306-318.
- [16] Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China (Part I): Multi-data intercomparison. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 581-597. [张文君, 周天军, 宇如聪. 中国土壤湿度的分布与变化(I): 多种资料间的比较. 大气科学, 2008, 32(3): 581-597.]
- [17] Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. Spatial and temporal variations of spring soil moisture in East China. Scientific Sinica Terrae, 2008, 38(11): 1428-1437. [左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(11): 1428-1437.]
- [18] Liu L, Zhang R H, Zuo Z Y. Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China. Journal of Geographical Research: Atmosphere, 2014, 119(1): 54-64.
- [19] Younis S M Z, Iqbal J. Estimation of soil moisture using multispectral and FTIR techniques. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2015, 18(2): 151-161.
- [20] Mao Fuping, Zhang Shuwen, Ye Dan, et al. Impact of time correlated model errors on soil moisture estimates with the ensemble square root filter. Advances in Earth Science, 2015, 30(6): 700-708. [毛伏平, 张述文, 叶丹, 等. 模式时间关联误差对集合平方根滤波估算土壤湿度的影响. 地球科学进展, 2015, 30(6): 700-708.]
- [21] Koster R D. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science, 2004, 305: 138-140.
- [22] Dillon M E, Collini E A, Ferreira L J. Sensitivity of WRF short-term forecasts to different soil moisture initializations from the GLDAS database over South America in March 2009. Atmospheric Research, 2016, 167: 196-207.
- [23] National Meteorological Center. Manual for China Meteorological Geographic Divisions. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [24] Dan G, Baruch G, Daniel R. Drip Irrigation: Principles, Design, and Agricultural Practices. KfarShmaryahu, Israel: Drip Irrigation Scientific Publications, 1976.
- [25] Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [26] Holmes M, Kojadinovic I, Quessy J F. Nonparametric tests for change-point detection à la Gombay and Horváth. Journal of Multivariate Analysis, 2013, 115: 16-32.
- [27] Mazdiyasni O, AghaKouchak A. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States. PNAS, 2015, 112(37): 11484-11489.
- [28] Ross G J, Adams N M. Two nonparametric control charts for detecting arbitrary distribution changes. Journal of Quality Technology, 2012, 44(2): 102-116.
- [29] Anderson T W, Darling D A. Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria bases on stochastic processes. The Annals of Mathematical Statistics, 1952, 23(2): 191-211.
- [30] Lu Dengrong, Huang Bin, Wang Jinsong. Change of the ten-day precipitation and its relationship with soil moisture in the rain-fed area east of the Yellow River in Gansu Province. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 230-235. [陆登荣, 黄斌, 王劲松. 甘肃河东雨养农业区旬降水变化及其与土壤湿度关系. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 230-235.]
- [31] Clarke R T. On the (mis)use of statistical methods in hydro-climatological research. Hydrological Science Journal, 2010, 55(2): 139-144.
- [32] Li Baichao, Wen Xiuqing, Wang Liangliang, et al. Tendency of soil moisture in spring of Heilongjiang Province in recent 30 years. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(3): 289-296. [李百超, 温秀卿, 王晾晾, 等. 黑龙江省春季土壤湿度近30a变化趋势. 干旱气象, 2011, 29(3): 289-296.]
- [33] Li Ning, Gu Wei, Du Zixuan, et al. Soil water content observations under different soil classification in central and east

Inner Mongolia of China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 151-156. [李宁, 顾卫, 杜子璇, 等. 内蒙古中西部地区不同土壤类型下土壤水分的研究. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 151-156.]

Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China

ZHANG Lei¹, LU Houquan¹, WANG Liangyu¹, YANG Bingyun²

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Using actual observed soil moisture data of 155 agro-meteorological stations across China, at dekadal scale from 1981 to 2010, this paper examined the spatial and temporal characteristics of soil moisture at each 10 cm depth from 0 to 50 cm, at regional and national scales. Annual trend and significant change point were detected through tendency analysis and Cramér-von Mises test methods. Since soil texture and crop types were approximately homogeneous in each climatic region, regional average variation of soil moisture could be observed in the analysis. Mean soil moisture was between 15% and 25% in most regions while it was above 25% in the northern part of Northeast China and southern part of Southwest China. At each depth, larger soil moisture was detected in Southwest China, Jianghuai, Northeast China, Jiangnan, Jianghan, Huanghuai and South China, while the smallest value was observed in Inner Mongolia. As soil deepening, except in Tibetan Plateau, increases in soil moisture were apparent, being a maximal magnitude in Southwest China. Obviously, as well as periodical characteristics, annual and seasonal difference of soil moisture emerged at each depth, corresponding well to regional precipitation, temperature, and water demand for planting crops. An obvious freezing-increasing-decreasing-increasing trend existed in Northeast China, Inner Mongolia and Xinjiang, a variation of decreasing-increasing-fluctuating in North China, Huanghuai, and eastern Northwest China, a multiple fluctuation in Jianghuai, Jianghan and Jiangnan, and a decreasing-increasing-decreasing trend in South China and Southwest China, while an increasing-decreasing trend was found in the Tibetan Plateau. Soil moisture at a greater depth was higher than that at superficial layers. Annual soil moisture varied at each depth, but the mean value decreased from 1981 to 2010. Such annual variation could be well explained by corresponding temperature and precipitation. Consequently, soil moisture tended to decrease in response to temperature increase, following climate change. Apart from climatic factors, soil texture and crop type, as well as human activity, can have influence on soil moisture, which is needed to be studied further. Soil moisture decreased in Xinjiang, South China, North China, Tibetan Plateau, Northeast China and Huanghuai among which Xinjiang was most remarkable with a velocity above $-2.3\% \cdot (10a)^{-1}$. Except in Jianghuai, a significant change of soil moisture was detected, mainly during two periods, i.e. from the late 1980s to early 1990s, and late 1990s.

Keywords: soil moisture; climatic zoning; linear tendency; Cramér-von Mises test; China