

# 气候变暖对天水市川灌地玉米生长发育的影响及对策研究

姚晓红<sup>1,2</sup>, 李侠<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所; 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;  
2. 甘肃省天水农业气象试验站, 甘肃 天水 741020; 3. 甘肃省天水市气象局, 甘肃 天水 741020)

**摘要:**通过1985~2004年20 a气象资料分析得出,影响川灌地玉米产量的主要气象因子是播种—拔节期日较差累积值和乳熟—成熟期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温。20世纪90年代以来,热量条件的显著增加并由此带来水热之间配置的不适宜性是造成玉米产量出现较大波动的主要气候原因,分析得出作物获得较高产量适宜的光温、温水、光水、光温水的配置量化关系。同时,提出了相应的农业对策和管理建议。

**关键词:**气候变暖; 玉米; 生长发育; 对策研究

**中图分类号:** S162.5

**文献标识码:** A

## 引言

天水地处陇东黄土高原与西秦岭山地干旱半干旱交错地带的陇东南农林生态复合区域,以冬小麦、玉米2大作物种植为主。全市玉米播种面积7.3~8.1万 $\text{hm}^2$ ,占作物总面积的40%~45%,其中川灌地0.41~0.47万 $\text{hm}^2$ ,占全市玉米总播种面积的5%~6%左右。玉米产量分析表明,川灌地虽然作物生长发育所需的土壤水分能够保障,但产量波动极大,产量最低的1996年仅6465 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,最高的1991年为12735 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,产量偏差达6270 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。作物生育期气象条件分析可知,1994年作物生育期平均气温最高为21.7 $^{\circ}\text{C}$ ,降水最少为198.0 $\text{mm}$ ;2004年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温最多为1600.1 $^{\circ}\text{C}$ 。1994年与2004年作物产量分别为8355 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 和9015 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,减产8%和1%。产量最高的1991年玉米全生育期平均气温19.9 $^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温1419.6 $^{\circ}\text{C}$ ,基本与历年持平,但降水量251.9 $\text{mm}$ ,偏少33%,光、温、水等气象要素的变幅虽不如1994年和2004年大,但作物却获得较高产量。因此,作物产量的高低不仅取决于生育期间单一气象要素的异常变化,其气象要素间的合理配置更为关键。

## 1 资料来源

玉米发育期、川灌地玉米产量结构资料均取自天水农业气象试验站1985~2004年农业气象观测资料;气象资料取自天水市麦积区气象局(与农试站合署)整编资料。

## 2 结果分析

### 2.1 20世纪70年代以来天水农业气候资源变化及玉米发育期、产量变化特征

#### 2.1.1 天水农业气候资源变化特征<sup>[1]</sup>

##### (1) 降水演变特征

天水由于地形影响,大气降水的年际地域差异十分显著。1971~1990年,作物全生育期平均降雨量(表1)406.5 $\text{mm}$ ,在450~380 $\text{mm}$ 之间,较历年(1971~2000年,下同)同期偏多8%~10%。20世纪90年代以来,天水气候发生了显著变化,雨量锐减,作物全生育期平均降水量316.4 $\text{mm}$ ,在340~280 $\text{mm}$ 之间,偏少11%~12%。尤以作物三叶—拔节、乳熟—成熟期偏少最多,平均雨量仅81.2 $\text{mm}$ 和68.1 $\text{mm}$ ,偏少18%和27%。

