

辽宁春播期浅层土壤湿度变化特征 及其气候影响因子分析

胡春丽¹, 李 辑¹, 焦 敏¹, 王 婷¹, 李雨鸿¹, 林 蓉², 王 阳¹

(1. 辽宁省气象科学研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 利用 1981–2015 年辽宁省 4–5 月(春播期)19 个农业气象站 0~20 cm 层土壤相对湿度、降水和气温资料, 分析了土壤相对湿度的空间分布、长期变化状况、突变和周期性特征及其与气候影响因子的相关关系, 结果表明: 近 35a 土壤湿度区域性变化显著, 辽西地区土壤湿度减少(干旱化程度加剧), 辽东地区土壤湿度增加; 土壤湿度年际波动较大, 没有明显的长期变化趋势, 主要经历了平稳–偏干–偏湿 3 个时期, 不存在明显的突变点, 4 月和 5 月分别存在 4~7 a 和准 2 a 的周期; 2000 年以后土壤湿度稳定性增大, 发生土壤异常偏干和偏湿的极端事件显著增多, 尤其是在辽西干旱地区表现最为明显; 4 月土壤湿度与前秋降水相关显著, 秋季降水冬季封冻在土壤中, 次年春季土壤融化返浆, 土壤湿度增加, 5 月土壤湿度与同期降水和气温相关显著, 相关系数均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

关键词: 土壤湿度; 变化特征; 气候影响因子; 辽宁省

中图分类号: S152.7⁺1 **文献标志码:** A

Change characteristics of shallow soil humidity and its impact climate factors in Liaoning spring sowing stage

HU Chun-li¹, LI Ji¹, JIAO Min¹, WANG Ting¹, LI Yu-hong¹, LIN Rong², WANG Yang¹

(1. *Liaoning Institute of Meteorological Science, Shenyang, Liaoning 110166, China;*

2. *Shenyang Regional Climate Centre, Shenyang, Liaoning 110016, China*)

Abstract: Based on data of relative humidity, precipitation and temperature in the depth 0~20 cm of 19 agricultural weather stations in Liaoning Province from 1981 to 2015, the spatial distribution, long-term changes, the catastrophe features, the periodic characteristics of soil relative humidity were analyzed. The results showed that there was a significant change in soil moisture in the past 35 years. Soil moisture in Liaoxi area decreased (the degree of drought), soil moisture in Liaodong area increased and soil moisture fluctuated yearly. There was no obvious long-term trend and mainly experienced a smooth-partial dry-partial wet three periods. There was no obvious point of change in April and May. There were 4~7 a and quasi-2a cycle respectively. The stability of soil moisture enhanced after 2000. The frequency of soil abnormal dry and extremely wet events increased significantly, especially in the most obvious performance in arid areas of western Liaoning. Soil moisture in April related to autumn precipitation stored in winter frozen soil. Next spring soil melt back to the pulp increased soil moisture. Soil moisture in May related significantly ($\alpha=0.01$) to the precipitation and temperature in the same period.

Keywords: soil humidity; change characteristics; climate influencing factor; Liaoning Province

干旱被认为是成因复杂、影响人口多、危害严重的自然灾害类型之一^[1]。气候变暖引发降水时空分布不均匀性加剧, 近年来东北乃至北方气候变

化呈现暖干趋势^[2-3], 极端干旱事件频繁发生, 辽宁省是一个农业大省, 随着气候变化的不断影响, 农业干旱风险也在增加^[4], 严重影响了辽宁省的农业

收稿日期: 2017-07-06

修回日期: 2017-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41605087); 中国气象局省级气象科研所科技创新发展项目(201708)

作者简介: 胡春丽(1980–), 女, 吉林德惠人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事气候变化、农业气象等研究。E-mail: huchunli0829@163.com

通信作者: 李辑, 正研级高工, 主要从事短期气候预测及气候变化的相关研究。E-mail: cqliji@sina.com

生产和粮食产量,受到了政府和众多学者的关注。

土壤含水量指标是目前研究成熟的农业干旱指标^[5],也是广泛应用的农业干旱指标之一,土壤湿度不仅可以反映当年的干旱程度,同时无论是对于灌溉农业,还是管理调配用水,土壤湿度都是重要的依据,对作物生长发育及产量的形成具有重要影响。许多学者分析了区域土壤湿度的时空演变、垂直变化规律及其与气候变率、气象要素的关系,如谷永利等分析了河北省土壤水分分布及变化特征,揭示了土壤水分的时空变化规律^[6];钱莉等利用统计方法,对河西走廊东部农耕期耕作层土壤水分的地域分布、时间演变和垂直分布进行了分析^[7];孔学夫等系统研究了甘肃东部和东部旱区农田土壤水分动态变化规律^[8];张皓等分析了上海地区土壤湿度的时间分布特征及土壤湿度与降水的相互关系^[9];祖坤等开展贵州省温暖湿润农业气候区土壤湿度与气象因子关系研究,研究结果对深入认识和了解该区域土壤水分变化具有重要意义^[10]。

