

# 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

黄晚华<sup>1,2</sup>, 杨晓光<sup>1\*</sup>, 曲辉辉<sup>1</sup>, 冯利平<sup>1</sup>, 黄彬香<sup>1</sup>,

王靖<sup>1</sup>, 施生锦<sup>1</sup>, 武永峰<sup>3</sup>, 张晓煜<sup>1</sup>, 肖小平<sup>4</sup>, 杨光立<sup>4</sup>, 李茂松<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 湖南省气象科学研究所, 长沙 410007;

3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 湖南省农业科学院土壤与肥料研究所, 长沙 410125)

**摘要:** 季节性干旱是影响湖南春玉米生产最突出的气象灾害, 分析其时空分布特征和发生的规律, 可为湖南春玉米生产的发展和合理布局提供技术支持。该文基于湖南省 96 个气象站点 1961—2007 年地面气象观测资料, 采用 FAO 于 1998 年推荐的 Penman-Monteith 方法计算了参考作物蒸散量、玉米的作物需水量。考虑盈余降水对水分亏缺指数的影响, 修正了的水分亏缺指数计算方法, 并依据玉米的水分亏缺指数, 分析了季节性干旱发生频率的时空特征。并选取不同区域典型站点分析了水分亏缺指数年代际变化特征。结果表明, 湖南春玉米生长季节内干旱呈现明显的季节性和空间区域分布特征: 干旱频率较高的时段主要在玉米抽雄—吐丝阶段及其后的生育阶段, 且随生育期后移干旱频率明显增加, 以轻旱程度为主。空间分布特征是以湘中南的衡阳及周边一带干旱频率最高, 其次为湘东、湘北一带次高, 湘西等地春玉米干旱频率低。各年代之间比较, 以 20 世纪 80 年代干旱较严重, 90 年代干旱相对较轻。

**关键词:** 作物, 干旱, 水资源, 作物水分亏缺指数, 作物需水量, 时空特征, 春玉米

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.006

中图分类号: S165+.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0028-07

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.

Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Qu Huihui, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 28—34. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

玉米是湖南省仅次于水稻的第二大粮食作物, 随着农作物结构调整和市场需求增加, 玉米生产缺口很大。目前播种面积达 320 km<sup>2</sup>, 总产达 140 万 t。按照目前的需求 500 万 t, 至少要在此基础上再增加 900 km<sup>2</sup>, 才能满足本省需要<sup>[1]</sup>。同时玉米为 C<sub>4</sub> 作物, 光合效率高, 单位面积产量普遍高于其它粮食作物<sup>[2]</sup>。玉米和水稻进行水旱轮作, 能够有效改变土壤结构和提高肥力, 促进增产和保护农业生态环境<sup>[3]</sup>。总之, 湖南省发展玉米种植对保证粮食安全、平衡粮食结构和实现农业可持续发展意义重大。

湖南省玉米种植以春玉米为主, 占全部种植面积的 85% 左右。湖南省大部分地区春玉米在 3 月中下旬播种, 7 月中下旬成熟收获。由于湖南省大部分地区雨季通常在 6 月下旬至 7 月上旬结束<sup>[4]</sup>, 此时正值玉米抽雄—灌浆阶

段, 这一阶段的需水量最大<sup>[2]</sup>。如果雨季结束比常年偏早或降水量偏少, 就会出现季节性干旱, 影响玉米产量<sup>[4-6]</sup>。由此可见, 季节性干旱是制约湖南玉米生长发育和产量形成重要因素。

系统分析湖南省春玉米季节性干旱的时空分布特征、发生规律及其对玉米生产可能影响, 可为湖南春玉米生产的发展和合理布局提供一定的理论基础。目前用于分析农业干旱的指标较多, 作物水分亏缺指数 (CWDI) 是表征作物水分亏缺程度的指标之一, 作物水分亏缺为作物需水量与实际供水量之差, 以百分率 (%) 表示。作物缺水指数较好地反映了土壤、植物和气象三方面因素的综合影响, 比较真实地反映出作物水分亏缺状况, 是常用的作物干旱诊断指标之一<sup>[7]</sup>。前人利用作物需水量或蒸散量做了较多基础性工作<sup>[8-14]</sup>, 也有利用不同干旱指标分析干旱特征<sup>[15-17]</sup>, 但以上研究多以北方地区为主, 利用作物水分亏缺指数分析作物干旱特征还未见报道。本文选取作物水分亏缺指数作为玉米干旱指标, 旨在分析湖南省春玉米干旱的时空分布特征和规律, 揭示春玉米生长季内逐旬的作物水分亏缺状况, 为湖南省玉米生产合理布局和防旱避灾提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

气象资料选取湖南省 96 个气象站点 1961—2007 年

收稿日期: 2009-03-02 修订日期: 2009-05-13

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAD04B07); 公益性行业 (农业) 科研专项 (200803028); 国家科技基础性工作专项 (2007FY120100)。

