

文章编号: 2096-1618(2018)03-0344-09

# 吉林玉米生长期土壤水分规律分析

李筱杨<sup>1</sup>, 朱克云<sup>1</sup>, 程 溢<sup>1</sup>, 李建平<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 吉林省气象局, 吉林 长春 130000)

**摘要:**为研究吉林省玉米生长期土壤水分规律, 利用吉林省春玉米主要种植区公主岭、农安、榆树3站的1997–2013年土壤水分资料, 应用数理统计方法, 分析了3地的土壤水分规律, 结果表明: 3地平均土壤相对湿度为84%~85%, 且都有逐年上升趋势; 春玉米在拔节之前对土壤水分要求不高, 拔节之后对土壤水分需求逐渐增大, 在乳熟前后达到峰值; 根据土壤相对湿度干旱指标, 1997–2012年, 3个站点在玉米各个发育期都有30%左右的干旱频率, 但干旱程度都不高; 利用土壤相对湿度构建春玉米产量的各种预报方程中, 公主岭、农安适用多元线性回归方程, 平均拟合相对误差分别为8.40%、8.75%, 预报相对误差分别为0.61%、3.89%; 榆树站多元线性回归方程、曲线估计方程都可使用, 平均拟合误差分别为7.29%、6.99%, 预报误差分别为2.39%、5.20%。可为吉林省春玉米的种植提供气象服务依据。

**关键词:**气象学; 农业气象; 吉林省; 春玉米; 土壤水分; 干旱指标; 预报方程

**中图分类号:** TP49; S16

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.03.018

## 0 引言

玉米是中国三大粮食作物, 同时也是重要的饲料作物, 对增加粮食生产、发展畜牧业都起着重要的作用。玉米播种面积约占中国全部耕地面积的五分之一, 产量约占中国粮食总产量的25%<sup>[1]</sup>, 目前, 中国有七成以上的玉米经常遭受干旱的威胁, 每年因干旱造成的产量损失超过1500万吨<sup>[2]</sup>。干旱导致许多玉米产区不稳定、产量不高, 对玉米的生长发育形态特征、生理生化及产量品质都会有一定影响<sup>[3]</sup>。张淑杰等<sup>[4]</sup>认为, 东北地区干旱频率有增高的趋势, 尤其是决定玉米最终产量的关键时期干旱频率呈增加趋势。董朝阳等<sup>[5]</sup>研究表明, 春玉米在拔节~抽雄阶段的干旱会对产量造成严重的影响。马旭凤等<sup>[6]</sup>认为, 干旱发生在玉米出苗期会对作物生长产生影响, 导致发育期略有推迟。DC Nielsen<sup>[7]</sup>认为, 玉米产量对土壤水分的响应差异与玉米种植季节降水减少的量和时间有关。吉林玉米带被称为“世界三大黄金玉米带”之一, 是重要的玉米商品粮基地和工业加工原料基地。由于降水时空分布不均匀, 吉林省容易发生季节性干旱。为有效躲避、预防农业干旱, 科学工作者开展了一系列研究, 利用干旱指标进行农业干旱研究和旱情评价<sup>[8–11]</sup>。土壤水分是很好的干旱指标, 直接标志着供应作物水分的多少。利用吉林公主岭、农安、榆树3站

多年的土壤水分资料, 分析得出玉米生长期各发育期的土壤水分变化规律; 同时, 也可以利用土壤水分预报玉米产量。

## 1 资料概况及研究方法

采用的气象资料包括吉林省公主岭、农安、榆树3地1997–2005年不同深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、0~50 cm)土壤含水率、田间持水量; 2006–2013年不同深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、0~50 cm)土壤相对湿度; 以上资料均由吉林省气象局农气中心提供。

分析3站土壤相对湿度, 得出了多年来3地的土壤水分年内年际的变化规律。分析各个玉米发育期(播种、出苗、拔节、抽雄、乳熟、成熟)内土壤水分变化规律及玉米的发育状况, 得出了最适合各个发育期玉米土壤水分条件; 结合干旱指标对所得出的结论进行认证。利用Pearson相关性、线性回归、多元线性回归、曲线估计等统计学方法计算土壤水分与玉米产量之间的相关性, 并得出玉米产量的预报方程。