收稿日期:2006-02-21;改回日期:2006-04-17

基金项目:科技部科研院所社会公益研究专项“西北农作物对气候变化的响应及其评价方法”(2005DIB3J100)资助

作者简介:姚晓红(1966-),女,河南清丰县人,大学本科,主要从事农业气象试验研究工作。



表 1 玉米发育期及主要气象要素分布表

Tab. 1 The main meteorological factors during corn's growing period

气象要素	时段	播种—三叶		三叶—七叶		七叶—拔节		拔节—抽雄		抽雄—乳熟		乳熟—成熟		总天数/d
		发育期	间隔 日数/d	发育期	间隔 日数/d	发育期	间隔 日数/d	发育期	间隔 日数/d	发育期	间隔 日数/d	发育期	间隔 日数/d	
	1971~2000	18/4~10/5	22	10/5~3/6	24	3/6~18/6	15	18/6~1/72	24	12/7~14/8	33	14/8~9/9	26	144
	1971~1990	20/4~12/5	22	12/5~6/6	25	6/6~22/6	16	22/6~16/7	24	16/7~18/8	33	18/8~14/9	27	147
	1991~2004	16/4~7/5	21	7/5~30/5	23	30/5~12/6	13	12/6~7/7	25	7/7~10/8	34	10/8~2/9	23	139
平均														平均
气温/℃	1971~2000	15.2		17.5		20.2		21.9		22.9		20.0		19.9
	1971~1990	14.9		17.3		20.0		21.7		22.5		19.5		19.5
	1991~2004	15.3		17.9		21.0		22.7		23.5		20.8		20.4
≥0℃ 积温/℃	1971~2000	103.5		161.1		204.8		276.6		417.0		232.0		1395.0
	1971~1990	97.9		155.0		201.7		271.0		401.7		217.8		1345.1
	1991~2004	379.8		185.4		233.1		280.6		432.9		260.0		1500.4
累积 日较差/℃	1971~2000	308.8		361.3		308.3		324.0		405.8		321.4		2029.6
	1971~1990	298.3		349.2		300.6		313.6		390.4		308.8		1960.9
	1991~2004	316.4		388.2		335.0		315.3		393.7		333.1		2068.9
累计 日照时数/h	1971~2000	140.6		160.0		137.1		168.6		232.1		158.0		996.4
	1971~1990	139.8		158.9		136.0		167.7		231.1		156.4		989.9
	1991~2004	137.0		170.6		155.7		164.9		222.9		160.9		1012.0
降水 量/mm	1971~2000	29.7		42.3		56.8		70.6		82.9		92.8		375.1
	1971~1990	28.4		46.7		62.6		69.9		89.1		109.8		406.5
	1991~2004	29.8		36.1		45.1		64.3		73.0		68.0		316.3

## (2) 温度演变特征

20 世纪的 70~80 年代作物全生育期平均气温在 16.7~19.6℃ 之间,  $\geq 10$ ℃ 积温 989.4~1 357.1℃, 属正常趋势, 变差分别在 -0.1~-0.2℃, -28.9~-43.4℃, 年、季波动不大。90 年代以来, 气温出现上升趋势, 作物全生育期平均气温 20.4℃, 在 17.6~20.5℃ 之间, 偏高 1.4~1.3℃;  $\geq 10$ ℃ 积温 1 500.4℃, 在 1115.7~1 514.6℃ 之间, 偏多 97.4~114.1℃。

## (3) 光照演变特征

光照是作物形成产量的主要能量来源。1971~1990 年作物全生育期平均日照时数 989.9 h, 在 824.4~1 128.3 h 之间, 变差 3.2~2.3 h; 1991~2004 年为 1 012.0 h, 在 839.7~1 138.9 h 之间; 变差 -11.5~-8.3 h, 日照时数的变化不是很大。

### 2.1.2 作物发育期变化特征

天水市玉米作物一般在 4 月中旬播种(表 1), 9 月上、中旬成熟, 全生育期 144~147 d。20 世纪 70~80 年代, 玉米平均播种日期在 4 月 20 日, 9 月 14 日成熟, 全生育期历时 147 d, 基本正常。但进入 90

年代以来, 由于暖干气候影响, 玉米播种日期在 4 月 15~16 日, 提前 4~5 d, 9 月 2 日普遍成熟收获, 提前了 5 d, 全生育期 139~140 d, 缩短了 7~8 d。高温干燥气候使作物株体过早促熟, 进而影响产量。