然而,上述研究针对东北地区开展较少,而另一些研究尽管分析了东北地区土壤湿度变化特征,但时间尺度相对较短。近年来,全球气候变化引发的局地降水的不均匀性,土壤湿度势必呈现新的发展趋势,为了进一步认识土壤湿度的变化规律,本文基于辽宁省农业气象观测站数据,深入研究辽宁省春播期浅层土壤湿度的空间分布特征和长期(1981–2015 年)变化趋势及其时空差异,建立土壤含水量与气候因子相关关系,研究结果为春旱模型预测提供科学依据,为安排作物种植结构提供有效的服务,对辽宁省春播期统筹调配水资源及农事活动具有十分明确的指导作用。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省位于我国东北地区南部,介于东经 118°53′至 125°46′,北纬 38°43′至 43°26′之间,全省有耕地 341.12 万 hm²,占全省土地总面积的 23.4%。全省地势由北向南,自东、西向中部倾斜,东西两侧山地丘陵起伏,中部平原坦荡。平原占总面积的 34.4%,山地占 59.8%,水面占 6.8%,故有“六山一水三分田”之说。辽宁省处于欧亚大陆东岸,属于温带季风型大陆气候,种植业基本上是一年一熟。省内又依气候与地理条件的差异形成不同生产特点,东部多山,盛产人参、鹿茸、中药材,柞蚕业发达,产量占全国的四分之三;西部为半干旱丘陵区,农牧结合,同时发展果业和水产业;南部以水稻、水产、水

果为主;中部、北部属辽河平原地带,是省的主要粮食产区,以水稻、玉米、大豆、高粱、小麦为主。

干旱灾害多发生,以春旱为主,全省春季干旱的频率在 70%以上,春季全省平均降水量 102 mm,降水量除朝阳、阜新地区为 70~80 mm 外,其余大部分地区在 80~160 mm 之间,占全年降水量的 15.7%,西部地区有“十年九旱”的气候特征。

1.2 数据来源与处理

选用 1981–2015 年辽宁省 19 个农业气象观测站 4–5 月 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤含水量月资料,将其平均值代表 0~20 cm(浅层)土壤含水量,来源于辽宁省气象档案馆,站点位置分布见图 1。将阜新、朝阳、锦州、海城、黑山、建昌、绥中、彰武代表辽宁西部地区(辽西),将新宾、昌图、灯塔、盖州、开原、瓦房店、岫岩、新民、小市代表辽宁东部地区(辽东)。由于站点变更等原因,辽宁省现有春播期土壤湿度数据存在资料缺测和连续性较差等缺点,为满足业务工作需要,李雨鸿等^[11]建立了一套完整的辽宁省春播期土壤湿度数据集,数据续补方法详细见文献。

利用 Excel 2010 对土壤湿度和气象要素数据进行处理并制图;基于 ArcGIS 9.3 软件对土壤湿度的空间变化进行制图分析。

土壤相对湿度定义为土壤重量含水率占田间持水量的比值,以百分率(%)表示,本文简称“土壤湿度(R)”,历史平均数值时段为 1981–2010 年;干旱等级的定义为重旱: $R \leq 40\%$ 、中旱: $40\% < R \leq 50\%$ 、轻旱: $50\% < R \leq 60\%$ 、适宜: $60\% < R \leq 90\%$ 、饱和: $> 90\%$;封冻墒定义为前一年秋季在土壤封冻前最后一次测墒的土壤湿度数值^[12]。

