

# 利用气象与生态要素预测冬小麦产量

郭海英<sup>1,3</sup> 万信<sup>1,2</sup> 杨兴国<sup>1</sup>

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所,中国气象局干旱气候变化与减灾开放实验室,  
甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,2 兰州区域气候中心,兰州 730020;  
3 甘肃省西峰农业气象试验站,庆阳 745000)

**摘要** 选用对陇东黄土高原塬区冬小麦产量形成至关重要的发育期间光热要素、水分复合因子以及表征冬小麦生长状况的定量因子生长势等气象要素和生态要素,利用多元线性回归方法建立了冬小麦不同生长发育阶段产量预报方程,试预报准确率达到 92% 以上。该方法改变了利用气象单类要素预报粮食产量的传统观念,为利用生态要素、水分复合因子等综合要素预报粮食产量进行了积极的探索,使数字农业、生态农业气象要素在陇东黄土高原得到有效推广。

**关键词** 冬小麦 产量预测 气象要素 水分复合因子 生长势

## 引言

中国是一个拥有 13 亿人口的粮食需求大国,随着人口增长、工业化和城市化进程的加速,粮食需求的增长必然引起我国粮食供求关系的变化。据有关研究预测,2030 年我国粮食总供给能力为  $6.8 \times 10^8$  t,总需求为  $6.5 \sim 7.5 \times 10^8$  t,如果按需求下限计算则供需基本平衡,如果按需求上限计算,则存在  $7000 \times 10^4$  t 的缺口。受水土资源、生态环境、自然灾害等因素制约,中国粮食生产波动较大,未来粮食安全形势不容乐观<sup>[1]</sup>。利用气象要素建立的粮食作物产量预报模式比较常见<sup>[2]</sup>,但结合生态、气象和水资源要素等多要素建立的粮食作物产量预报方法却不常见。

庆阳市位于甘肃省东部,是陕、甘、宁边区重要组成部分,俗称“陇东”,是“陇东粮仓”的重要产粮区,以旱作雨养农业为主,属黄土高原生态脆弱区,冬小麦为当地主要农作物,平均年播种面积在  $20 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 左右。随着我国粮食生产重心进一步由南方向北方推移,当地政府提出了重建“陇东粮仓”,保障庆阳老区粮食安全的重大举措。本文以光、热、水等气象要素和生长势等生态要素作为冬小麦产量影

响因子,力求从多要素角度建立冬小麦产量预测模型,为该区粮食安全提供优质服务。

## 1 资料来源

冬小麦是陇东黄土高原主要粮食作物,每年的播种面积超过全年粮食播种总面积的 50%。本文土壤水分、生长势、产量资料均为甘肃省西峰农业气象试验站麦田常规观测资料。试验地冬小麦 9 月中旬种植,11 月中、下旬停止生长进入越冬期,次年 3 月上旬返青,4 月中旬拔节,5 月上、中旬抽穗,6 月下旬收获。按照《农业气象观测规范》<sup>[3]</sup> 要求,每年 3~11 月每月上旬 8 日,采用土钻法测定麦田土壤水分,测定深度为 2 m。田间持水量等常数,按照中国气象局规定,每 8 年重新测定一次,本文所用常数为 1990 年、1998 年测定常数。冬小麦常规观测地块长期固定,品系、耕作制度、播期、施肥量等都长期一致,因此,年际间非气候因素造成的误差较小,且试验地毗邻气象观测场,符合农业气象平行观测要求。气象资料来源于西峰国家基准气候站(35°44' N, 107°38' E, 海拔高度 1421 m, 年平均气温 8.7 °C, 年平均降水量 530 mm)。资料序列为 1995~2006 年,共 12 年。

中国气象局新技术推广项目“西北地区干旱监测系统研究”(CMA7J2005M22)、科技部科研院所社会公益专项(2005DIB3J100)及国家自然科学基金项目(40205005)共同资助