作者简介: 黄晚华 (1978—), 男, 湖南邵东人, 工程师, 主要从事农业气象科研工作。长沙 湖南省气象科学研究所, 410007。

Email: huangwh2008@163.com

\*通信作者: 杨晓光, 女, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事农业气候资源利用领域研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: yangxg@cau.edu.cn

逐日观测资料, 包括: 降水量、最高气温、最低气温、平均气温、日照时数、风速、相对湿度、水汽压等。春玉米生育期资料来自 2004—2005 年在湖南各地试验的田间试验资料。

## 1.2 作物水分亏缺指数计算方法

根据作物水分亏缺指数 ( $CWDI$ ) 的定义和计算方法<sup>[9-10,18]</sup>, 采用下式

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4} \quad (1)$$

式中:  $CWDI$ ——玉米生育期按旬时段计算的累计水分亏缺指数, 分别计算 3 月下旬—7 月下旬共 13 旬, 由于作物干旱主要体现为累积效应, 水分亏缺指数一般计算连续 5 旬的作物亏缺指数;  $CWDI_i$ 、 $CWDI_{i-1}$ 、 $CWDI_{i-2}$ 、 $CWDI_{i-3}$ 、 $CWDI_{i-4}$ ——该旬及前 4 旬水分亏缺指数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ ——对应旬的累计权重系数, 一般  $a$  取值为 0.3;  $b$  取值为 0.25;  $c$  取值为 0.2;  $d$  取值为 0.15;  $e$  取值为 0.1。

考虑到水分满足 (盈余) 时段时, 对文献[18]计算水分亏缺指数做了如下改进, 为

$$CWDI_i = \begin{cases} (ET_c - P_i)/ET_c \times 100\% & ET_c \geq P_i \\ 0 & ET_c < P_i \text{ 且 } P_i \leq 50 \\ K_i \times 100\% & P_i > 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $CWDI_i$ ——第  $i$  旬玉米水分亏缺指数;  $ET_c$ ——玉米需水量, mm;  $P_i$ ——第  $i$  旬降水量, mm;  $K_i$ ——降水量远大于需水量时的水分盈余系数; 分 3 种情况: 当玉米需水量 ( $ET_c$ ) 大于降水量 ( $P_i$ ), 玉米发生水分亏缺; 当玉米需水量 ( $ET_c$ ) 小于降水量 ( $P_i$ ) 时, 且降水量不大时 ( $P_i$  小于 50 mm) 视为玉米水分不亏缺, 即  $CWDI_i=0$ ; 降水量 ( $P_i$ ) 远大于玉米需水量 (湖南地区玉米平均旬需水量约为 50 mm) 时, 参考已有的研究结果<sup>[19-20]</sup>, 考虑有效降水和水分盈余, 这里分 3 个量级计算盈余的不同效应。即

$$K_i = \begin{cases} (\overline{ET_i} - P_i)/\overline{ET_i} & 50 < P_i \leq 100 \\ -P_i/(2\overline{ET_i}) & 100 < P_i \leq 150 \\ -1.5 & P_i > 150 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\overline{ET_i}$ ——春玉米旬作物需水量基数, 在湖南一般取 50 mm; 当降水量在 50~100 mm 时, 即旬降水量大于  $\overline{ET_i}$  且小于 2 倍  $\overline{ET_i}$  时, 盈余效果好; 当降水量在 100~150 mm 时, 即旬降水量大于 2 倍  $\overline{ET_i}$  时, 盈余能力减弱 (仅为降水量在 50~100 mm 时的一半); 降水大于 150 mm 时, 即旬降水大于 3 倍  $\overline{ET_i}$  时, 多余降水基本成为径流流失, 水分盈余稳定,  $K_i=-1.5$ 。

式 (2) 中  $ET_c$  由参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ) 与玉米的作物系数 ( $k_c$ ) 相乘得到, 即

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

式中  $ET_0$ ——参考作物蒸散量, mm/d; 采用 FAO (1998) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算<sup>[11-13,18]</sup>。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + 900\gamma \cdot u_2(e_s - e_a)/(T + 273)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

式中:  $R_n$ ——地表净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $G$ ——土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $T$ ——日平均气温, °C;  $u_2$ ——2 m 高处风速, m/s;  $e_s$ ——饱和水汽压, kPa;  $e_a$ ——实际水汽压, kPa;  $\Delta$ ——饱和水汽压曲线斜率, kPa/°C;  $\gamma$ ——干湿表常数, kPa/°C。其中  $R_n$ 、 $\Delta$  和  $\gamma$  可利用公式计算, 其他项目为气象站观测资料<sup>[18]</sup>。

