

东北地区玉米干旱时空特征分析

张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 蔡 福, 武晋雯

(中国气象局沈阳大气环境研究所, 中国 沈阳 110016)

摘 要: 利用 1961~2007 年东北地区 124 个气象站日气象数据, 采用彭曼-蒙特斯方程计算参考蒸散量、作物需水量及玉米水分亏缺指数, 按玉米生长的不同发育期确定不同干旱等级玉米水分亏缺干旱指标并计算了干旱频率, 并就其时空分布及其年际变化特征进行分析。结果表明: 东北地区玉米生长季内干旱呈现明显的季节性和区域性, 干旱发生频率较高的时段主要在苗期生长阶段, 其次是灌浆成熟期; 玉米苗期、拔节期、抽雄开花期、灌浆成熟期轻旱以上干旱频率都呈东北向西南逐渐增加的分布趋势, 区域性比较明显; 辽宁西部和南部、吉林西部和黑龙江西南部地区干旱发生频率较高, 是干旱的主发区, 玉米苗期、拔节期、抽雄开花期、灌浆成熟期干旱发生频率分别为 60%~96%, 30%~58%, 20%~40%, 30%~52%, 从年代际变化看, 20 世纪 60 年代到 80 年代干旱缓和, 从 90 年代初开始干旱呈增加的趋势, 90 年代中期以后干旱增加趋势明显, 特别是 2000~2004 年维持在一个较高的水平。由此可见, 东北地区近十年来干旱呈显著增加的趋势, 且干旱在各个发育阶段同时发生。

关键词: 玉米; 作物水分亏缺指数; 干旱频率; 时空特征分析

中图分类号: S161.3; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0231-06

玉米是东北地区的主栽作物之一, 种植面积较大, 占粮食作物的 1/3 左右, 近十几年来, 由于作物种植结构调整, 玉米播种面积和产量都呈逐年增加的趋势, 播种面积基本都在 500 万 hm^2 以上, 玉米总产占粮食总产 50% 以上。近年来干旱成为影响东北地区玉米生产最主要的灾害之一, 每个季节都会有干旱发生, 有时会连续发生, 近 20 多年来东北地区干旱化趋势十分明显^[1,2], 近十年来是干旱发生频次最多的时期^[3], 其主要原因是温度明显升高, 蒸散量迅速增加而降水增加有限, 致使东北地区湿润程度降低, 气候干燥化明显^[4]。2000 年是东北地区的重灾年, 受旱灾影响东北地区粮食单产较前五年平均值减少 20%, 粮食总产减少 23%。这充分表明了干旱对玉米生产影响的严重性。

干旱监测和预测常用的手段是构造干旱指标。关于干旱和干旱指标前人已有大量的研究, 但由于干旱的成因异常复杂, 影响因素众多, 迄今为止还没有找到一种普遍适用各种用途、适用于不同地区、不同时间段的干旱指标体系。归纳各种干旱指标, 大致可分为 4 类, 即气象干旱指标^[5~7]、水文干旱指标、农业干旱指标、社会经济干旱指标。农业干旱指标是对农业干旱评价的一个标准, 依据这个标准可对干旱发生的强度作出定量评价。陈晓艺^[8]以累积

湿润指数作为农业干旱指标分析了农业旱涝灾害特点。张艳红^[9]以作物水分亏缺指数为农业干旱指标分析了其在农业干旱中的实用性, 认为该指标能较好地反映作物水分亏缺与农业干旱情况; 黄晚华^[10]以作物水分亏缺指数分析了湖南省玉米季节性干旱时空特征, 东北地区的玉米生育期间的气象条件与南方的气象条件有很大差异, 因此用南方的指标对东北地区进行评估不够合理。因此本文尝试用作物水分亏缺指数作为研究玉米干旱指标, 旨在分析东北地区玉米季节性干旱的时空分布特征和规律, 揭示玉米生长季内水分亏缺状况, 为东北地区玉米生产合理布局和防旱避灾提供科学依据。

1 资料来源与计算方法

1.1 数据来源

本研究所用资料为东北地区 124 站 1961~2007 年的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、日水汽压、日平均风速资料, 1981~2007 年 68 站生长季每旬逢 8 日土壤湿度资料。