1.3 研究方法

本文采用趋势系数和气候倾向率来研究辽宁省 19 个站点土壤湿度的长期变化特征,根据文献^[13],趋

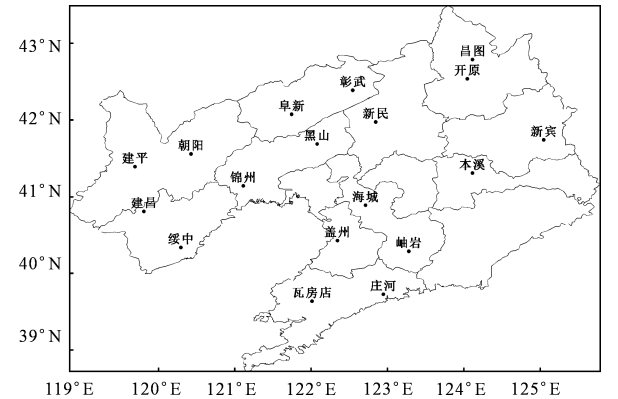


图 1 研究区 19 个站点位置分布图
Fig.1 Location of 19 stations

势系数是要素序列与自然数列的相关系数,气候倾向率是要素序列与时间序列之间建立的一元线性回归系数的 10 倍。这两个数值可以用来研究气象要素在气候变化中升降的定量程度和反映气候要素上升和下降的速率。

采用 Morlet 小波函数对辽宁省春播期土壤湿度的时间序列进行离散小波变换,分析其周期变化特征^[14];采用 Mann-Kendall 方法进行突变检验^[14];采用变异系数方法进行稳定性分析^[15],公式为 $C.V=(SD/MN) \times 100$,其中 SD 为标准偏差, MN 为平均值。

2 土壤湿度的气候特征

2.1 土壤湿度平均特征

图 2 是辽宁省播种期 20 cm 平均土壤湿度分布图。4 月在阜新北部通常土壤偏旱,平均土壤湿度为 54%~59%,级别为轻度干旱;抚顺大部、本溪东部、丹东北部地区土壤易偏湿,其平均土壤湿度为 91%~108%,级别为饱和。其它地区土壤墒情比较适宜农作物的播种和幼苗生长,其平均土壤湿度为 60%~89%。5 月全省各地区土壤墒情未出现干旱,其中抚顺东部、本溪东部地区土壤易偏湿,其平均土壤湿度为 91%~97%,其它地区土壤湿度为 60%~89%。

总体而言,全省各区域的土壤湿度呈现出一定的规律,即辽宁省东南部土壤湿度通常高于西北部,具体分布为:东部>中部>南部>北部>西部。这是由于辽宁省地理位置所导致的,东南部临海,水汽较充足,湿度偏高,而西北部地区常年高温少雨,空气干燥,因此,辽宁省春季土壤湿度的特征规律与辽宁省地理分布有很大的关系。周斌^[16]等通过数据统计分析辽宁省春季土壤湿度特征得出西北部地区适宜作为旱田,播种抗旱性较强的品种,而东南部地区适宜作为水田,可适当考虑高产密植的农事建议。

2.2 土壤湿度空间变化趋势

从趋势系数空间分布来看(图 3),4 月,趋势变化区域性显著,辽西和辽南近 35 年呈现不同的变化趋势特征,趋势系数显著减少(增加)地区主要集中在辽西(辽南)地区,这些地区也是辽宁省春旱易发区。由图 3 可见,朝阳地区趋势系数小于-0.42(通过了 $\alpha=0.05$ 显著性检验),大连、营口、鞍山趋势趋势系数大于 0.42(通过了 $\alpha=0.05$ 显著性检验)。5 月,趋势变化显著区域与 4 月略有差异,辽南趋势呈现显著减少特征,显著增加区域移至辽北地区。通过以上分析可知,春播期辽西地区土壤湿度呈现显著

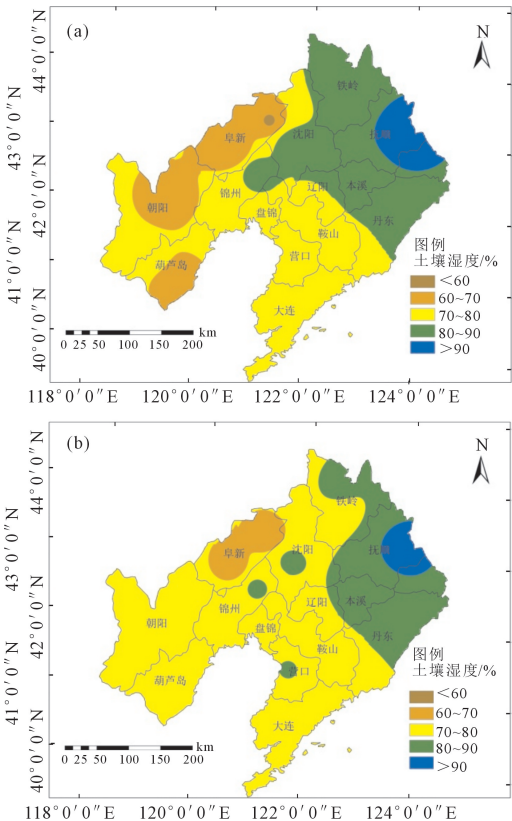


图 2 4 月(a)和 5 月(b)多年平均土壤湿度空间分布
Fig.2 The spatial distribution of annual mean soil humidity in April (a) and May (b)