根据已有资料和田间试验结果<sup>[21]</sup>, 确定了湖南各地春玉米平均生育期, 见表 1。综合 FAO 推荐的  $k_c$  和中国主要农作物需水量等值线图协作组研究结果<sup>[8]</sup>, 确定每旬  $k_c$  值。需在前 4 旬的  $CWDI_i$  的基础上确定第 5 旬的  $CWDI$  值, 设定玉米播种及播种前期的 2 月中旬到 3 月中旬裸地的  $k_c$  为 0, 具体各旬对应  $k_c$  见表 1。

表 1 湖南省春玉米生育期及作物系数

Table 1 Time of growth stages and crop coefficients of spring maize in Hunan province

	3 月			4 月			5 月			6 月			7 月		
	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬		
生育期	出苗	三叶		七叶		拔节		抽雄-吐丝		乳熟		成熟			
作物系数( $k_c$ )	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	1.2	1.1	1	0.9	0.8		

注: 表中  $k_c$  来源于参考文献[8]。

## 1.3 玉米干旱指标分级及干旱频率计算

根据农业干旱指标分级<sup>[18]</sup>, 在 5 月下旬到 6 月下旬, 即玉米抽雄—吐丝期前后分级标准为,  $10\% < CWDI \leq 20\%$  为轻旱,  $20\% < CWDI \leq 30\%$  为中旱,  $30\% < CWDI \leq 40\%$  为重旱,  $CWDI > 40\%$  为特旱; 其它生育时段分级标准为:  $15\% < CWDI \leq 25\%$  为轻旱、 $25\% < CWDI \leq 35\%$  为中旱、 $35\% < CWDI \leq 50\%$  为重旱,  $CWDI > 50\%$  为特旱。

依据干旱分级标准, 按旬计算不同生育期干旱发生频率 ( $F_i$ ), 即某站第  $i$  旬干旱发生的年次数与统计资料的总年数之比,  $F_i = N/n \times 100\%$ ; 式中  $N$ ——该旬出现干

旱年数,  $n$ ——统计总年数。

## 2 结果与分析

### 2.1 春玉米生长季内干旱变化特征

#### 2.1.1 春玉米生长季内水分供需状况基本特征

按旬计算了玉米全生育期参考作物蒸散 ( $ET_0$ )、降水量 ( $P_i$ ) 和水分亏缺指数 ( $CWDI$ ), 求得全省 96 个站点多年平均值见图 1。

湖南春玉米生育期大部分处于雨季, 旬降水量大多在 50 mm 以上, 在 6 月下旬左右达到最大值, 7 月上旬

降水量迅速减少。旬参考作物蒸散量大体呈逐旬增多的趋势,到 7 月中下旬时超过 50 mm。*CWDI* 值 7 月中下旬稍微高,但也低于 10%,说明从全省多年平均状况看,春玉米大部分生育时段水分满足。但由于降水年际变率

较大,全省各地雨季结束的时间也有差异,当降水量偏少时,降水无法满足玉米需水要求(水分亏缺指数为正值),引起玉米干旱。

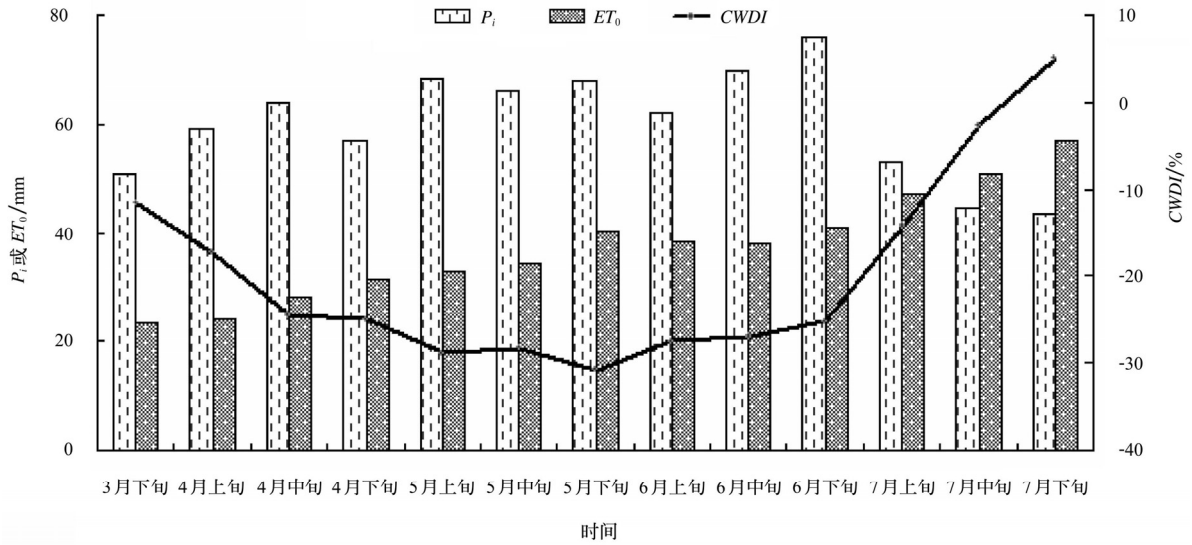


图 1 湖南省春玉米参考作物蒸量 ( $ET_0$ )、降水量 ( $P_i$ )、水分亏缺指数 ( $CWDI$ ) 随时间变化  
Fig.1 Changes of reference crop evapotranspiration( $ET_0$ ), precipitation( $P_i$ ) and crop water deficit index( $CWDI$ ) of spring maize by ten days in Hunan province