### 2.1.3 作物产量波动趋势特征

图 1 是天水市川灌地 1985~2004 年玉米产量趋势分布图。1985~1990 年, 玉米单产分布趋势基

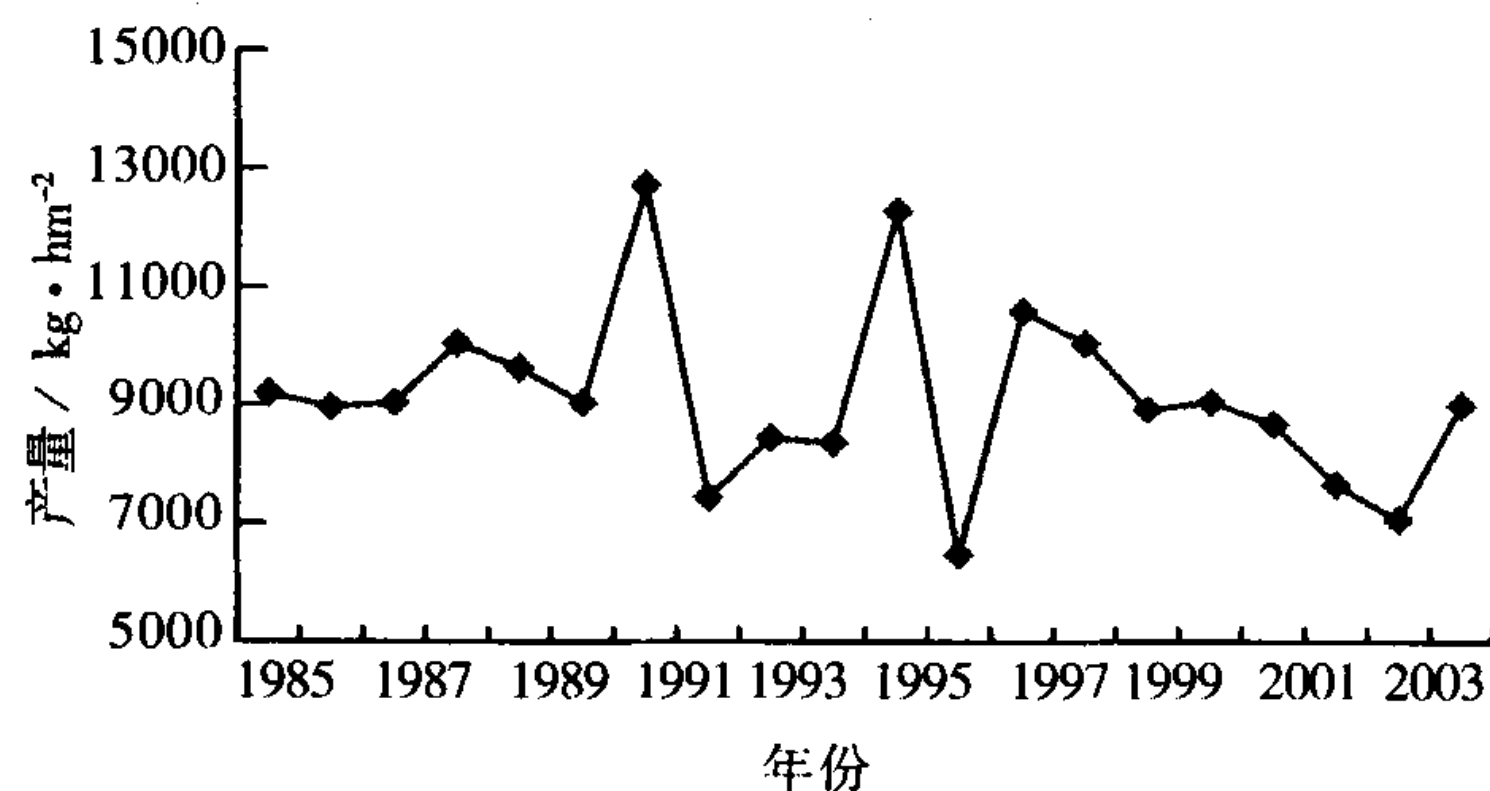


图 1 天水市川灌地 1985~2004 年玉米产量趋势分布  
Fig. 1 The corn yield trend of the irrigating farmland in Tianshui during 1985-2004



本稳定,平均单产 9 025 kg/hm<sup>2</sup>;20 世纪 90 年代以来的 14 a 中,平均产量虽然偏差不大,但产量波动较大,高低产值偏差 6 270 kg/hm<sup>2</sup>,为近 20 a 玉米增减产之最,10 a 不同程度出现减产。因此,川灌地作物需水虽然可以保障,但热量条件的显著增加对作物正常生长和产量形成的影响十分明显。

## 2.2 主要气象要素及各要素间相互配置对玉米生长发育的影响

### 2.2.1 主要气象要素演变对玉米生长发育的影响

通过川灌地玉米气候产量(将当年玉米单产与多年玉米平均单产之比的百分率作为气候产量<sup>[2]</sup>)与玉米全生育期不同生育时段平均气温、平均最高气温、平均最低气温、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  有效积温、平均日较差、日较差累积值、平均日照时数、日照时数累积值、降水量等主要气象要素相关分析可知,作物产量的高低主要受作物发育期热量条件的制约,特别是作物播种—拔节期日较差累积值( $r=0.7927^{**}$ ,通过 0.01 信度  $F$  值检验)、乳熟—成熟期  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  有效积温( $r=0.4976^{**}$ ,通过 0.05 信度  $F$  值检验)相关最好。逐步回归<sup>[3]</sup>建立川灌地玉米气候产量与主要气象要素关系模型见(1)式。

$$y = 50.3530 + 0.0219 \sum \bar{T}_d + 0.1765 \sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