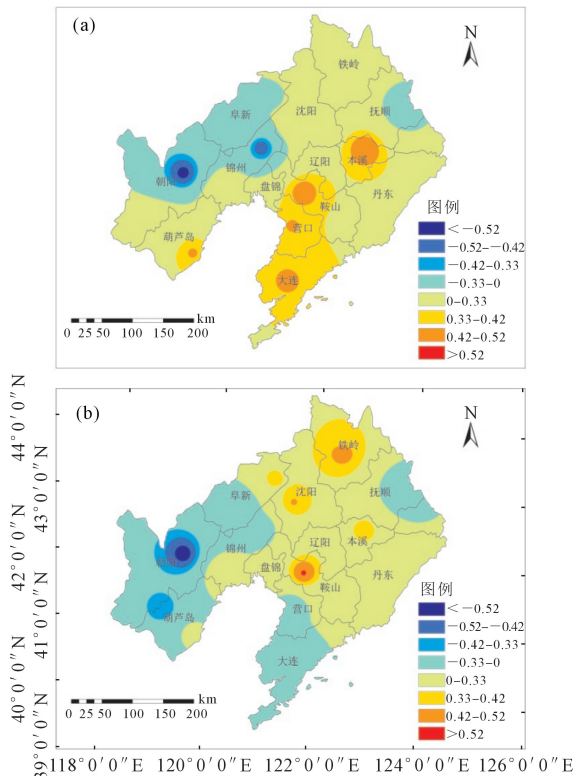


图 3 4 月(a)和 5 月(b)土壤湿度趋势系数的空间分布
Fig.3 The spatial distribution of trend coefficients of soil humidity in April (a) and May (b)

的减少趋势,即干旱化程度加剧。辽西地区属于中国典型的半干旱地区,春季降水的年际不均匀性,导致旱灾频繁发生,其中朝阳地区有“十年九旱”之称,春季干旱影响作物的正常播种,近 35 年春季干旱的发生频率有增加的趋势,干旱仍是影响该地区农业生产的主要气象灾害。以上研究结论与李宝林等^[18]得到东北区的干旱有所发展,西部的荒漠化和沙漠化问题比较严重和王小桃等^[12]得到辽西地区土壤具有明显的干化趋势基本一致。

2.3 土壤湿度的长期变化

4 月(图 4a)土壤湿度在近 35 年呈减少趋势,但趋势并不显著。年际变化上看,1981–2015 年 4 月辽西地区土壤墒情年际变化较大,土壤湿度为 47%~88%,近 25 年未出现土壤墒情饱和;1981–2015 年辽东地区土壤墒情适宜。主要经历了平稳–

偏干–偏湿 3 个时期,其中在 2001–2003 年经历了历史同期最低值。土壤湿度平均为 78%,其中,辽西地区为 68%,辽东地区为 79%。历史上全省土壤湿度最小的 3 年分别为 1994(57%)、2001(59%)、2003(55%)年,土壤湿度最大的 3 年分别为 1987(88%)、2005(81%)、2013(86%)年。

5 月(图 4b)土壤湿度年际变化与 4 月基本一致,同样经历了平稳–偏干–偏湿 3 个时期,土壤湿度平均值为 77%,其中,辽西地区为 72%,辽东地区为 82%。历史上全省土壤湿度最小的 3 年分别为 2003(62%)、2001(63%)、2002(65%)年,土壤湿度最大的 3 年分别为 1998(84%)、2010(87%)、2005(92%)年。辽西地区土壤墒情年际变化较大,土壤湿度为 54%~88%,近 35 年未出现土壤墒情饱和;1981–2015 年辽东地区土壤墒情适宜。