### 1.1 土壤相对湿度

由于站点之间降水、气温等气候条件有所不同, 不同站点的土质也不同, 单纯的土壤重量含水率并不能很好地反映当地的土壤水分条件, 所以文中所分析的

数据都是基于土壤重量含水率和田间持水量计算出的土壤相对湿度。利用数理统计的方法分析多年来农安、榆树、公主岭 3 地的土壤水分含量数据,并计算出 3 站 1997-2013 年 0~50 cm 平均土壤相对湿度。

$$R = \frac{w}{f} \tag{1}$$

其中, $R$  为土壤相对湿度, $w$  为土壤重量含水率, $f$  为田间持水量,以土壤相对湿度进行分析更能体现当地的干旱特点。

1.2 相对气象产量

由资料可得 3 站实际产量,随着时间的推移,生产技术和方法在更新,前后时期的玉米实际产量不具有可比性,需要换算成相对气象产量  $Y'_m$ ;利用最小二乘拟合法计算出趋势产量  $Y_t$ ,再以实际产量减去趋势产量得出气象产量  $Y_m$ ,最后以气象产量  $Y_m$  除以趋势产量  $Y_t$  可以得到相对气象产量  $Y'_m$ ,前后时期的相对气象产量具有可比性<sup>[12]</sup>,计算公式为

$$Y'_m = Y_m / Y_t \tag{2}$$

1.3 预报方程

计算预报方程时, $x_1$  表示播种-出苗期的土壤相对湿度, $x_2$  表示出苗-拔节期的土壤相对湿度, $x_3$  表示拔节-抽雄期的土壤相对湿度, $x_4$  表示抽雄-乳熟期的土壤相对湿度, $x_5$  表示乳熟-成熟期的土壤相对湿度,单位均为%, $y$  表示实际产量及预报产量。利用 3 站 1997-2011 年资料进行分析并得出方程,2012 年资料用于试预报。

首先在多元线性回归模型下利用  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  来预报  $y$  值,并计算出预报方程。多元线性回归分析一般不对数据作统计模型假设,而直接从实际出发,考察和分析大量数据的结构和特征,从中提取主要而准确的信息,以正确认识事物客观存在的统计规律<sup>[13]</sup>。

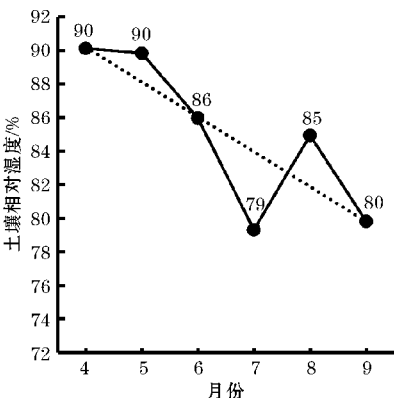
然后再利用曲线估计的 9 种模型(对数模型、倒数模型、二次模型、三次模型、复合模型、幂模型、S 模型、增长模型、指数模型),每个模型分别用  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  来预报  $y$  值,共计 45 个方程,每个站点选取拟合度最高的方程作为预报方程。曲线估计方法是对 2 个相关变量函数关系的研究。当变量之间有显著线性关系时,可以用线性回归分析建立线性回归方程,但当变量之间有明显曲线关系时,可以采用曲线估计方法来建立变量间的模型<sup>[14]</sup>。

每个站选取好两个方程之后,将每个站点 1997-2011 年的数据回代进预报方程进行拟合检验,并对 2012 年预报年的数据与实际产量数据进行比较。

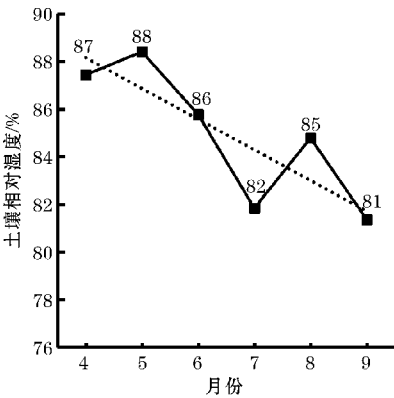
2 吉林省春玉米生长期土壤水分变化分析

2.1 春玉米发育期年内土壤水分变化分析

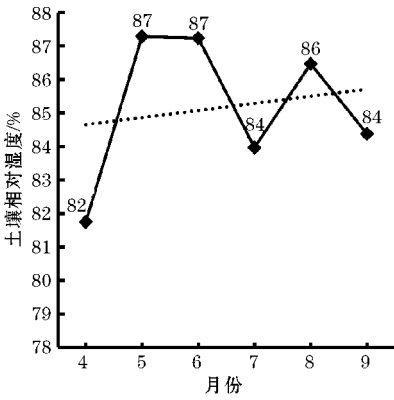
公主岭、农安、榆树 3 地春玉米发育期内各月平均土壤相对湿度变化如图 1 所示,3 地的平均土壤相对湿度在取整后都为 85%。可以看出,东北雨季在 7-8 月,所以 8 月 3 地的土壤相对湿度都有一个极大值,7 月有一个极小值。在图 1 中添加趋势线,公主岭和农安两地的土壤相对湿度在 4-9 月有下降的趋势,而榆树的土壤相对湿度有上升的趋势。3 地均位于吉林中