地理信息资料使用的是全国 1:25 万 500 m $\times$ 500 m DEM 数据, 借助 GIS 平台生成东北地区 1 km $\times$ 1 km 网格的经度、纬度、海拔高度地形因子数据库。

收稿日期: 2010-06-09

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2008-2); 科技部农业科技成果转化资金项目 (05EFN217400412); 中国气象局气象新技术推广项目 (CMATG2006M14); 中国气象局沈阳大气环境研究所公益性专项 (220603022000813、SYKYYW200904)

作者简介: 张淑杰 (1971—), 女, 黑龙江巴彦县人, 副研究员, 硕士, 主要从事农业气象和遥感应用研究。E-mail: zsj712000@yahoo.com.cn。

通讯作者: 张玉书 (1963—), 女, 辽宁黑山县人, 正研级高工, 主要从事农业气象和遥感应用研究。E-mail: zhangyushu@163.com。

1.2 作物水分亏缺指数(CWDI)计算方法

作物水分亏缺指数是表征作物水分亏缺程度的指标之一。根据作物水分亏缺指数(CWDI)的定义和计算方法^[11,12],采用公式:

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4}$$

式中, $CWDI(\%)$ 为某时段累积水分亏缺指数; $CWDI_j$ 为第 j 时间单位(过去 1 至 10 d)的水分亏缺指数(%); $CWDI_{j-1}$ 为第 $j+1$ 时间单位(过去 11 至 20 d)的水分亏缺指数(%); $CWDI_{j-2}$ 为第 $j+2$ 时间单位(过去 21 至 30 d)的水分亏缺指数(%); $CWDI_{j-3}$ 为第 $j+3$ 时间单位(再推 10 d)的水分亏缺指数(%); $CWDI_{j-4}$ 为第 $j+4$ 时间单位(再推 10 d)的水分亏缺指数(%); a 、 b 、 c 、 d 、 e 为权重系数, $a = 0.3$; $b = 0.25$; $c = 0.2$; $d = 0.15$; $e = 0.1$ 。

某时间单位水分亏缺实况值计算式如下:

$$CWDI_j = \begin{cases} \left(1 - \frac{P_j}{ET_c}\right) \times 100\% & ET_c \geq P_j \\ 0 & ET_c < P_j \end{cases}$$

式中, P_j 为 j 时段内(10 d)的累积降水量, ET_c 为 10 d 的累积作物需水量。

$$ET_c = k_c \times ET_0$$

式中, ET_0 为某时段的作物参考蒸散量; k_c 为玉米某时段的作物系数。

这里选用彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)模型计算参考蒸散量,其计算式如下:

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中, R_n 为冠层表面净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; e_a 为饱和水汽压(kPa); e_d 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); γ 为干湿球常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 为 2 m 高处的风速(m/s); T 为平均气温($^\circ\text{C}$)。