作者简介:郭海英,男,1966 年生,高级工程师,主要从事生态与农业气象科研工作,Email: qysghy@163.com

收稿日期:2007 年 6 月 18 日;定稿日期:2008 年 1 月 12 日

## 2 结果分析

### 2.1 光照、积温、降水和产量的相关分析

表1列出了陇东地区冬小麦发育期间光、热、水3要素和产量有一定相关性的发育期和部分关键发育期相关系数<sup>[4]</sup>。从表中可以看出,孕穗至成熟期光照时数、大于等于0℃积温和产量相关显著,相关

系数分别达0.81( $P < 0.001$ )和0.69( $P < 0.01$ )。其中生长前期光、热和产量呈负相关关系,生长后期光、热和产量呈正相关关系。相比光照和积温,各发育期间和发育时段自然降水和产量的相关系数要小得多,拔节期为冬小麦需水关键期,降水量和产量相关显著,全生育期降水量和产量相关显著,与廉丽姝<sup>[5]</sup>的研究结果基本一致。

表1 陇东地区冬小麦部分发育期和发育时段光、热、水与产量相关系数

	三叶	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	开花	成熟	全生育期	播种—停止 生长	返青—孕穗	孕穗—成熟
光照	-0.21	-0.67	-0.53	-0.44	-0.13	0.74	0.64	0.39	0.00	-0.34	0.81
≥0℃积温	-0.14	-0.25	-0.71	0.71	-0.03	0.53	0.64	0.66	0.10	0.30	0.69
降水量	0.14	0.02	0.64	0.22	0.55	0.04	0.53	0.79	0.40	0.57	0.42

### 2.2 水分复合因子和产量关系

作物生长的水分来源于发育期自然降水、休闲期土壤水库蓄水、地下水和灌溉。本文研究的区域属黄土高原旱作农业区,没有灌溉条件,地下水位也较深,因此,发育期降水和休闲期土壤水库蓄水是作物生长的主要水分来源。根据罗其友<sup>[6]</sup>等研究,半湿润偏旱区,春播作物的耗水90%以上来自生育期间的降水。而冬小麦全生育期间的降水量仅为高产小麦需水量的1/4~1/2,需要消耗大量土壤贮水来弥补降水的不足。

为了全面反映冬小麦生长的耗水来源,本文选择上年晚秋和当年早春麦田2m土层土壤含水量代表秋、春土壤水库蓄水量,分别用 $H_{11}$ 和 $H_3$ 表示。组合了越冬开始至成熟期降水量( $R_1$ )与晚秋土壤水库蓄水之和( $R_1 + H_{11}$ )、返青至孕穗期降水量( $R_2$ )与早春土壤水库蓄水之和( $R_2 + H_3$ )、返青至孕穗期降水量( $R_2$ )与晚秋土壤水库蓄水之和( $R_2 + H_{11}$ )共3个水分复合因子,并用单因子和复合因子与产量进行相关分析。

相关分析结果显示(表2),水分复合因子与冬小麦产量的相关性均比单因子显著,其中返青至孕穗期降水量( $R_2$ )与早春土壤水库蓄水( $H_3$ )之和( $R_2 + H_3$ )最显著。

表2 土壤水库蓄水、自然降水及其复合因子与冬小麦产量的相关系数

$R_2 + H_3$	$H_3$	$R_2 + H_{11}$	$H_{11}$	$R_1 + H_{11}$	$R_1$	$R_2$
0.7977	0.4963	0.7349	0.5157	0.7043	0.5656	0.5718

注: $R_1$ 为越冬开始至成熟期降水量; $R_2$ 为返青至孕穗期降水量; $H_3$ 为3月8日2m土层含水量; $H_{11}$ 为11月8日2m土层含水量。

十 $H_3$ )最显著。单因子中,土壤水库蓄水和产量的相关性比生育期间降水显著,这说明陇东黄土高原土壤水库蓄水对冬小麦生长具有十分重要的意义。

### 2.3 生长势及其与产量的关系

关于农作物生长势目前还没有明确的定义,也没有规范的算法<sup>[7]</sup>。郭海英<sup>[8]</sup>等提出了以平方米叶面积和植株高度两个要素作为冬小麦等农作物生长势的基本参数,用某发育期平方米叶面积与植株高度之积表征该发育期的生长势,即以地表层1m<sup>3</sup>空间植株空间占有量表征该作物某发育期生长势,能很好地反映作物生长状况。表3列出了1995~2006年冬小麦停止生长期(幼苗生长盛期)、拔节期(营养生长盛期)、乳熟期(生殖生长盛期)等几个发育期的生长势和产量。从表中可以看出,冬小麦幼苗