(a) 公主岭



(b) 农安



(c) 榆树

图 1 3 地春玉米发育期内月平均土壤相对湿度变化

部,处于吉林省西部干旱地区与南部湿润地区的过渡地带<sup>[15]</sup>,其中公主岭、农安相邻,而榆树位置偏东北,与黑龙江相接,地理位置可能是造成3地月平均土壤相对湿度变化存在差异的原因。

2.2 春玉米发育期内土壤水分年际变化分析

统计分析1997–2013年公主岭、农安、榆树3地的土壤相对湿度,将不同深度土壤相对湿度取平均后,绘图见图2。

3站在2005年都有一个明显的极大值,公主岭和农安在2005有最大值,土壤相对湿度分别为96%和94%;榆树在2003年有最大值,土壤相对湿度为97%。公主岭的最小值出现在2000年,土壤相对湿度只有76%;农安的最小值出现在2001年,土壤相对湿度为71%;榆树站的最小值在2007年,土壤相对湿度为74%。公主岭平均土壤相对湿度为84%,农安平均土壤相对湿度为85%,榆树平均土壤相对湿度为85%。

3站的图上添加趋势线后,可以看出3个站的土壤相对湿度都在随着时间缓慢增大。公主岭和榆树两站的趋势线在85%附近很小的范围内,只有农安县的趋势线变化趋势较大,几乎从80%增加到了90%。也就是说从1997–2013年,公主岭和榆树的土壤相对湿度没有明显的变化,只有农安县的土壤相对湿度有明显增加的趋势。与同时期3站降水量相对比,土壤相对湿度折线图与降水量走向相近。

3 吉林省春玉米丰歉年土壤水分对比分析

根据公主岭、农安、榆树1997–2012年春玉米产量年景<sup>[12]</sup>,计算出3站春玉米每个发育期丰年、歉年、多年均值的土壤相对湿度,如表1所示。

表1 3站各个发育期丰歉年平均土壤相对湿度

	播种–出苗期			出苗–拔节期			拔节–抽雄期		
	公主岭	农安	榆树	公主岭	农安	榆树	公主岭	农安	榆树
丰年	88	89	85	85	80	72	82	82	92
歉年	86	95	89	86	83	80	71	85	74
多年均值	92	89	87	87	81	84	80	82	85
	抽雄–乳熟期			乳熟–成熟期					
	公主岭	农安	榆树	公主岭	农安	榆树			
丰年	85	87	95	81	84	85			
歉年	70	83	78	72	76	80			
多年均值	82	83	86	82	83	85			