东北地区作物系数的确定方法见文献[13], R_n 和 G 的计算方法见参考文献[14]。

1.3 干旱频率的计算方法

根据文中确定的作物水分亏缺指标,按不同发育期计算干旱发生频率,即某站某一生育期发生干旱的年数与统计资料的总年数之比。

$$F_i = N/n \times 100\%$$

式中, N 为某时段干旱出现的年数, n 为统计总年

数。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺指数的确定

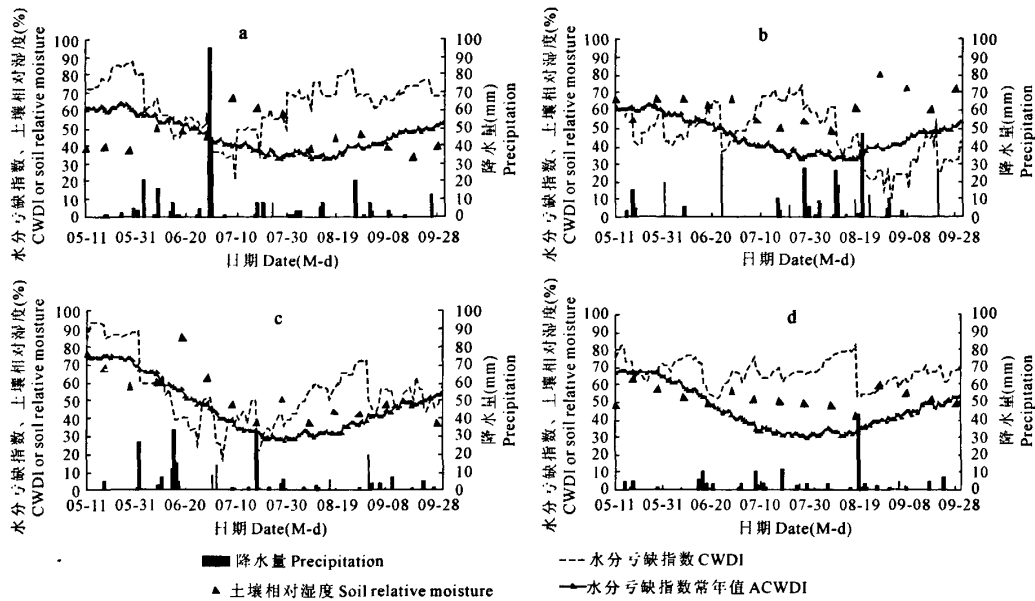
利用多年的资料计算了逐日的参考蒸散量,然后累计计算 10 d 的玉米水分亏缺指数,再以 10 d 为时间单位按照不同的权重系数计算了 50 d 的玉米水分亏缺指数。根据历史干旱发生的情况,这里选取了代表不同发育期干旱发生情况的年份 1989、1997、1999、2000、2001、2004、2006 年作为指标确定年份,选取同期每旬逢 8 日有土壤湿度观测资料的站点作为确定站点,同时对照干旱灾害大典^[15-17],主要确定了玉米生长关键期和其他生育期干旱指标(见表 1),这里的关键期包括拔节到抽雄开花结束。通过对实际资料的处理分析按苗期、拔节孕穗期、抽雄吐丝期和灌浆成熟期 4 个生育期选择能够代表 4 个生育阶段干旱情况的辽宁朝阳、吉林白城和黑龙江泰来 3 站作图(图 1)。

表 1 玉米水分亏缺指标

Table 1 Maize crop water deficit index(CWDI)

等级 Grade	干旱程度 Drought stress	水分亏缺指数(%) CWDI	
		其他发育期 No key growth period	关键期 Key growth period
0	无旱 No drought	$CWDI \leq 40$	$CWDI \leq 35$
1	轻旱 Light drought	$40 < CWDI \leq 55$	$35 < CWDI \leq 50$
2	中旱 Moderate drought	$55 < CWDI \leq 65$	$50 < CWDI \leq 60$
3	重旱 Severe drought	$65 < CWDI \leq 75$	$60 < CWDI \leq 70$
4	特旱 Extreme drought	$CWDI > 75$	$CWDI > 70$

从图 1 可以看出,50 d 累计水分亏缺指数各年波动幅度较大,1971~2000 年平均值呈单谷型变化,在玉米生长的拔节孕穗期、抽穗吐丝期值低,苗期和灌浆成熟期高,说明拔节孕穗期、抽穗吐丝期干旱发生频率低于苗期和灌浆成熟期。辽宁朝阳 2006 年 5 月(苗期)旱情较重,以后轻度干旱持续,7 月中旬开始再次出现严重旱情,并持续发展。2000 年 5 月下旬开始出现旱情,以后持续发展,到 7 月上中旬(拔节孕穗期)达到严重干旱,并持续到 8 月上旬。吉林白城 1989 年拔节开始一直到成熟干旱持续。黑龙江泰来 2001 年从苗期到成熟期旱情持续。以上各站干旱发生时间、强度均与农业气象观测上报灾害以及统计上报资料基本相符。



注:a.2006年辽宁朝阳;b.2000年辽宁朝阳;c.1989年吉林白城;d.2001年黑龙江泰来
a. Liaoning Chaoyang in 2006; b. Liaoning Chaoyang in 2000; c. Jilin Baicheng in 1989; d. Heilongjiang Tailai 2001

图1 作物水分亏缺指数、降水量、土壤相对湿度和水分亏缺指数常年值(1971~2000年)变化曲线

Fig.1 Temporal variation of CWDI, precipitation, soil relative moisture and average CWDI(1971~2000) from May to September