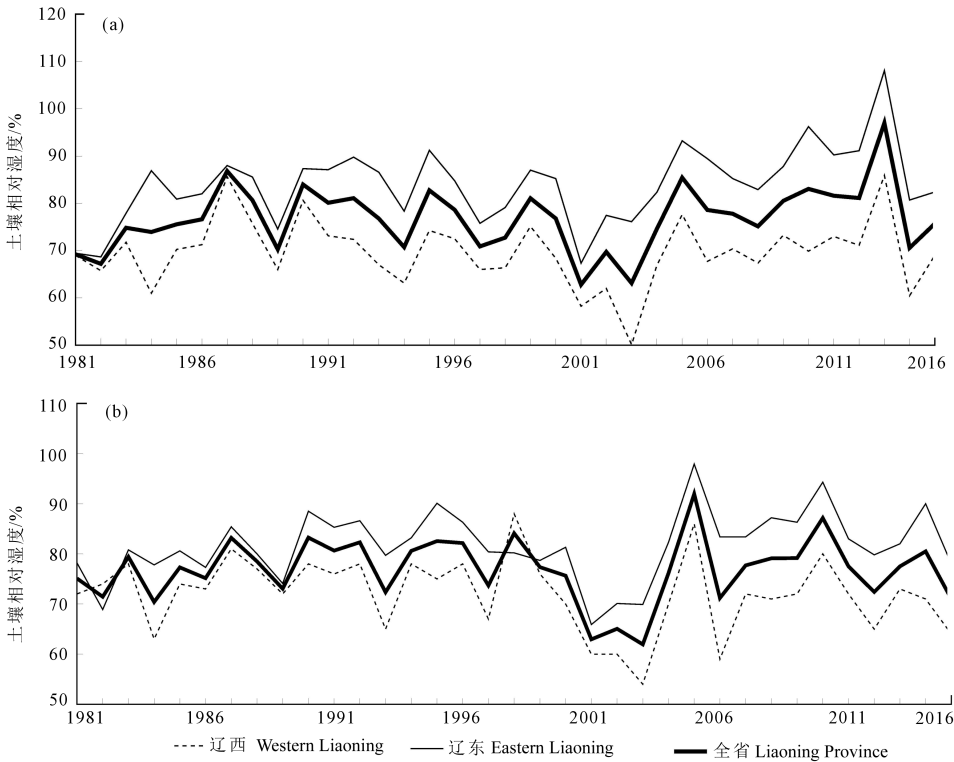


图 4 4 月(a)和 5 月(b)土壤湿度年际变化图

Fig.4 The time series of the annual soil humidity in April (a) and May (b)

表 1 为土壤湿度年代际分布,除了 4 月辽东地区外,土壤湿度均在 2001–2010 年达到最小值,表明在时段土壤处于偏干阶段。除了 5 月辽东地区外,土壤湿度均在 2011–2015 年达到最大值,表明最近 5 年处于偏湿阶段。统计土壤湿度极端年发现,4 月辽西地区土壤湿度小于 60%出现 2 年,5 月出现 1 年,均发生在 2001–2010 年土壤偏干阶段;4 月辽东地区土壤湿度大于 90%出现 5 年,其中 1 年出现在 1995 年,4 年出现在 2005–2013 年,5 月出现

4 年,同样基本发生在 2005 年至 2014 年。
表 2 为土壤湿度变异系数的年代际分布,4 月,辽东和辽西地区 2001–2010 年、2011–2015 年变异系数明显大于 1981–1990 年和 1991–2000 年;5 月,辽西地区变异系数与 4 月基本相同,均在 2001–2010 年、2011–2015 年变异系数偏大。以上分析表明 00 年以后在气候变暖的大背景下,土壤湿度稳定性增大,发生土壤异常偏干和偏湿的极端事件显著增多,尤其是在辽西干旱地区表现最为明显。

表 1 土壤湿度年代际分布/%

Table 1 Indigenous distribution of soil moisture					
月份 Month	地区 Region	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2015
4 月 April	辽东				
	Eastern Liaoning	80.1	84.5	83.8	90.5
	辽西				
	Western Liaoning	71.7	69.8	66.3	71.9
5 月 May	辽东				
	Eastern Liaoning	79.2	83.2	82.1	82.6
	辽西				
	Western Liaoning	74.2	75.1	68.4	69

表 2 土壤湿度变异系数年代际分布/%

Table 2 Indigenous distribution of soil moisture variation coefficient					
月份 Month	地区 Region	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2015
4 月 April	辽东				
	Eastern Liaoning	5	6	10	12
	辽西				
	Western Liaoning	9	6	13	14
5 月 May	辽东				
	Eastern Liaoning	7	8	13	5
	辽西				
	Western Liaoning	6	4	15	6