吉林省中部农业区的春玉米平均播种日期为4月26日左右,在播种–出苗期内,3地的丰歉年及多年均值

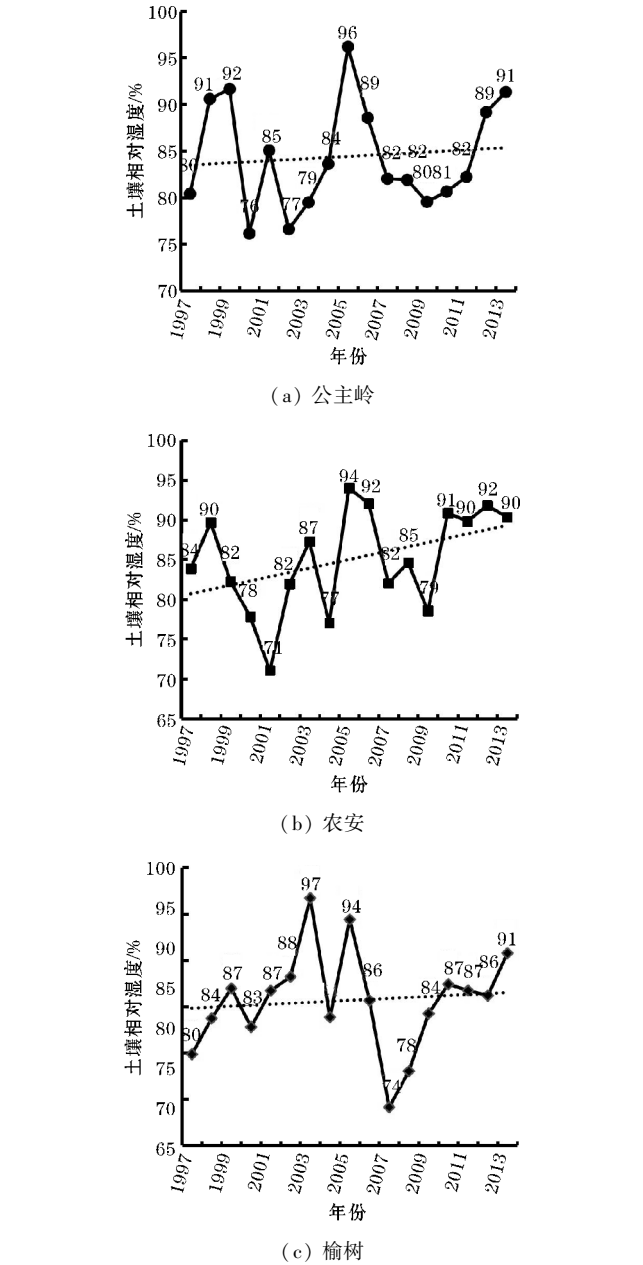


图2 3站春玉米发育期内年际平均土壤相对湿度

下的土壤相对湿度没有明显的规律可循,公主岭一站丰年值与歉年值相近,相差2%,但小于多年均值;农安站

及榆树站歉年的土壤相对湿度大于丰年及多年均值。

春玉米在 5 月中旬基本能够全部出苗,逐步进入苗期。在出苗-拔节期,公主岭站丰歉年与多年均值的土壤相对湿度仍然很相近,相差很小,差值在1%左右;农安站的条件与公主岭站相似,但可以看出丰年值最小,其次是多年均值,歉年值最大;榆树站丰年值、歉年值、多年均值相差最大,丰年值小于歉年值8%,歉年值小于多年均值4%。

在拔节-抽雄期,公主岭歉年的土壤相对湿度明显比丰年与多年均值小,相差近10%,而丰年的土壤相对湿度比多年均值要大2%;农安丰年与多年平均的土壤相对湿度相差较小,而歉年的值则比丰年和多年均值要稍微大一点,约3%;榆树的数据对比比较明显,丰年土壤相对湿度最大,多年均值次之,歉年最小,任意二者之间都相差超过5%。

7 月下旬春玉米进入抽雄阶段,在抽雄-乳熟期,公主岭的数据与上一时期的数据相近,歉年的土壤相对湿度明显的比丰年和多年均值小,相差10%左右,这一时期的干旱很可能会导致玉米减产;农安这一时期下,丰年的土壤相对湿度较大,歉年与多年均值相近;榆树 3 种条件下的资料相距仍旧明显,丰年的土壤相

对湿度大于多年均值,多年均值大于歉年,之间相隔 10% 左右。

在乳熟-成熟期,玉米已经接近成熟,公主岭的歉年的土壤相对湿度明显的比丰年和多年均值小,相差超过10%,而丰年的值略小于多年均值;农安的土壤水分条件在这一时期与公主岭相近,歉年值小于丰年与多年均值,且丰年的值略大于多年均值;榆树的土壤水分条件相对于前两个时期有所改变,此时丰年的土壤相对湿度与多年均值相近,但仍大于歉年值。

可以看出,春玉米各个时期对土壤相对湿度的要求各不相同,播种之后,一直到拔节期之前,丰年土壤水分略小于歉年,春玉米对土壤水分要求不高,在拔节之后水分需求才变大。此时,丰年土壤相对湿度一般情况下大于平年及歉年,特别是在榆树站抽雄-乳熟期,丰歉年相差很大。

#### 4 土壤水分对春玉米发育影响的分析

统计 1997-2012 年每一年玉米各个发育期的相对土壤湿度,与相对气象产量进行 Pearson 相关性分析,结果见表 2。

表 2 3 站各发育期土壤相对湿度与相对气象产量的相关性

		公主岭	农安	榆树
播种-出苗	Pearson 相关性	-0.017	-0.107	0.423
	显著性(双侧)	0.950	0.695	0.116
出苗-拔节	Pearson 相关性	-0.034	-0.054	0.199
	显著性(双侧)	0.899	0.843	0.478
拔节-抽雄	Pearson 相关性	0.342	-0.028	0.460
	显著性(双侧)	0.194	0.918	0.084
抽雄-乳熟	Pearson 相关性	0.693**	0.327	0.599*
	显著性(双侧)	0.003	0.217	0.018
乳熟-成熟	Pearson 相关性	0.343	0.546*	0.539*
	显著性(双侧)	0.194	0.029	0.038

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

从表 2 可以看出,公主岭土壤相对湿度和相对气象产量相关性最好的时期在抽雄-乳熟期,有 0.5 以上的相关系数,且在 0.01 水平(双侧)上显著相关,说明在这一时期春玉米对水分的需求旺盛,充足的土壤水分能使玉米增产;农安的相关性最好的时期在乳熟-成熟期,其相关系数也能达到 0.5 的水平;榆树在抽雄-乳熟期、乳熟-成熟期的相关系数均在 0.5 之上,并在 0.05 的水平上显著。可以看出春玉米生长前期土壤水分与玉米产量的相关性并不明显,一方面前期玉米根系发育不完善,吸收水分能力不强;另一方