2.1.2 各生育阶段季节性干旱发生频率变化特征

计算全省平均及不同区域代表站各生育期干旱频率,结果见表 2。

从表 2 可以看出,全省全生育期的干旱频率在

1.3%~44.1%。从出苗到拔节中前期干旱频率多在 5%(20 年一遇)以下,干旱出现频率较低;拔节后期到抽雄-吐丝期干旱频率在 10.2%~13.4 %之间;从乳熟到成熟期,干旱频率迅速增加,最终达到 44.1%(约 2 年一遇)。

表 2 湖南全省及各典型站点春玉米不同生育期干旱频率变化  
Table 2 Variations of drought frequency at different growth stages of spring maize in whole provincial area and typical stations of Hunan province

不同旱级		出苗	三叶		七叶	拔节			抽雄—吐丝		乳熟		成熟	
		3月下	4月上	4月中	4月下	5月上	5月中	5月下	6月上	6月中	6月下	7月上	7月中	7月下
轻旱以上	桑植	9.3	11.6	7.0	7.0	4.7	4.7	9.3	7.0	16.3	11.6	11.6	18.6	27.9
	常德	7.0	7.0	0	4.7	4.7	9.3	16.3	30.2	20.9	30.2	27.9	37.2	38.1
	长沙	0	0	0	0	2.3	2.3	4.7	11.6	11.6	14.0	20.9	39.5	46.5
	怀化	9.3	2.3	2.3	2.3	2.3	4.7	4.7	4.7	7.0	11.6	20.9	27.9	39.5
	新化	2.3	2.3	2.3	0	2.3	2.3	9.3	4.7	4.7	9.3	11.6	27.9	38.1
	武冈	2.3	0	0	2.3	2.3	4.7	9.3	9.3	4.7	11.6	20.9	39.5	41.9
	衡阳	2.3	0	2.3	2.3	2.3	4.7	18.6	18.6	18.6	18.6	48.8	55.8	65.1
	道县	4.7	0	0	0	0	0	11.6	9.3	11.6	14.0	39.5	41.9	55.8
	郴州	2.3	0	0	0	7.0	7.0	14.0	14.0	4.7	14.0	34.9	53.5	58.1
	全省	4.8	2.8	1.3	3.2	3.3	4.3	10.2	11.5	13.4	15.7	23.7	36.8	44.1
中旱(全省)		0.8	0.6	0.1	1.0	0.6	1.5	5.2	6.1	7.4	10.3	16.8	28.8	34.8
重旱(全省)		0.2	0.1	0	0.3	0	0.5	1.9	2.6	3.5	6.0	10.4	20.3	25.4

发生中旱以上干旱频率较低,苗期(出苗到拔节)中旱以上干旱频率多在 5%以下;抽雄—吐丝是玉米需水关键期,这一时期前后发生中旱以上干旱频率在 5.2%~10.3 %之间,成熟期中旱以上干旱频率在 28.8%~34.8%。重旱一般出现在玉米成熟期,频率为 20%左右。

干旱频率随生育期变化存在明显地域转换:随着雨季由南往北推移,湘南(郴州、道县等站)最先进入雨季,生育前期阶段(苗期)湘南干旱频率最低;生育中

期阶段(拔节—抽雄)又以湘中(武冈、新化等站)等地干旱频率最低,生育后期阶段(吐丝—成熟)因湘西等地雨季结束最晚,干旱频率最低。

2.2 基于作物水分亏缺指数的春玉米干旱频率空间分布特征

春玉米营养生长(出苗—拔节)阶段干旱(指轻旱以上,下同)频率分布如图 2 所示。春玉米在出苗—七叶期(3 月下旬—4 月下旬)干旱频率较低,全省各地变

化为0.5%（娄底）~18.6%（龙山），平均为4.5%。总体上呈东南部低西北部高的分布特点：湘中的长沙、益阳、娄底等地干旱频率在1%以下，湘中、湘南等大部分地区干旱频率也低于5%；湘西、湘北干旱频率在5%以上，其中湘西北干旱频率10%以上。拔节期前后（5月份）干