2.2 玉米生长季内水分供需状况分析

4~9月是东北地区作物的生长季节,玉米播种由南到北从4月中旬开始到5月上旬结束,5月上旬末开始进入苗期,7月到8月上旬是东北地区的雨季,同时也正是大田作物玉米的需水关键期,因此尽管作物生长的非需水关键期降水量小于作物需水量,但大部时间水分依然能够满足玉米生长发育的需要。

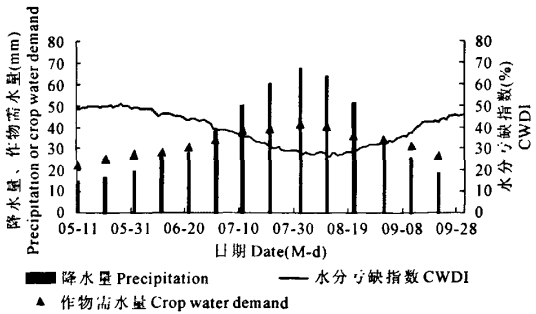


图2 辽宁省玉米生育期降水量、作物需水量和50 d累计水分亏缺指数的变化

Table 2 Temporal variation of precipitation, crop water demand and crop water deficit index(CWDI)(accumulation in 50 days) in growth period of maize in Liaoning Province

图2给出了辽宁省玉米生育期内旬降水量、旬

需水量和水分亏缺指数的变化情况,从全省多年平均状况看,玉米旬需水量和降水量都呈先增加后减少的趋势变化,50 d累计水分亏缺指数与其变化趋势正好相反。在玉米生长苗期和成熟期水分呈亏缺状态,干旱发生的频率较高,由于苗期短期干旱对作物蹲苗有利,在玉米成熟后期干旱对其快速脱水比较有利,因此在一般干旱发生的情况下,苗期和成熟后期的干旱对玉米产量形成影响不大。在玉米生长需水关键期内,也就是7月到8月上旬,辽宁省的降水量大于作物需水量,水分有盈余,干旱发生频率低,但如发生干旱对产量的影响较大。2009年玉米需水关键期内辽宁省发生了严重干旱,期间辽西大部地区降水量较常年偏少5~8成,期间伴随高温天气,干旱持续发展,由于正值玉米拔节~抽穗开花期。受旱严重地区作物生长停滞,植株矮小,雄穗抽出无粉,或没有吐丝,甚至大面积枯黄死亡;旱情较轻的地区也出现打蔫、果穗小、粒小、粒少的现象,造成减产。

2.3 玉米干旱频率的空间分布特征

玉米苗期(出苗~拔节)、拔节孕穗期、抽雄吐丝期和灌浆成熟期干旱(指轻旱以上,下同)频率分布如图3所示。4个生育阶段干旱频率都呈东北向西南逐渐增加的趋势,辽宁西部和南部、吉林西部、黑龙江西南部发生干旱频率较高,是干旱的主发

区,干旱频率苗期 > 灌浆成熟期 > 拔节孕穗期 > 抽雄开花期。

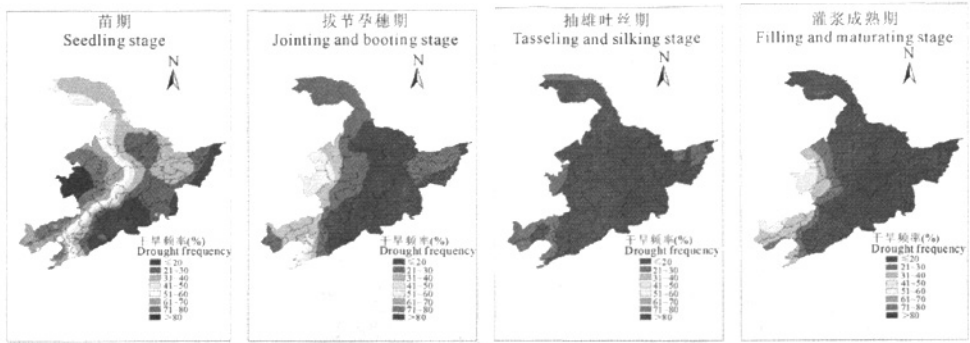


图 3 东北地区玉米不同生育期干旱频率空间分布

Fig.3 Spatial distributions of drought frequency in growth period of maize in Northeast China