面,可以认为此时玉米对水分的要求不大,这两点导致玉米发育期前期相关性并不好。所以,玉米发育对土壤水分的需求主要是在拔节之后,特别是在抽雄之后。

#### 5 基于土壤相对湿度的干旱指标分析

##### 5.1 各发育期土壤相对湿度与相对气象产量的回归分析

利用 3 站的多年发育期土壤相对湿度与相对气象产量进行回归分析,3 地土壤相对湿度与相对气象产量的回归方程如表 3 所示。



表 3 3 地土壤相对湿度与相对气象产量的回归方程

时期	公主岭	农安	榆树
播种-出苗期	$y = -0.0414R + 5.4433$	$y = -0.2036R + 20.003$	$y = 0.6724R - 56.804$
出苗-拔节期	$y = -0.0561R + 6.561$	$y = -0.1293R + 12.93$	$y = 0.3008R - 26.354$
拔节-抽雄期	$y = 0.5284R - 41.043$	$y = -0.055R + 6.2864$	$y = 0.5441R - 46.118$
抽雄-乳熟期	$y = 1.316R - 104.85$	$y = 0.6009R - 47.482$	$y = 0.6322R - 53.822$
乳熟-成熟期	$y = 0.7092R - 57.014$	$y = 0.9291R - 74.904$	$y = 0.7292R - 62.548$

其中,  $y$  为相对气象产量,  $R$  为各个时期的土壤相对湿度。

结合表 2 和表 3 分析, 只有榆树站整个发育期的土壤相对湿度和相对气象产量都有正的相关性, 相关系数、线性回归系数均为正值。

农业上一般以减产 10% 以下为轻旱, 10% ~ 20% 为中旱, 20% ~ 30% 为重旱, >30% 为特旱<sup>[16]</sup>。利用 3 地土壤相对湿度与相对气象产量的回归方程, 将相对气象产量  $y$  值分别设为 -30、-20、-10、0, 算出土壤相

对湿度  $R$  值, 对于拔节-抽雄期, 计算对相对气象产量表现为正相关的公主岭站与榆树站的土壤相对湿度  $R$  的平均值作为干旱指标; 抽雄-乳熟期、乳熟-成熟期算出 3 个站的平均土壤相对湿度作为干旱指标, 见表 4。

着重分析拔节-抽雄期、抽雄-乳熟期下的干旱指标, 并与干燥度干旱指标进行比较<sup>[8]</sup>。

5.2 干旱发生频率分析

表 4 各发育期土壤相对湿度干旱指标/%

时期	轻旱	中旱	重旱	特旱
拔节-抽雄	63 ~ 81	44 ~ 63	25 ~ 44	<25
抽雄-乳熟	68 ~ 81	51 ~ 68	38 ~ 51	<38
乳熟-成熟	69 ~ 82	57 ~ 69	44 ~ 57	<44

表 5 3 站各发育期干旱年份

	拔节-抽雄期			抽雄-乳熟期			乳熟-成熟期		
	公主岭	农安	榆树	公主岭	农安	榆树	公主岭	农安	榆树
轻旱	1997	1997	1997	2002	1997	1997	2002	1997	1997
	2002	1998	1998	2006	1999	1999	2003	1999	2006
	2003	1999	2000	2008	2000	2000	2007	2000	2007
	2004	2000	2004	2009	2004	2006	2008	2001	2008
		2001	2007	2011	2007	2007		2003	2011
		2002	2008		2009	2009		2004	
		2004						2007	
		2007							
中旱	2000	无	无	1997 2000	2001	无	2009	2009	无
重旱	无	无	无	无	无	无	无	无	无
特旱	无	无	无	无	无	无	无	无	无

根据表 4 的土壤相对湿度干旱指标, 得到 3 站各发育期干旱年份, 见表 5。

在拔节-抽雄期, 公主岭轻旱年份占 25.00%; 2000 年为中旱, 占 6.25%; 无重旱、特旱。农安有 8 年达到了轻旱指标, 占 50.00%; 无中旱、重旱、特旱。榆树轻旱年份占 37.5%; 无中旱、重旱、特旱。其中 1997、

2000、2004 年, 3 地均出现了不同程度的干旱。

在抽雄-乳熟期, 公主岭有 5 年出现了轻旱, 占 31.25%; 1997、2000 年为中旱, 占 12.50%; 无重旱、特旱。农安的轻旱年份达到了 6 年, 占 37.50%; 2001 年为中旱, 占 6.25%; 无重旱、特旱。榆树同样有 6 年出现了轻旱, 占 37.50%; 无中旱、重旱、特旱。1997、

2000、2009 年 3 地均出现了干旱的情况。在拔节-抽雄期和抽雄-乳熟期,公主岭 2000 年的干旱程度均比其他两地严重。

在乳熟-成熟期,公主岭有 4 年为轻旱,占 25.00%;2009 年为中旱,占 6.25%;无重旱、特旱。农安有 7 年出现轻旱,占 43.75%;2009 年为中旱,占 6.25%;无中旱、重旱、特旱。榆树轻旱年份为 5 年,占 31.25%;无中旱、重旱、特旱。其中 2007 年 3 站均表为轻旱,而 2009 年公主岭和农安两地均出现中旱。