旱频率也较低，在1.6%（江永）~14.8%（临澧），平均为6.0%；呈湘中和湘南南部低，湘北北部高的分布特点，即湘中长沙、益阳南部、娄底、怀化及湘南南部干旱频率在5%以下，洞庭湖区北部等地干旱频率在10%以上，其它都在5%~10%之间。

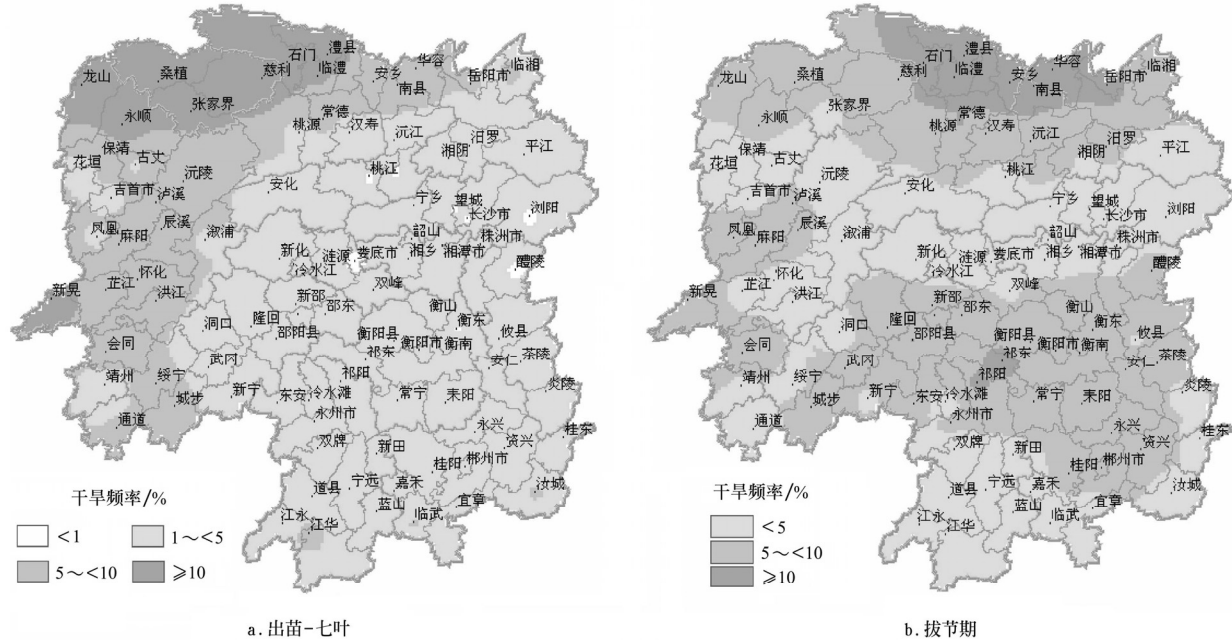


图2 湖南省玉米营养生长阶段干旱频率空间分布

Fig.2 Spatial distributions of drought frequency during vegetative growth period of maize in Hunan province

玉米生殖生长（抽雄—成熟）阶段作物需水量增大，干旱频率增加，其中抽雄—吐丝期（6月上、中旬）干旱频率在3.5%（凤凰）~29.1%（华容）之间，全省平均为12.5%；总体上呈湘南、湘西低，湘北、湘中高的分布特点：湘南南部、湘西及雪峰山和平江、浏阳等山区干旱频率在10%以下；洞庭湖区、衡阳、株洲南部等干旱频率较高，在20%以上，其他地区干旱频率都在10%~20%之间（图3a）。乳熟前期（6月下旬—7月上旬）干旱频率进一步增加，在3.5%（冷水江）~36.1%（华容）之间，平均达到19.8%，湘东南湘江中上游、洞庭湖区等大部分

地区干旱频率在20%以上，其中衡阳、郴州局部及洞庭湖区北部局地干旱频率超过30%；其他地区多在10%~20%以下（图3b）。乳熟后期—成熟期（7月中下旬）干旱频率迅速增加，在10.5%（龙山）~60.5%（衡阳市）之间，平均达到40.7%，比乳熟前期增加1倍。呈湘中中高，湘东一带次高，湘西北低的分布特点，即衡阳、郴州、株洲、永州北部等地干旱频率在50%以上，湘东、湘南的湘江流域、资水上游干旱频率也在40%~50%，湘西北等地干旱频率在30%以下，其他地区干旱频率在30%~40%之间（图3c）。