表3 陇东地区冬小麦主要发育期生长势和产量

年份	越冬前 生长势	拔节期 生长势	乳熟期 生长势	产量 kg/hm <sup>2</sup>
1995	0.066	0.108	0.041	1058
1996	0.158	0.515	0.523	3248
1997	0.312	1.429	0.841	4146
1998	0.059	0.900	0.778	3225
1999	0.156	0.525	0.623	2682
2000	0.041	0.277	0.117	1280
2001	0.064	0.647	0.378	3675
2002	0.087	1.149	1.267	3830
2003	0.134	2.196	1.934	4720
2004	0.039	0.568	0.677	3741
2005	0.026	0.627	0.142	1520
2006	0.096	0.467	0.357	2535

注:发育期生长势=发育期平均叶面积×植株高度。

期生长势最弱,拔节期生长势最强,拔节期以后,随着营养生长向生殖生长的转化,生长势逐渐减弱,冬小麦全生育期生长势基本呈抛物线状。

生长势是作物在生长发育过程中生长状况、基本苗情动态的定量反映,因此生长势和作物产量之间有着必然的因果关系。相关分析表明,冬小麦越冬前、拔节期、乳熟期生长势和产量相关系数分别为0.474 ( $P < 0.1$ )、0.785 ( $P < 0.001$ )、0.828 ( $P < 0.001$ )。冬小麦幼苗期生长势和产量相关不显著,随着植株个体的逐渐增大,生长势和产量的相关性愈来愈显著,也就是说,越靠近成熟期,生长势对产量的形成越重要。

### 3 产量预报方程的建立

通过上述分析可以看出,生长后期光、热要素,需水关键期和全生育期降水量,水分复合因子,生长中、后期生长势等要素和产量相关显著,考虑到产量预测必须有一定的超前性,应尽量利用已知要素作为产量预报因子,加之光照和积温自相关程度较高、 $R_2 + H_3$  与  $R_2 + H_{11}$  自相关程度较高,最后选定因子为拔节期生长势( $X_1$ ),孕穗至成熟期光照( $X_2$ )和早春土壤水库蓄水与返青至孕穗期降水之和( $X_3$ ),建立冬小麦生长早期(4月中旬)产量( $Y_1$ )预报方程如下:

$$Y_1 = -175.92 + 70.20X_1 + 0.47X_2 + 0.25X_3 \quad (1)$$

$$R = 0.9239, F = 15.54, \text{远大于 } F_{0.01} = 5.95$$

选定乳熟期生长势( $X_1$ ),返青至孕穗期光照( $X_2$ ),早春土壤水库蓄水与返青至孕穗期降水之和( $X_3$ )建立冬小麦生长后期(6月上、中旬)产量( $Y_2$ )预报方程如下:

$$Y_2 = 68.70 + 85.24X_1 - 0.23X_2 + 0.38X_3 \quad (2)$$

$$R = 0.8893, F = 10.09, \text{远大于 } F_{0.01} = 5.95$$

选定乳熟期生长势( $X_1$ ),返青至孕穗期光照( $X_2$ ),全生育期降水量( $X_3$ ),建立冬小麦生长后期(6月上、中旬)产量( $Y_3$ )预报方程如下:

$$Y_3 = 169.75 + 73.93X_1 - 0.28X_2 + 0.40X_3 \quad (3)$$

$$R = 0.8806, F = 9.21, \text{远大于 } F_{0.01} = 5.95$$

### 4 方程检验

为了检验所建预报方程的准确率,对方程(1)~(3)预测产量与实际产量进行了拟合。图1为方程(1)~(3)的拟合曲线,可以看出3个方程的预测趋势基本一致,与实际产量的变化趋势也基本一致。