总体来说,在 2002 年,公主岭的春玉米 3 个生长期均有轻旱的情况出现,农安则在 1997 年、1999 年、2000 年、2001 年、2004 年、2007 年中,3 个发育期均表现出不同程度的干旱,榆树在 1997、2007 这两年中,3 个生长期均存在干旱。在各发育期农安出现干旱年份均高于公主岭和榆树。3 站的干旱情况总体以轻旱为

主,少数年份有中旱出现,在 1997-2005 年春玉米生长期均没有达到重旱和特旱的程度。

## 6 基于土壤相对湿度的春玉米产量预报

### 6.1 公主岭站预报方程及结果

经计算公主岭站多元线性回归方程如方程(3)所示,曲线估计所有方程中为抽雄-乳熟期、S 模型下的方程拟合度最高,如方程(4)所示。拟合检验及预报年数据如表 6 所示。

$$y = 1173.133 - 169.204x_1 + 103.742x_2 - 46.235x_3 + 218.557x_4 + 23.830x_5$$

(3)

$$y = e^{10.324 - \frac{83.837}{x_4}}$$

(4)

表 6 公主岭站预报结果

年份	多元线性回归方程			曲线估计方程		
	实际产量	拟合(预报)产量	相对误差/%	实际产量	拟合(预报)产量	相对误差/%
	/kg/hm <sup>2</sup>	/kg/hm <sup>2</sup>		/kg/hm <sup>2</sup>	/kg/hm <sup>2</sup>	
1997	9252.8	8778.9	5.12	9252.8	8245.9	10.88
1998	13886	12992.1	6.44	13886	12079.8	13.01
1999	13944.1	13028.8	6.56	13944.1	12565.9	9.88
2000	6808.4	8150.5	19.71	6808.4	7601.1	11.64
2001	11254.7	12339.0	9.63	11254.7	11504.5	2.22
2002	12366.3	11272.4	8.85	12366.3	10309.4	16.63
2003	12354.5	12955.0	4.86	12354.5	11003.7	10.93
2004	10678.2	10816.4	1.29	10678.2	11515.4	7.84
2005	10776.1	12192.4	13.14	10776.1	12443.5	15.47
2006	10475	9001.5	14.07	10475	10345.7	1.23
2007	10147.8	10358.8	2.08	10147.8	10928.2	7.69
2008	11925.8	10161.9	14.79	11925.8	10331.3	13.37
2009	8040.1	9188.3	14.28	8040.1	10445.9	29.92
2010	10916.5	11148.7	2.13	10916.5	11377.8	4.23
2011	10062.9	10372.0	3.07	10062.9	10222.8	1.59
2012	10225.2	10287.1	0.61	10225.2	11030.4	7.87

多元线性回归方程平均拟合相对误差为 8.40%;试预报年的相对误差只有 0.61%。曲线估计方程平均拟合相对误差为 10.44%;试预报年相对误差为 7.87%。两个方程拟合和预报效果都比较好,可以用于预报产量。但多元线性回归方程更适用。

### 6.2 农安站预报方程及结果

经计算农安站多元线性回归方程如方程(5)所

示,曲线估计所有方程中为乳熟-成熟期、S 模型下的方程拟合度最高,如方程(6)所示。拟合检验及预报年数据如表 7 所示。

$$y = 1063.370 - 206.661x_1 + 250.058x_2 - 100.226x_3 + 77.452x_4 + 75.569x_5$$

(5)

$$y = e^{9.856 - \frac{66.840}{x_5}}$$

(6)

表 7 农安站预报结果

年份	多元线性回归方程			曲线估计方程		
	实际产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	拟合(预报)产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	相对误差/%	实际产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	拟合(预报)产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	相对误差/%
1997	7504.9	8082.4	7.69	7504.9	8390.6	11.80
1998	9796.7	9743.7	0.54	9796.7	9550.6	2.51
1999	8980.5	7157.1	20.30	8980.5	8393.4	6.54
2000	5904.6	6952.6	17.75	5904.6	7742.7	31.13
2001	8398.6	8985.2	6.98	8398.6	7552.0	10.08
2002	10447.5	10181.8	2.54	10447.5	8691.6	16.81
2003	10328	8554.8	17.17	10328	7986.2	22.67
2004	8633.7	7984.5	7.52	8633.7	7806.7	9.58
2005	9451.3	9706.7	2.70	9451.3	9989.4	5.69
2006	9442.9	9068.4	3.97	9442.9	9205.0	2.52
2007	8005.5	8296.8	3.64	8005.5	8382.2	4.70
2008	9516.9	9116.6	4.21	9516.9	8598.5	9.65
2009	6372.8	6470.5	1.53	6372.8	6628.1	4.01
2010	7142.1	8176.6	14.48	7142.1	8517.9	19.26
2011	7156	8602.6	20.21	7156	8501.3	18.80
2012	8666.8	9003.9	3.89	8666.8	9015.2	4.02