2.4 土壤湿度的突变特征

由图 5 可见,近 35 a 来辽宁省的土壤湿度不存在明显的趋势,根据图 5 中 UF 与 UB 两条曲线的交点不明显,可知道土壤湿度也不存在明显的突变点,但是年际波动比较明显,尤其是 2003 年之前,土壤湿度年际波动最为明显,经历了土壤湿度由小-稳定-小的阶段,2004 年之后,土壤湿度又呈现了由小到大的阶段。

2.5 土壤湿度的周期特征

图 6 给出了全省土壤湿度的 Morlet 小波变换图,为小波系数实部的分布图(彩色阴影部分为通过 0.1 的信度检验区域,虚线阴影部分为边缘效应影响区域),从图上可以看出,4 月(见图 6a)土壤湿度表现为 4~7a 的和 2~3a 周期;2000 年以后存在明显的 7a 和 2a 的周期,在整个研究时段 4~7a 的周期都是较为显著的。5 月土壤湿度存在准 2a 周期,同样在 2000 年以后周期性较为显著,存在 7a 和 3a 的显著周期(见图 6b)。

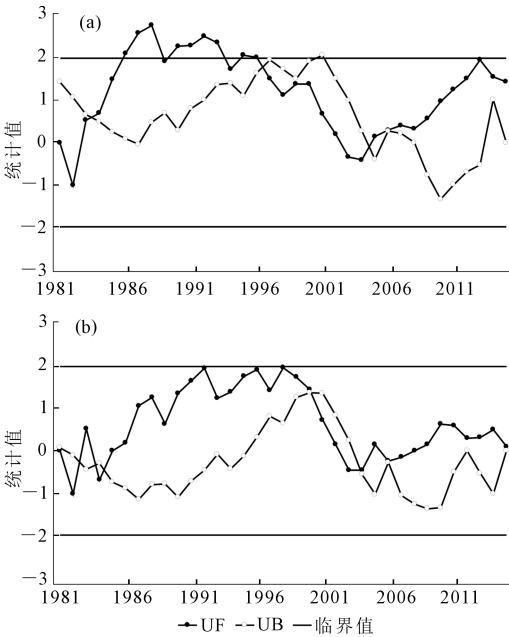


图 5 4 月(a)和 5 月(b)土壤湿度的 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig.5 The Mann-Kendall curves of soil humidity in April (a) and May (b)

3 土壤湿度的气候影响因子

3.1 土壤湿度与前期气候影响因子的关系

基于 1981~2015 年土壤湿度数据集分析辽西、辽东地区土壤湿度与前期底墒及前期气象因子的关系。从表 3 可以看出,辽西地区 4 月土壤湿度与封冻雨、3 月 28 日墒情及封冻前底墒等前期气候因子呈显著正相关关系,尤其是与 3 月 28 日墒情相关最为显著,相关系数达到了 0.75,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,这主要是由北方特有的封冻雨特点所决定,在秋季,储存在土壤里的水分随着冬季温度的降低,土壤水分封冻在土壤里,第二年春季,气温升高,土壤化通后会形成明显的返浆现象,从而有效缓解了春旱程度。辽西地区 5 月土壤湿度与封冻雨、4 月 28 日墒情、封冻前底墒呈正相关关系,且与 4 月相比,相关关系明显下降。

辽东地区 4 月春播期土壤湿度与 3 月气温负相关关系,与封冻雨、3 月 28 日墒情、3 月降水呈正相关关系,且 3 月 28 日墒情封冻雨对辽东地区 4 月春播期土壤湿度的影响明显低于辽西地区,但也存在一定的正相关关系,这可能是由于辽西、辽东地区差异性引起的。辽东 5 月土壤湿度与 4 月 28 日墒情且与 4 月相比,封冻雨对辽东 5 月墒情的影响明显降低,这可能是随着气温升高,封冻雨的影响逐渐减小,而降水逐渐成为影响墒情的主要影响因子。