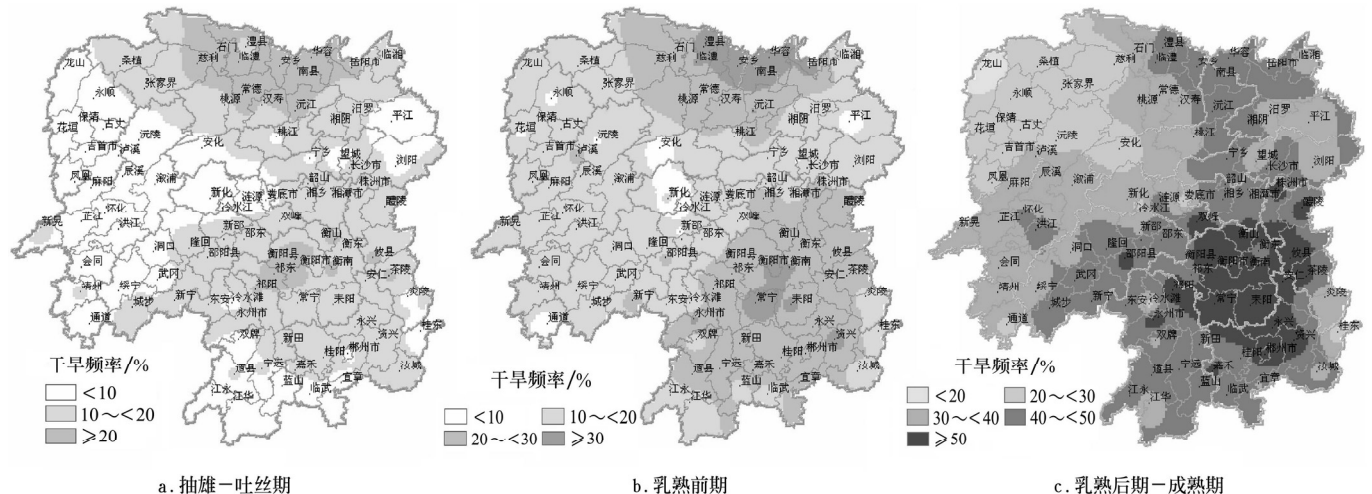


图3 湖南省玉米生殖生长阶段干旱频率空间分布

Fig.3 Spatial distributions of drought frequency during reproductive growth period of maize in Hunan province

从空间分布总体特征看：以湘中南的衡阳及周边一带干旱频率最高，其次为湘东、湘北一带次高，湘西等地干旱频率低。以上分析结果与实际干旱发生情况和已有研究结论基本一致<sup>[4,6]</sup>。

### 2.3 春玉米干旱频率年际变化趋势

选取湖南不同区域常德（湘北）、双峰（湘中）和郴州（湘南）3个代表站，分析对玉米产量形成影响最重要的2个时期，即抽雄—吐丝和乳熟前期的玉米缺水指数（*CWDI*）从1961至2007年的年际变化，分析结果见图4。

抽雄—吐丝期各代表站 *CWDI* 变化和各站平均5年滑动显示基本一致变化：在20世纪60年代初到70年代初 *CWDI* 值明显升高，干旱有加重趋势，且波动幅度大；之后维持较高水平到70年代中期 *CWDI* 有一次突变，下降明显，干旱有所缓和；70年代中后期到80年代后期，*CWDI* 又呈明显上升趋势；80年代后期之后到2005年前后 *CWDI* 值呈波动下降趋势；最近几年 *CWDI* 值又呈上

升趋势。从各年代看，*CWDI* 以20世纪60年代和80年代较高，70年代和90年代较低，21世纪以来最近7年最低。40多年总体变化趋势，干旱略显减轻趋势；但最近3年转为增重趋势。

灌浆—乳熟前期的 *CWDI* 变化抽雄—吐丝期略有不同，但趋势基本一致：20世纪60年代初到60年代中后期呈下降趋势，之后到70年代初期干旱又呈上升趋势；70年代中期到80年代中期维持较高水平波动变化，80年代中期到90年代中期呈明显下降变化，90年代中期以来一直呈波动上升趋势，干旱程度呈明显增重趋势。从各年代看，以20世纪70年代干旱最严重，80年代次重，90年代最轻，最近7年与20世纪60年代接近，相比90年代中期以来，干旱程度呈明显增重趋势。

综合2段时期的 *CWDI* 变化，以20世纪80年代干旱较严重，90年代干旱较轻；从47年来总体变化趋势上干旱程度都呈现减轻趋势，但近几年来干旱都呈现明显加重趋势。