多元线性回归方程平均拟合相对误差为8.75%；试预报年相对误差仅为3.89%。曲线估计方程平均拟合相对误差为11.72%；试预报年相对误差为4.02%。两个方程拟合和预报效果较好,可以用于预报产量。但多元线性回归方程更适用。

6.3 榆树站预报方程及结果

经计算榆树站多元线性回归方程如方程(7)所

示,曲线估计所有方程中为抽雄-乳熟期、二次模型下的方程拟合度最高,如方程(8)所示。拟合检验及预报年数据如表 8 所示。

$$y = -2749.042 + 52.211x_1 + 21.934x_2 - 25.865x_3 + 53.449x_4 + 32.775x_5$$

(7)

$$y = -11307.634 + 401.149x_4 - 1.922x_4^2$$

(8)

表 8 榆树站预报结果

年份	多元线性回归方程			曲线估计方程		
	实际产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	拟合(预报)产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	相对误差/%	实际产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	拟合(预报)产量 /(kg/hm <sup>2</sup> )	相对误差/%
1997				7504.9	7658.7	4.06
1998	9641.3	9167.9	4.91	9796.7	9280.0	3.75
1999	8750.9	8886.0	1.54	8980.5	8338.2	4.72
2000	7372.4	8403.4	13.98	5904.6	8562.9	16.15
2001	9652.1	8921.2	7.57	8398.6	9011.7	6.63
2002	9135	9395.2	2.85	10447.5	9393.0	2.82
2003	9502.1	10054.3	5.81	10328	9539.1	0.39
2004	9377.5	8925.1	4.82	8633.7	8723.7	6.97
2006	9463.1	8547.3	9.68	9442.9	8006.6	15.39
2007	6323.0	7387.5	16.84	8005.5	7485.1	18.38
2008	8539.8	7596.7	11.04	9516.9	8877.3	3.95
2009	8035.6	7869.7	2.06	6372.8	7875.8	1.99
2010	9653.5	9460.7	2.00	7142.1	9502.1	1.57
2011	7878.7	8795.5	11.64	7156	8751.2	11.07
2012	8267.1	8464.9	2.39	8666.8	8697.1	5.20

榆树站1997年部分发育期资料缺失,但抽雄-乳熟期资料未缺失,故在1997年只对曲线估计方程进行历史拟合检验,而2005年资料缺失严重,故不对2005年数据进行历史拟合检验。

多元线性回归方程平均拟合相对误差为7.29%;试预报年相对误差仅为2.39%。曲线估计方程平均拟合相对误差为6.99%;试预报年相对误差为5.20%。两个方程拟合和预报效果较好,可以用于预报产量。

## 7 结束语

利用1997-2013年吉林省公主岭、农安榆树3站土壤重量含水率、田间持水量、春玉米产量等资料,通过数理统计等方法分析3地土壤相对湿度变化规律,讨论春玉米不同发育期对土壤水分的需求;运用1997-2012年春玉米产量及土壤相对湿度资料,计算以土壤相对湿度为基础的干旱指标;最后用不同统计学模式计算预报方程;得出以下结论:

(1)公主岭、农安、榆树3站多年平均土壤相对湿度均在84%~85%;3地土壤相对湿度均在7月有一个低值,在79%~84%;在8月有一个高值,在85%~86%;从年际变化来看,1997-2013年,3地的土壤相对湿度都有逐渐增大的趋势。

(2)对3地各发育期土壤相对湿度及丰歉年产量进行分析,发现春玉米各个时期对土壤相对湿度的要求各不相同,播种之后,一直到拔节期之前,丰年土壤水分略小于歉年,春玉米对土壤水分要求不高,在拔节之后水分需求才变大。此时,丰年土壤相对湿度一般情况下大于平年及歉年,特别是在榆树站抽雄-乳熟期,丰歉年相差很大。

(3)相对气象产量与3地土壤相对湿度 Pearson 相关性较好的有公主岭的抽雄-乳熟期,0~50 cm 土壤相对湿度的 Pearson 相关性达到0.693;农安的乳熟-成熟期0~50 cm 土壤相对湿度的 Pearson 相关性最高,为0.546;榆树的抽雄-乳熟期、乳熟-成熟期的土壤相对湿度的 Pearson 相关性分别为0.599、0.539。

(4)土壤相对湿度的干旱指标:拔节-抽雄期轻旱为63%~81%,中旱为44%~63%,重旱为25%~44%,特旱为<25%;抽雄-乳熟期轻旱为68%~81%,中旱为51%~68%,重旱为38%~51%,特旱为<38%;乳熟-成熟期轻旱为69%~82%,中旱为57%~69%,重旱为44%~57%,特旱为<44%。