东北地区苗期(5月中旬~6月中旬)干旱频率较高,东北全区各地变化为2%~96%,平均为47%。辽西和辽南、吉林西部和黑龙江西南部地区干旱频率为60%~96%,其中吉林的白城地区干旱频率最高,在80%以上,辽宁朝阳、阜新、营口,吉林松源和黑龙江齐齐哈尔南部、大庆地区干旱频率为70%~80%。拔节孕穗期(6月下旬~7月上半月)干旱频率明显低于苗期干旱频率,都在58%以下,辽宁西部、南部及中部的部分地区,吉林西部和黑龙江西南部地区干旱频率为30%~58%。抽雄吐丝期(7月下旬到8月上旬)干旱频率小于拔节孕穗期干旱频率,在40%以下,辽宁大部、吉林西部地区在20%以上。灌浆成熟期(8月中旬到9月末)干旱频率与拔节孕穗期干旱频率相当,在52%以下,辽宁大部、吉林西部在30%以上。

2.4 玉米干旱频率的年际变化特征

按玉米苗期、拔节孕穗期和抽雄吐丝期分别计算了东北三省各年的50 d累计水分亏缺指数的平均值(图4),对3个生育期来讲,大部时间辽宁的水分亏缺指数大于吉林和黑龙江的水分亏缺指数,说明辽宁干旱的发生频率大于吉林和黑龙江两省。

玉米苗期东北三省的波动情况基本相同,在20世纪60年代初到70年代初50 d累计水分亏缺指数值下降明显,干旱有减轻的趋势,80年代维持在一个水平呈略下降的趋势,到90年代初又开始上升,到2001~2007年上升趋势明显,干旱呈明显加重趋势。1963、1996、2001、2003年和2004年数值较高,也是苗期干旱比较重的年份。

玉米拔节孕穗期东北三省的波动情况与苗期基本相同,从20世纪60年代初到80年代末呈下降趋

势,干旱缓和,90年代初出现转折,呈持续上升趋势,干旱呈加重趋势,1999年到2004年维持在一个较高的水平。1982、1997、2000年数值较高,正是东北地区夏旱比较严重的年份。