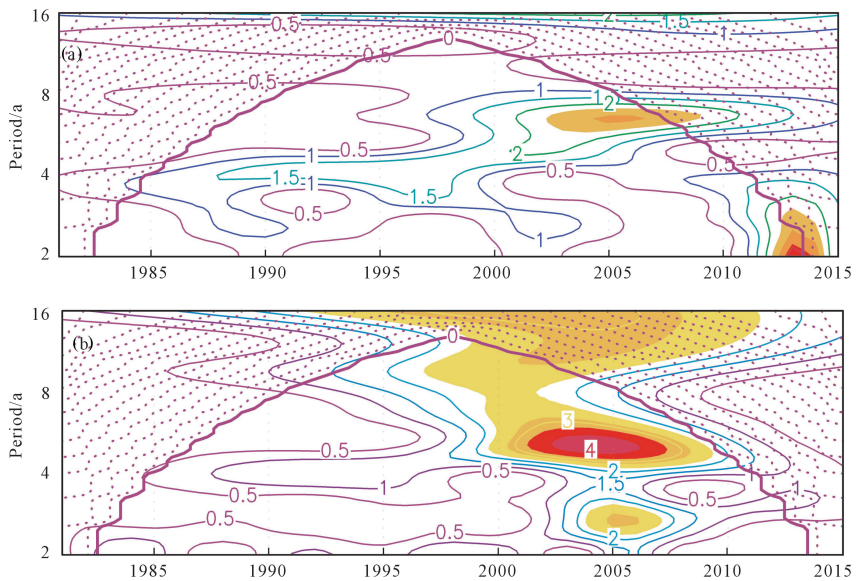


图 6 4 月 (a) 和 5 月 (b) 土壤湿度的 Morlet 小波变换图

Fig.6 Morlet wavelet transform of the soil humidity in April (a) and May (b)

表 3 土壤湿度与前期影响气候因子相关列表

Table 3 Correlation between soil humidity and pre-climatic factors

月份 Month	地区 Region	封冻雨 Freezing rain	3.28 墒情 Moisture on 3.28	4.28 墒情 Moisture on 4.28	封冻前底墒 Moisture of last year	3 月气温 Temperature in March	3 月降水 Precipitation in March	4 月气温 Temperature in April	4 月降水 Precipitation in April
4 月 April	辽西 Western Liaoning	0.54**	0.75***	—	0.47**	−0.14	0.28	—	—
	辽东 Eastern Liaoning	0.29	0.56***	—	—	−0.30	0.01	—	—
5 月 May	辽西 Western Liaoning	0.455**	—	0.617***	0.396*	—	—	−0.01	0.18
	辽东 Eastern Liaoning	0.18	—	0.56***	—	—	—	−0.36*	0.34*

注:其中 * 表示 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; * * 表示 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,下同。
Note: * indicates $\alpha=0.05$ significance test; * * indicates $\alpha=0.01$ significance test, the same as below.

3.2 土壤湿度与同期气候影响因子的关系

表 4 给出辽东和辽西地区土壤湿度与同期气温和降水的相关关系。4 月,辽东和辽西地区均与气温呈现负相关关系,与降水呈现正相关关系,但相关数值较小。结论与多数学者研究所得到的土壤湿度的大小受同期降水影响最大的结论不一致,其原因可能是 4 月辽宁省气温回暖较慢,土壤刚开始解冻,前一年秋季存在土壤中的水分没有出现蒸发现象,而同期的降水只能影响在土壤的表层。5 月辽东和辽西与同期降水和气温的相关系数均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。说明 5 月降水偏多(少),土壤湿度偏湿(干),5 月气温偏高(低),土壤湿度偏干(湿)。

通过上述分析发现,4 月,土壤湿度影响因子是封冻雨、3 月 28 日墒情和封冻前墒情,可以归结为底墒起到主要作用,春季随着气温回暖土壤开始逐渐解冻。5 月,同期降水与气温对土壤湿度影响开

始增强。因此在做 4 月土壤湿度气候预测模型时,底墒是具有物理意义明确的预报因子,5 月土壤湿度气候预测模型时,同期气候条件是具有明确意义的预报因子。

表 4 土壤湿度与同期影响气候因子相关列表

Table 4 List of climatic factors affecting soil humidity

月份 Month	地区 Region	4 月气温 Temperature in April	4 月降水 Precipitation in April	5 月气温 Temperature in May	5 月降水 Precipitation in May
4 月 April	辽西 Western Liaoning	−0.21	0.22	—	—
	辽东 Eastern Liaoning	−0.30	0.01	—	—
5 月 May	辽西 Western Liaoning	—	—	−0.62***	0.768***
	辽东 Eastern Liaoning	—	—	−0.55***	0.66***