(1)式中: $y$  为川灌地玉米气候产量; $\sum \bar{T}_d$  为播种—拔节期日较差累积值; $\sum T_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$  为乳熟—成熟期  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  有效积温。 $R=0.5986$ , $F=3.913$ , $F > F_{0.05}$ ,通过 0.05 信度  $F$  值检验。

川灌地虽然采用地下水水泵提灌,作物所必需的土壤水分基本能够保障,播种—拔节的苗期生长阶段较大的昼夜温差利于作物干物质累积,有利形成壮苗;乳熟—成熟阶段是玉米灌浆的关键期,较多的积温有利于玉米籽粒成熟而形成高产。但是,降水量的多寡却对作物生育期热量条件及其由此造成作物体内养分运输、转化等诸多方面产生较大影响,进而影响作物产量。

### 2.2.2 主要气象要素间相互配置对作物生长发育的影响

热量是作物干物质积累的主要能量来源,水分不仅是作物光合作用、合成碳水化合物的主要原料之一,而且是作物体内输送养分的载体<sup>[4]</sup>。为了分析研究光温,温水,光水及光温水等主要气象因子间相互配置对作物生长发育的影响,在资料处理上采

用逐年作物不同发育时段的主要气象要素值、逐年玉米单产值各要素多年平均值之比,作为各要素的要素系数值,消除各要素间的地域及量纲差异的影响,将各要素系数值按光温,温水,光水,光温水进行积商组合后,同产量系数进行相关分析。

#### (1) 光、温条件对作物生长发育的影响

对川灌地作物产量形成影响最大的光、温条件以作物播种—抽雄期日较差累积值和日照时数累积值最为显著,其光、温模式如下:

$$y' = 0.7111 + 0.2822(\sum T'_d \text{播种-抽雄} / \sum S' \text{播种-抽雄}) \quad (2)$$

上式中, $y'$  为川灌地玉米产量系数(下同), $\sum T'_d \text{播种-抽雄}$ 、 $\sum S' \text{播种-抽雄}$  分别为玉米播种—抽雄期日较差累积值系数、日照时数累积值系数; $n=20$ , $r=0.5522$ , $F=7.8965$ ,通过信度  $\alpha=0.05$  的  $F$  值检验,效果显著。将上式各要素平均值代入并进行系数转换得:

$$y = 666.5625 + 1118.9579(\sum T_d \text{播种-抽雄} / \sum S \text{播种-抽雄}) \quad (3)$$

上式  $y$  为川灌地玉米单产(kg/hm<sup>2</sup>下同); $\sum T_d \text{播种-抽雄}$ 、 $\sum S \text{播种-抽雄}$  分别表示玉米播种—抽雄期日较差累积值和日照时数累积值。令上式  $y \geq 9\ 375$  (川灌地玉米平均单产值(kg/hm<sup>2</sup>),下同)得:

$$\sum T_d \text{播种-抽雄} \geq 2.4201 \sum S \text{播种-抽雄} \quad (4)$$

(4)式表明:川灌地玉米形成较高产量的光温匹配关系是作物播种—抽雄期适宜的日较差累积值是同期日照时数累积值的 2.4201 倍以上。

#### (2) 温、水条件对作物生长发育的影响

在温、水条件逐因子中,以玉米播种—抽雄期日较差累积量与降水量配置的适宜程度对作物生长发育的影响最大。其数学模型如下:

$$y' = 1.3775 - 0.3673(R' \text{播种-抽雄} / \sum T'_d \text{播种-抽雄}) \quad (5)$$

$R' \text{播种-抽雄}$ 、 $\sum T'_d \text{播种-抽雄}$  分别表示播种—抽雄期降水量系数和日较差累积值系数, $n=20$ , $r=-0.4527$ , $F=4.6397 > F_{0.05}=4.41$ ,效果显著。将上式各因子平均值代入并进行系数转换得:

$$y = 12914.0625 - 28002.8786(R_{\text{播种-抽雄}} / \sum T_d \text{播种-抽雄}) \quad (6)$$