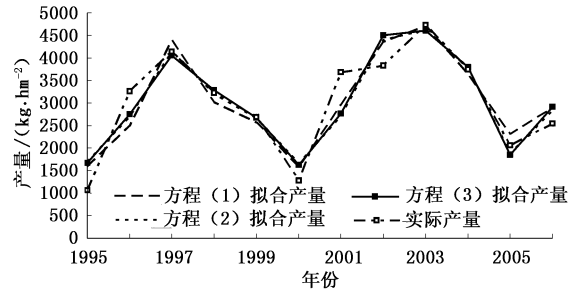


图1 陇东地区冬小麦预测产量与实际产量拟合曲线

通过2007年产量试预报,方程(1)预测产量为2550 kg/hm<sup>2</sup>,方程(2)预测产量为2535 kg/hm<sup>2</sup>,方程(3)预测产量为2580 kg/hm<sup>2</sup>,实际产量为2730 kg/hm<sup>2</sup>,准确率分别为93.4%、92.8%、94.5%。

### 5 结论与讨论

(1)陇东地区的冬小麦由营养生长进入生殖生长后对光温比较敏感,连阴雨天气造成的持续低温寡照天气将直接影响产量形成。拔节、抽穗等需水关键期降水量与产量相关显著,而孕穗期降水偏多,光照不足,不利于增加穗粒数,开花期降水量偏多不利于授粉,但孕穗期和开花期降水量总体上和产量的相关性不明显。

(2)冬前生长阶段陇东地区土壤含水量相对较高,冬小麦生理耗水较少、生态耗水较多、水分消耗对产量贡献较小,因此,收墒期要注意麦田的保墒蓄水,生产上要采取措施降低冬前和越冬期土壤水分损耗,最大限度保持土壤水库蓄水,做到秋雨春用,使土壤水库发挥节水调水作用,提高土壤水分利用率。

本文用作物某发育期的生长势作为单一的量化指标,代替作物生长状况评定的各种综合因素,概述陇东黄土高原主要农作物冬小麦生长势和产量的相关关系,力求用客观、科学、准确、定量的生态要素和对冬小麦产量形成至关重要的气象要素作为影响因子,综合预测冬小麦产量,为数字农业、生态农业在陇东黄土高原的推广进行了有益的探索。

## 参考文献

- [1] 苗复春,唐忠. 国以食为天,中国粮食问题的探讨与改革[M]. 南宁:广西师范大学出版社,1999.
- [2] 杨霏云,王建林. 晚稻单产动态预测方法研究[J]. 气象科技, 2005,33(5):433-436.
- [3] 国家气象局. 农业气象观测规范[M] (上卷). 北京:气象出版社,1993.
- [4] 郭海英. 陇东黄土高原光、热、水对冬小麦产量的贡献及水资源开发利用研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(6):128-131.
- [5] 廉丽姝. 山东省气候变化及农业自然灾害对粮食产量的影响[J]. 气象科技,2005,33(1):73-76.
- [6] 罗其友,姜文来,宫连英,等. 旱地农业决策基础研究[M]. 北京:气象出版社,1999:32-34.
- [7] 杨邦杰,裴志远. 农作物生长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报,1999,15(3):214-218.
- [8] 郭海英,杨兴国,黄斌,等. 陇东黄土高原主要农作物生长状况评定指标体系的建立[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(6):12-16.

## Method for Estimating Winter Wheat Yield with Meteorological and Ecological Factors

Guo Haiying<sup>1,3</sup> Wan Xin<sup>1,2</sup> Yang Xingguo<sup>1</sup>

(1 Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020;

2 Lanzhou Central Meteorological Office, Lanzhou 730020; 3 Xifeng Agricultural Meteorological Experimentation Station, Gansu Province, Qingyang 745000)

**Abstract:** The yield estimate equation of winter wheat considering different growth stages is established in the multiple linear regression method by means of such meteorological and ecological factors as sunlight and heat, moisture during the essential growth period of winter wheat, which are crucial to the yield formation of winter wheat in the loess plateau area of the eastern Gansu Province, as well as growth potential, a quantitative factor indicative of growing condition. It has an accuracy of over 92% in trial use. Unlike the traditional method of using single meteorological element to predict grain yields, the new method considered ecological factors and moisture, and gained satisfactory results.

**Key words:** winter wheat, yield estimate, meteorological factor, growth potential