(5)1997-2012年,3地的干旱频率为:拔节-抽雄期,公主岭25.00%、农安50.00%、榆树37.50%的年份为轻旱,公主岭6.25%的年份为中旱,无重旱、特旱;抽

雄-乳熟期,公主岭31.25%、农安37.50%、榆树37.50%的年份为轻旱,公主岭12.50%、农安6.25%的年份为中旱,无重旱、特旱;乳熟-成熟期,公主岭25.00%、农安43.75%、榆树31.25%的年份为轻旱,公主岭6.25%的年份为中旱,无重旱、特旱。

(6)多种实际产量预报方程中,公主岭和农安的多元线性回归方程预报效果最好,平均相对误差分别在8.40%、8.75%;榆树站多元线性回归方程、曲线估计方程都可使用,差别不大且各有优点,多元线性回归方程预报相对误差较小,为2.39%,拟合相对误差为7.29%,曲线估计方程平均拟合相对误差较小,为6.99%,预报相对误差为5.20%。

(7)关于吉林省春玉米土壤湿度的研究选用了3个站点作为代表,由于土壤水分资料难以获取,使用的资料较少。文中每个站点只选取了两个预报方程,今后的研究中可考虑其他预报模型,以期得到更加精确的预报结论。

## 参考文献:

- [1] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3021-3026.
- [2] 董树亭,张吉旺. 建立玉米现代产业技术体系, 加快玉米生产发展[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 18-20.
- [3] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1998: 253-256.
- [4] 张淑杰,张玉书,孙龙或,等. 东北地区玉米生育期干旱分布特征及其成因分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 350-357.
- [5] 董朝阳,刘志娟,杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 157-164.
- [6] 马旭凤,于涛,汪李宏,等. 苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1731-1736.
- [7] Nielsen D C, Vigil M F, Benjamin J G. The variable response of dryland corn yield to soil water content at planting[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2): 330-336.
- [8] Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI)[J]. Water Resour Manage, 2007, 21: 821-833.



- [9] 孙立堂,夏祥哲,张丽静,等. 基于学习向量量化神经网络的农业干旱综合指标分析[J]. 水利与建筑工程学报,2006,4(4):78-80.
- [10] Tsakiris G, Vangelis H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration[J]. European Water,2005(9/10):3-11.
- [11] Hongshuo Wang, Sergio M Vicente-serrano, Fulu Tao, et al. Monitoring Winter Wheat Drought Threat in Northern China using Multiple Climate-based Drought Indices and Soil Moisture during 2000-2013[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2016(228/229):1-12.
- [12] 李筱杨,朱克云,范广洲,等. 吉林省春玉米生长期干旱指标研究[J]. 四川农业大学学报,2017,35(1):1-9.
- [13] 陈永胜. 多元线性回归建模以及 MATLAB 和 SPSS 求解[J]. 绥化学院学报,2007(6):166-168.
- [14] 刘罗曼,张雪岩. 曲线估计方法应用[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版),2007(2):161-162.
- [15] 张晨琛,孔庆伟,朱锋. 基于 SPEI 及连续小波变换的吉林省干旱周期性特征分析[J]. 气象灾害防御,2017(3):43-48.
- [16] 吴东丽,王春乙,薛红喜,等. 华北地区冬小麦干旱受灾率多尺度分析[J]. 灾害学,2011,26(1):87-98.

## Analysis of Soil Moisture Regularity in Jilin Maize Growing Period

LI Xiao-yang<sup>1</sup>, ZHU Ke-yun<sup>1</sup>, CHENG Yi<sup>1</sup>, LI Jian-ping<sup>2</sup>

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610225, China; 2. Meteorological Bureau of Jilin Province, Changchun 130000, China)

**Abstract:** In order to study soil moisture regularity in maize growing period of Jilin, the soil moisture data which from 1997 to 2013 in the main planting areas of spring maize in Jilin Province (Gongzhuling, Nong'an and Yushu) were analyzed. The main conclusions are as follows: the relative soil moisture was 84% - 85%, and there was a rising trend year by year. The soil moisture requirements before the jointing of Spring maize was not high, and the demand for soil moisture gradually increased after jointing. It reaches the peak at milk maturity. Based on the relative soil moisture drought index, from 1997 to 2012, three sites had a dry frequency of about 30% in each period, but the degree of drought is not high. In the various forecasting equations of spring maize yield based on relative soil humidity, Gongzhuling and Nong'an were suitable for multiple linear regression equations, and the relative error of average fitting were 8.40% and 8.57% respectively, and the relative error of forecast were 0.61% and 3.89% respectively. The multiple linear regression equation and curve estimation equation can be used in Yushu, with the average fitting error of 7.29% and 6.99% respectively, and the forecast errors are 2.39% and 5.20% respectively. The above results can provide the basis of meteorological service for the cultivation of spring maize in Jilin Province.

**Keywords:** meteorology; agricultural weather; Jilin Province; spring maize; soil moisture; drought index; forecast equation