$R_{\text{播种-抽雄}}$ 、 $\sum T_d \text{播种-抽雄}$  分别表示玉米播种—抽雄期降水量和日较差累积值。

令(6)式  $y \geq 9\ 375$  得:

$$R_{\text{播种-抽雄}} \leq 0.1264 \sum T_d \text{播种-抽雄} \quad (7)$$

也就是说在水分条件能够保障的川灌地,玉米抽雄以前的苗期生长阶段,降水过多,将会减少作物



必需的日较差值,导致热量不足,进而抑制作物干物质的累积而不利形成壮苗,影响作物后期产量形成,其适宜的降水量不宜超过日较差累积值的 0.1264 倍。

### (3) 光、水条件对作物生长发育的影响

在光、水条件逐因子中,以玉米播种—七叶期光、水之间配置的适宜程度,其数学模型如下:

$$y' = 0.8084 + 0.1865(R'_{\text{播种-七叶}} / \sum S'_{\text{播种-七叶}}) \quad (8)$$

$R'_{\text{播种-七叶}}$ 、 $\sum S'_{\text{播种-七叶}}$  分别表示玉米播种—七叶期降水量系数和日照时数累积值系数,  $n = 20$ ,  $r = 0.4807$ ,  $F = 5.3760 > F_{0.05} = 4.41$ , 效果显著。

将上式各因子平均值代入并进行系数转换得:

$$y = 7\,578.7500 + 7\,430.2429(R_{\text{播种-七叶}} / \sum S_{\text{播种-七叶}}) \quad (9)$$

$R_{\text{播种-七叶}}$ 、 $\sum S_{\text{播种-七叶}}$  分别为玉米播种—七叶期降水量和日照时数累积值。

令(9)式  $y \geq 9\,375$  得:

$$R_{\text{播种-七叶}} \geq 0.2417 \sum S_{\text{播种-七叶}} \quad (10)$$

由此可知,川灌地玉米光、水匹配以播种—七叶期最为关键,其所需大气降水是随日照时数的增加而增大。就其原因,一是此期浇灌不及时,土壤缺水,不能满足作物正常生长的需水要求;二是尽管作物正常生长所需的土壤水分能够保障,但此期作物根弱苗小,较长的光照条件使得作物根系来不及吸水或由于灌溉导致土壤热量不足,影响作物根系吸水,造成株体大量的水分蒸腾散失而不易形成壮苗,进而影响作物后期产量形成。

### (4) 光、温、水资源对作物生长发育的综合影响

任何作物,其正常的生长发育均受光、温、水等气象条件的综合影响,光、温、水条件配置适宜,作物方可正常生长并获得较高产量。当某一气象要素出现异常,均能造成作物必需的光、温、水匹配失衡,进而影响其他气候资源的有效利用,甚至抑制作物正常生长而导致减产。

川灌地由于作物正常生长所需的土壤水分基本能够保障,较多的降水,反而会减少作物所需的热量条件而影响产量形成。相关分析建立数学模型如下:

$$y' = 1.3286 - 0.3128(R'_{\text{播种-乳熟}} / \bar{T}'_{\text{d播种-乳熟}} \times S'_{\text{播种-乳熟}}) \quad (11)$$

$R'_{\text{播种-乳熟}}$ 、 $\bar{T}'_{\text{d播种-乳熟}}$ 、 $S'_{\text{播种-乳熟}}$  分别表示玉米播种—乳熟期降水量系数、平均日较差系数、平均日

照时数系数。  $n = 20$ ,  $r = -0.4777$ ,  $F = 5.3220 > F_{0.05}$ , 效果显著。

将上式各因子平均值代入并进行系数转换得:

$$y = 12\,455.6250 - 1\,215.6235(R_{\text{播种-乳熟}} / \bar{T}_{\text{d播种-乳熟}} \times S_{\text{播种-乳熟}}) \quad (12)$$

$R_{\text{播种-乳熟}}$ 、 $\bar{T}_{\text{d播种-乳熟}}$ 、 $S_{\text{播种-乳熟}}$  分别为玉米播种—乳熟期降水量和平均日较差、日照时数。令上式  $y \geq 9\,375$  得:

$$R_{\text{播种-乳熟}} \leq 2.5345 \bar{T}_{\text{d播种-乳熟}} \times S_{\text{播种-乳熟}} \quad (13)$$

由此可知,川灌地玉米正常生长并获得较高产量的主要影响因子是播种—乳熟期降水量、平均日较差与日照时数,适宜的降水可适当减轻高温和长光照条件对作物株体的水分蒸散流失,有利于干物质积累形成壮苗,其适宜的降水量不能超过其平均日较差与日照时数之积的 2.5345 倍。