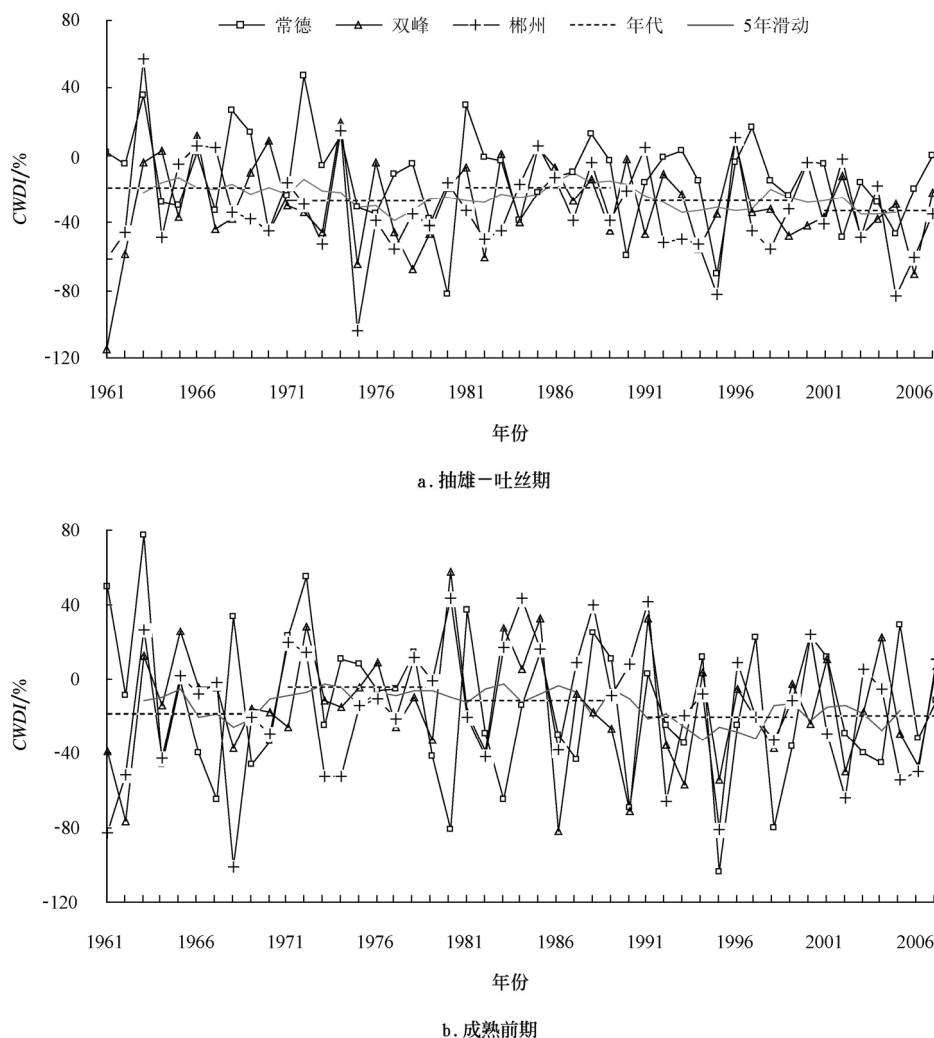


图4 湖南典型站点春玉米作物水分亏缺水指数（*CWDI*）年际变化（1961—2007年）

Fig.4 Inter-annual variations of the crop water deficit index on spring maize at representative weather stations in Hunan(1961—2007)

## 3 结论与讨论

由上述分析可见，湖南春玉米干旱具有以下特点：

从玉米不同生长发育阶段看，季节性干旱明显，干旱频率较高的时段主要为抽雄—吐丝期和乳熟、成熟阶段，到生育后期干旱频率明显增加。干旱程度以轻旱为主，

中旱较少, 重旱主要发生在乳熟到成熟期。从空间分布特征看出, 不同生育期干旱频率存在明显空间差异, 总体上以湘中南的衡阳及周边一带干旱频率最高, 其次为湘东、湘北一带次高, 湘西等地干旱频率低。从年代际变化看, 以 20 世纪 80 年代干旱较严重, 90 年代干旱较轻; 总变化趋势看 20 世纪 90 年代以前干旱程度呈减轻趋势, 但 90 年代后期以来干旱明显加重趋势。

湖南春玉米干旱主要发生在抽雄—吐丝、乳熟等重要需水时期, 对玉米产量形成影响很大。空间分布上, 湘西、湘南等山区干旱频率虽然较低, 但这些丘陵山区由于土层薄, 保水性差, 同时灌溉条件相对落后, 抗旱能力较弱; 反之洞庭湖区尽管干旱频率较高, 但该地区土壤保水和水利条件都较好, 抗旱能力强。因此在指导生产时, 应综合考虑干旱发生特征和作物生产实际条件。