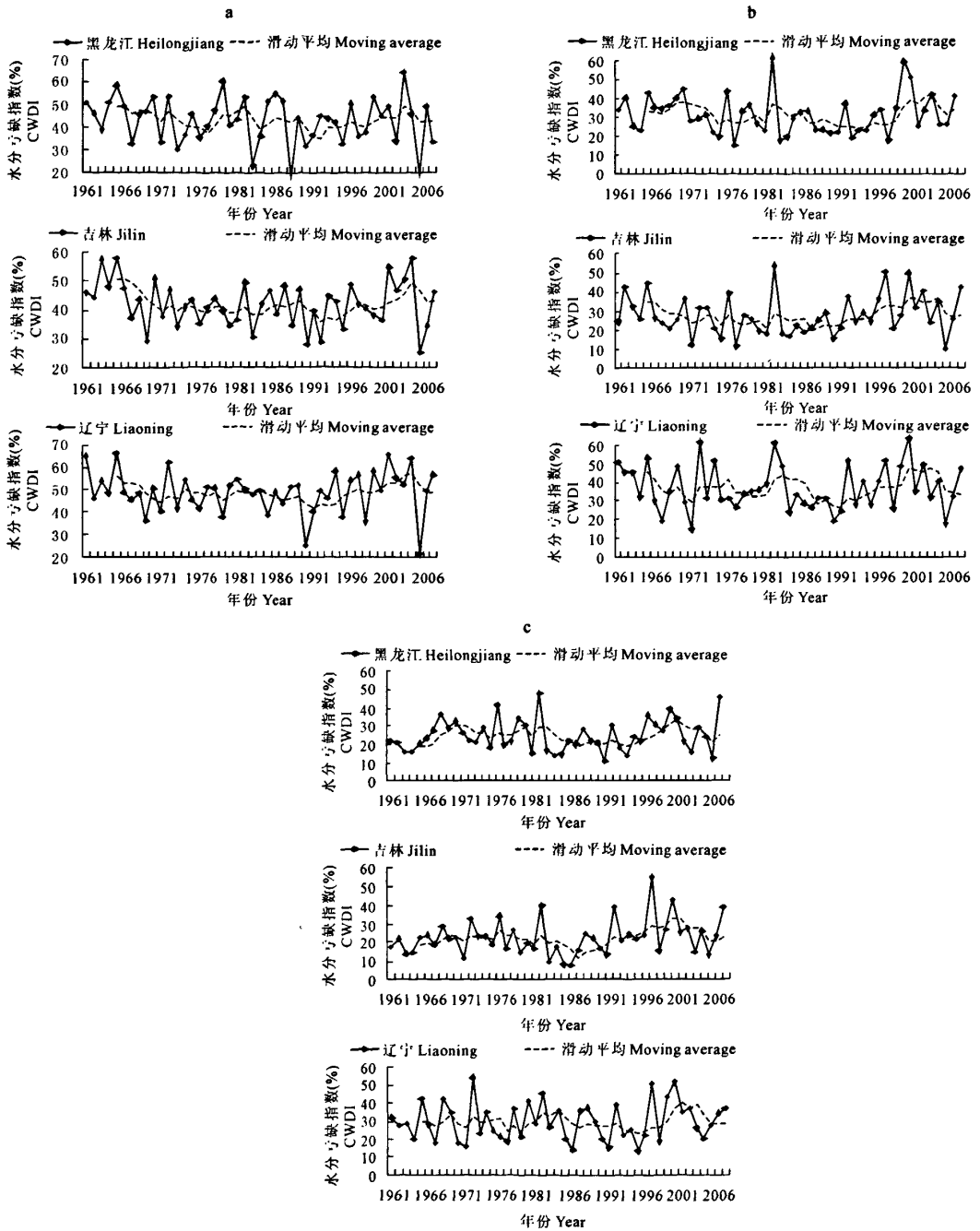
玉米抽雄吐丝期东北三省的波动情况与前两个发育期不同,呈波动性变化,20世纪60年代到80年代变化趋势不明显,从80年代中期后,呈上升趋势,干旱开始加重,90年代中期开始上升趋势明显,干旱加重趋势明显,1982、1997、2000年和2007年数值较高,正是东北地区抽雄开花期干旱比较重的年份。

从对3个生育阶段水分亏缺指数的分析,可以发现东北地区从90年代初期干旱呈增加的趋势,90年代中期以后干旱增加趋势明显,特别是2000年到2004年维持在一个较高的水平,由此可见,东北地区近10年来干旱呈显著增加的趋势,且干旱在各个生育阶段同时发生。

3 结论与讨论

本文基于玉米水分亏缺指数对玉米生育期间的需水状况,干旱频率时空分布及其玉米水分亏缺指数年际变化情况进行了分析,得出以下主要结论:

1) 从玉米生长的不同生育阶段看,阶段性比较明显,苗期和灌浆成熟期水分多呈亏缺状态,干旱发生的频率较高,由于苗期短期干旱对作物蹲苗有利,在玉米成熟后期干旱对其快速脱水比较有利,因此在一般干旱发生的情况下,苗期和成熟后期的干旱对玉米产量形成影响不大。在玉米生长需水关键期内,也就是7月到8月上旬,辽宁省的降水量大于作物需水量,水分有盈余,干旱发生频率低,但如果发生干旱对产量的影响较大。



注:a.苗期;b.拔节孕穗期;c.抽雄吐丝期

Note: a. Seedling stage; b. Jointing and booting stages; c. Tasseling and silking stage

图 4 1961~2007 年东北地区玉米不同生育期水分亏缺指数 5 年滑动平均变化

Fig. 4 Temporal variation of CWDI moving average in growth period of maize in Northeast China from 1961 to 2007