## 3 气候变暖对川灌地玉米生长发育的影响分析

川灌地虽然供作物生长发育所需的土壤水分条件基本可以满足,但对大气降水的需求和限制却极为严格,特别是作物抽雄以前的苗期生长阶段,此期气象条件配置的适宜与否是作物能否形成壮苗而获取较高产量的关键。1991~2004 年,作物播种(4 月中下旬)—抽雄(7 月上中旬)期平均气温  $19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 较 1971~2000 年 30 a 平均值偏高  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温  $807.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 偏多  $61.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 日较差累积量  $1\,353.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 偏多  $51.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 日照时数累积值  $625.9\text{ h}$ , 偏多  $19.6\text{ h}$ ; 降水量  $172.4\text{ mm}$ , 偏少 14%。特别在作物严重减产的 1996 年,期相应气象指标分别为  $19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $819.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\,115.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $644.9\text{ h}$  和  $141.6\text{ mm}$ , 偏差  $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $73.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-186.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $38.6\text{ h}$  和  $-29\%$ , 高温干燥气候是造成作物生育期水热配置出现较大差异的主要气候原因。同时,日较差的显著减少,限制了作物干物质的累积、运输,而单株干重仅  $78.02\text{ g/株}$ , 是有该资料记录以来的 1994~2004 年 11 a 中最少年份,较其 11 a 平均偏少了  $32.01\text{ g}$ 。

## 4 对策建议

(1) 玉米灌溉必须密切结合作物需水及地区降雨特征。4 月中、下旬至 7 月上、中旬是川灌地玉米播种—抽雄期,也是天水气温回升最快和降水量偏



少,影响作物形成壮苗而获取较高产量的关键时期。因此,此期应适时灌水,灌水的适宜时期应该掌握在播种、拔节、抽雄之前 5~7 d 左右,使该期土壤重量含水率占田间持水量的百分率稳定在 70%~80% 之间。

(2) 根据作物需水控制浇灌水量。播种—拔节期由于苗体较小,需水不多,灌水量不可过多,约 400~900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 左右;拔节—乳熟是株体迅速增长的速生阶段和产量形成的关键期,此期需水较多,适宜的灌水量可在 2 200~2 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 之间,全生育期灌水量可在 2 500~3 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 之间<sup>[4]</sup>。

(3) 早晨浇灌,减少土壤、水温差异,利于作物吸收。由于天水川灌地采用地下水水泵提灌,进行大水漫灌,水温与土温之间差异较大。早晨是土温

最低时间,此期浇灌可使土、水之间温差最小,有利作物吸收。

(4) 提高浇灌技术,有条件地区尽量采用滴灌、喷灌等设施,不仅可节约用水,也有利作物吸收。

#### 参考文献:

- [1] 许彦平,姚晓红,朱德强. 20 世纪天水干旱气候演变对农业影响及对策分析[J]. 干旱地区农业研究,2002,(1):120-124.
- [2] 刘树泽,张宏铭,蓝鸿第. 作物产量预报方法[M]. 北京:气象出版社,1987. 67-88.
- [3] 周惠彬,谢小燕,张卫东,等. 概率论与数理统计[M]. 成都:西南财经大学出版社,2004. 291-323.
- [4] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京:北京农业大学出版社,1988. 240-266.

## Influence of Climate Warming on Corn Growth in Irrigating Farmland of Tianshui and Countermeasures

YAO Xiao-hong<sup>1,2</sup>, LI Xia<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China; 2. Tianshui Agro-meteorological Experiment Station, Tianshui 741020, China; 3. Tianshui Meteorological Bureau of Gansu Province, Tianshui 741020, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data during 1985-2004, the meteorological factors influencing corn yield of the irrigating farmland of Tianshui were analyzed, and the effective accumulated temperatures ( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) during stages from the milk to full-ripe and the temperature daily range from the seeding to stem extension stage were main factors affecting the output of corn. The remarkable increase of heat resource since the 1990s and thus the unsuitability of the precipitation and heat condition resulted in large fluctuation of the corn yield there. The quantification relations between light and temperature, temperature and water, light and water, light and water as well as temperature suiting to higher yield were provided and meanwhile the corresponding agricultural countermeasures and management suggestion were given also.

**Key words:** climate warming; corn; growth; countermeasure