志谢: 感谢中国气象局气象中心吕厚荃研究员提供作物干旱指标计算方法。感谢中国农业大学资源与环境学院气象 061 班隋月、徐超、吕硕、麻雪艳、王佳、李雷等同学为本文基础资料的处理所做的前期工作。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈志辉, 黄虎兰. 湖南省玉米生产发展几个问题的商榷[J]. 作物研究, 2003, 17(4): 104—105.
- [2] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M], 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 1—2.
- [3] 佟屏亚. 南方地区玉米综合开发的策略和措施[J]. 耕作与栽培, 1999, (3): 49—52.
- [4] 湖南省气象局资料室编. 湖南农业气候[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1981.
- [5] 陆魁东, 黄晚华, 方丽, 等. 气象灾害指标在湖南春玉米种植区划中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 18(4): 548—554.  
Lu Kuidong, Huang Wanhua, Fang Li, et al. The climatic zoning of spring maize in Hunan based on meteorological disaster indexes[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 18(4): 548—554. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李克勤, 涂先德, 吴玉林. 2005 年湖南玉米旱灾发生特点及对策分析[J]. 作物研究, 2006, 20(1): 20—22.
- [7] 刘丙军, 邵东国, 沈新平. 作物需水时空尺度特征研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 258—264.  
Liu Bingjun, Shao Dongguo, Shen Xinping. Advances in researches on the spatial-temporal features of crop water requirement[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 258—264. (in Chinese with English abstract)
- [8] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社.
- [9] 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国. 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.  
Liu Hongyi, Ma Pengli, Yang Xingguo, et al. Temporal and spatial analysis of the water requirements of major crops in Gansu province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 23(1): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈凤, 蔡焕杰, 王健. 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.  
Chen Feng, Cai Huanjie, Wang Jian. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling Zone[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 2(5): 191—193. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张丹, 张广涛, 王丽学. 彭曼—蒙特斯公式在参考作物需水量中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4513—4514.
- [12] 高歌, 陈德亮, 任国玉. 1956~2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378—387.  
Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 378—387. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 155—159.  
Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Hao Weiping. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 155—159. (in Chinese with English abstract)
- [14] 申双和, 张方敏, 盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 11—15.  
Shen Shuanghe, Zhang Fangmin, Sheng Qiong. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [15] Richard R Heim Jr. A Review of twentieth -century drought indices used in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83: 1149—1165.
- [16] Karl T R. Some spital characteristics of drought duration in the United Stated[J]. Journal Climate Applied Meteorology, 1983, 22: 1356—1366.
- [17] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60—65.  
Wand Jin song, Guo Jiangyong, Zhou Yuewu, et al. Progress and Prospect on drought indices research[J]. Arid land geography, 2007, 30(1): 60—65. (in Chinese with English abstract)
- [18] GB/T xxx-2009, 农业干旱等级[S](审定稿).
- [19] 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2006, 26(3): 27—30.  
Liu Zhandong, Duan Aiwang, Xiao Junfu. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growing period on dry crop[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 26(3): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李粉婵. 山西省小麦、玉米依靠降雨满足作物需水程度的分析[J]. 山西水利科技, 2005, 155(1): 21—23.  
Li Fenchuan. Degree to Meet water requirement of wheat and maize by using precipitation in Shanxi province[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2005, 155(1): 21—23. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

分析及种植区划[J]. 作物研究. 2005, 9(2): 83—86.

[21] 龙志长, 段盛荣, 龙晖, 等. 湖南省春玉米生育气候条件

## Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index

Huang Wanhua<sup>1,2</sup>, Yang Xiaoguang<sup>1\*</sup>, Qu Huihui<sup>1</sup>, Feng Liping<sup>1</sup>, Huang Binxiang<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>,  
Shi shengjin<sup>1</sup>, Wu Yongfeng<sup>3</sup>, Zhang Xiaoyu<sup>1</sup>, Xiao Xiaoping<sup>4</sup>, Yang Guangli<sup>4</sup>, Li Maosong<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Hunan Meteorological Research Institute, Changsha 410007, China;

3. Institute of Environment and Sustainable Development of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

4. Soil and Fertilizer Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** Seasonal drought is the most prominent meteorological disaster which affects spring maize production in Hunan Province. Therefore, analyzing its temporal and spatial distribution characteristics and occurring rules are important to provide technical supports for the development and reasonable layout of maize production in Hunan Province. Weather data of 96 stations from 1961 to 2007 were used to calculate the reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) and crop water requirement ( $ET_c$ ) of maize by the method of Penman-Monteith formula commended by FAO(1998). In this paper, effects of surplus water on crop water deficit index ( $CWDI$ ) were considered, and the calculating method of  $CWDI$  was modified. The frequencies of different classes of drought were calculated and their temporal and spatial distribution characteristics were analyzed by the modified method of  $CWDI$  subsequently. Typical stations in different regions were selected to analyze the inter-decade variations of modified  $CWDI$ . Results indicated there were significant seasonal and spatial distribution characteristics. Drought occurred in high frequency at the stage of tasselling to silking and thereafter. Drought frequency obviously increased with backwards shift of growth stage. Light drought happened in higher frequency than medium and severe drought. In space, drought occurred with the highest frequency in Hengyang and its surrounding area in mid-south part of Hunan, followed with the east and north part, and low frequency region located in west part. Drought was more serious in 1980s, and became light in 1990s.

**Key words:** crops, drought, water resources, crop water deficit index ( $CWDI$ ), crop water requirement, spatio-temporal characteristic, spring maize