2) 玉米生长的 4 个生育阶段苗期、拔节孕穗期、抽雄吐丝期、灌浆成熟期轻度以上干旱频率分布都呈东北向西南逐渐增加的趋势,区域性比较明显,

辽宁西部和南部、吉林西部、黑龙江西南部发生干旱频率较高,是干旱的主发区,干旱频率苗期 > 灌浆成熟期 > 拔节孕穗期 > 抽雄吐丝期。东北地区苗期干

旱发生频率较高,吉林的白城地区干旱频率在 80% 以上,辽宁朝阳、阜新、营口,吉林松源和黑龙江齐齐哈尔南部、大庆地区干旱频率为 70% ~ 80% 之间。拔节孕穗期干旱频率明显低于苗期干旱频率,辽宁西部、南部及中部的部分地区,吉林西部和黑龙江西南部地区干旱频率为 30% ~ 58%。抽雄吐丝期干旱频率小于拔节孕穗期干旱频率,辽宁大部、吉林西部地区在 20% ~ 40%。灌浆成熟期干旱频率与拔节孕穗期干旱频率相当,辽宁大部、吉林西部为 30% ~ 52%。

3) 对玉米生长各个生育阶段来讲,东北地区水分亏缺指数波动情况基本相同,20 世纪 60 年代到 80 年代干旱缓和,从 90 年代初期干旱呈增加的趋势,90 年代中期以后干旱增加趋势明显,特别是 2000 ~ 2004 年维持在一个较高的水平,由此可见,东北地区近十年来干旱呈显著增加的趋势,且干旱在各个生育阶段同时发生。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16—18.
- [2] 谢安,孙永罡,白人海,等. 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.
- [3] 魏凤英,张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 1—7.
- [4] 吴正方,靳英华,刘吉平,等. 东北地区植被分布全球气候变化区域响应[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 564—570.
- [5] 邹旭恺,张强,王有民,等. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测[J]. 气象, 2005, 31(7): 6—9.
- [6] 马柱国,符琮斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 737—746.
- [7] 张强,高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务[J]. 科技导报, 2004, 7: 21—24.
- [8] 陈晓艺,马晓群,孙秀邦,等. 安徽省冬小麦发育期农业干旱发生风险分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 472—476.
- [9] 张艳红,吕厚荃,李森,等. 作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J]. 气象科技, 2008, 36(5): 596—600.
- [10] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 28—34.
- [11] 刘宏谊,马鹏里,杨兴国,等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 23(1): 39—44.
- [12] 陈凤,蔡焕杰,土健. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 2(5): 191—193.
- [13] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰. 辽宁地区玉米作物系数的确定[J]. 中国农学通报, 2004, 20(3): 246—248.
- [14] 杜尧东,刘作新,张运福. 参考作物蒸散计算方法及其评价[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57—61.
- [15] 温克刚,李波,孟庆楠,等. 中国气象灾害大典(辽宁)[M]. 北京:气象出版社, 2005: 92—145.
- [16] 温克刚,李黄,毛耀顺,等. 中国气象灾害大典(吉林)[M]. 北京:气象出版社, 2005: 160—210.
- [17] 温克刚,孙永罡,宋英华. 中国气象灾害大典(黑龙江)[M]. 北京:气象出版社, 2007: 151—203.

Analysis of spatio-temporal characteristics of drought for maize in Northeast China

ZHANG Shu-jie, ZHANG Yu-shu, JI Rui-peng, CAI Fu, WU Jin-wen

(Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China)

Abstract: Based on the observation data of temperature, precipitation, wind, vapor pressure and sunshine hours collected from 124 weather stations during 1961 ~ 2007 and the Penman-Montieth equation, the potential evapotranspiration (ET_0) and Maize water requirement (ET_C) were calculated, the maize crop water deficit index (CWDI) of different classes of drought were determined and the frequencies of different classes of drought in Northeast China were calculated. The results showed that there were significant seasonal and spatial distribution characteristics. Drought occurred in high frequency at the stage of seedling, secondly, filling-maturity stage, and the occurring frequency of slight drought or above in various growth stages of maize showed an increasing trend from northeast to southwest. In the major dry areas, the drought occurring frequency in seedling, jointing-booting, tasseling-silking and filling-maturity stages was 60% ~ 96%, 30% ~ 58%, 20% ~ 40% and 30% ~ 52%. For inter-decade change characteristics, drought fluctuation was moderate in the 1960 ~ 1980 s, while it turned an increasing trend since the early 1990 s, especially after the mid 1990 s, and it maintained at a high level in 2000 ~ 2004. Therefore, drought increased significantly in Northeast China in the recent 10 years and it occurred in each stage of maize development.

Keywords: maize; crop water deficit index(CWDI); drought frequency; analysis of spatio-temporal characteristics