4 结论与讨论

1) 辽宁省独特的地理位置导致全省各区域的土壤湿度呈现出一定的规律,东南部土壤湿度通常高于西北部,具体分布为:东部>中部>南部>北部>西部。全球气候变暖,降水略有增加,但东北南部仍有向干旱的发展趋势^[17-18],本研究发现,辽宁省春播期土壤相对湿度区域变化显著,辽西地区干旱程度有所加强,辽东地区干旱程度有所减弱,干旱仍是影响辽西地区农业生产的主要气象灾害,研究结论与谢安等(2003)结论略有差异,可能与研究区域和研究时间不同有关。

2) 本文研究发现春播期土壤湿度年际波动较大,主要经历了平稳-偏干-偏湿 3 个时期,在 2000 年以后周期性较为显著,存在 7 a 和 3 a 的显著周周期,研究结果弥补了过去对土壤湿度阶段性变化和周期性认识的不足。2000 年以后土壤湿度稳定性增大,发生土壤异常偏干和偏湿的极端事件显著增多,尤其是在辽西干旱地区表现最为明显。在气候变暖背景下积极开展极端气候事件的背景原因、演变规律和灾害影响的研究和预报是当务之急。本研究未将土壤相对湿度的变化与干旱的持续时间、发生频率、播种期相联系,仍需要进一步的分析研究。

3) 本研究表明 4 月土壤湿度与前期底墒关系密切,5 月土壤湿度与同期降水和气温相关显著,该研究结论与王小桃等^[12]和李雨鸿等^[19]虽然时间选取时间相差 5 年,但结果基本一致。气候因子在特定的环境中受土壤性质及耕种的作物不同,在农田小气候环境中会发生一定的变化,因此,气候因子对土壤湿度的影响是复杂多样的,应该根据具体的情况作出变化。本文寻出土壤相对湿度的主要影响气候因子,根据中长期天气预报的原理,海温和环流特征为粮食气象学中长期预报的重要因子,为了提高预报的时效性,今后试图选取大气环流和海温作为预报因子,结合土壤湿度主要影响气候因子,建立土壤湿度预测模型,提前做出预测,为农业

部门做相关决策提供重要依据。

参 考 文 献:

[1] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究,2015,34(8):1547-1558.

[2] 李邦东,赵中军,舒黎忠,等. 1961-2010 年东北地区降水事件时空均匀性研究[J]. 气象与环境学报,2014,(03):52-58.

[3] 李辑,龚强. 东北地区夏季气温变化特征分析[J]. 气象与环境学报,2006,22(01):6-10.

[4] 袭祝香,杨雪艳丽,刘实,等. 东北地区夏季干旱风险评估与区划[J]. 地理科学,2013,33(06):735-740.

[5] 李明星,马柱国,牛国跃.等. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究[J]. 科学通报,2011,56(16):1288-1300.

[6] 谷永利,刘学锋,杨贤,等. 河北土壤水分分布及变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(3):118-121.

[7] 钱莉,张惠玲,刘春明,等. 河西走廊东部土壤水分变化特征及预测[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(4):58-63.

[8] 孔学夫,晋小军. 旱地农田水分动态变化规律及其应用[J]. 甘肃农业科技,2001,(1):18-20.

[9] 张皓,李军,孙国武,等. 上海地区土壤水分的时间变化特征分析[J]. 高原气象,2008,27(增刊):190-195.

[10] 祖坤,漆定梅,张碧,等. 贵州温暖湿润农业气候区土壤湿度与气象因子关系研究[J]. 资源开发与市场,2017,33(2):165-168.

[11] 李雨鸿,李辑,王小桃,等. 1981-2012 年辽宁省春播期土壤相对湿度月尺度数据重建[J]. 气象与环境学报,2013,29(5):81-85.

[12] 王小桃,李辑,李晶,等. 辽西地区春播期土壤湿度变化特征及影响因子分析[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(4):250-255.

[13] 施能,陈家其. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报,1995,53(4):431-439.

[14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社. 2007.

[15] 钱允祺,陶士珩,王立祥,等. 土壤湿度的统计特征及应用分析[J]. 中国农业气象,1999,22(1):15-17.

[16] 周斌,李辑,林俊杰.等.辽宁省春季土壤相对湿度特征及影响因素[J].生态学杂志,2015,34(6):1630-1637.

[17] 李宝林,周成虎. 东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化[J]. 自然资源学报,2001,16(3):234-239.

[18] 谢安,孙永罡,白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报,2003,58(增刊):75-82.

[19] 李雨鸿,李辑,王婷,等. 辽宁省土壤墒情预测方法研究[J]. 土壤通报,2016,47(04):827-831.