

# 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究

刘增进<sup>1,2</sup>, 李宝萍<sup>2</sup>, 李远华<sup>3</sup>, 崔远来<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 2. 华北水利水电学院水利系, 郑州 450008; 3. 水利部中国灌溉排水发展中心, 北京 100053)

**摘要:** 针对不同水分处理对冬小麦产量和耗水特性的影响, 在大田生产条件下对冬小麦进行了非充分灌溉试验, 以冬小麦大田试验数据为基础, 采用最小二乘法拟合了冬小麦水分生产函数; 通过耗水资料的分析整理, 揭示了冬小麦的水分响应及耗水规律; 依据动态规划原理, 建立了冬小麦最优灌溉制度动态模型, 提出了两种水文年型(50% 和 75%)的冬小麦节水灌溉模式, 对北方冬麦区田间管理具有一定的指导意义。

**关键词:** 冬小麦; 水分生产函数; 耗水规律; 最优灌溉制度模型

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)04-0058-06

## 0 引言

水分是光合作用的原料之一, 缺乏时可使光合作用下降, 特别 C<sub>3</sub> 植物较为敏感, 缺水时冬小麦叶片气孔关闭, 影响 CO<sub>2</sub> 进入叶内, 干物质积累缓慢<sup>[1,2]</sup>。在大田生产条件下, 冬小麦生长发育所必须的环境条件: 光、热、水、气、养分中, 光、热资源主要是由冬小麦适应大自然而得到满足的, 水、气、养分一部分来自自然, 但主要还是依靠人们在田间生产和管理中给以供应和调节, 如灌溉和施肥。水分是冬小麦生产管理中首先要具备的基本条件<sup>[3,4]</sup>, 依据冬小麦各生理过程和各生育阶段对水分亏缺的敏感程度, 建立最优灌溉制度是农田水分管理的重要手段<sup>[5,6]</sup>。

在现代农业生产中, 人们最关心的是在适宜的农田水分条件下, 整个农业生产区单位灌溉水量所产生的经济利益。在水资源日益紧缺的今天, 研究冬小麦的耗水规律与最优灌溉制度, 提高水分生产率, 对北方冬麦区发展高效节水农业具有重要的指导意义<sup>[7]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试区概况及试验材料

冬小麦大田非充分灌溉试验是在黑龙港地区的岔河嘴灌区进行的。灌区位于河北省大名县境内, 主要水源是卫河过境径流, 卫河是季节性河流, 建有岔河嘴提水灌区, 灌区设计灌溉面积为 4667 hm<sup>2</sup>。根据土壤剖面调查, 试区内土壤耕作层 0~20 cm 为红壤土, 20~40 cm 为红土, 40~55 cm 为红砂壤土, 55~100 cm 为沙土, 100~250 cm 为红土。灌区多年平均降雨量 583.9 mm, 地下水多年平均埋深为 13 m, 属于半湿润半干旱地区。全年日照 2800 h, 大于 5℃ 积温 4 867.4℃, 多年平均无霜期为 197.3 d。灌区光热资源充分, 雨热同期,

土壤肥沃, 适宜发展粮食生产。供试冬小麦品种为高优 503, 生育期为 232 d。

### 1.2 冬小麦大田非充分灌溉试验设计

冬小麦大田非充分灌溉试验采用单因子 6 水平(0, 60, 120, 180, 240, 360 mm)和 2 重复设计, 布置了 11 个试验处理区, 试验小区面积为 0.013 hm<sup>2</sup> (10 m × 13 m); 1 小区为 0 灌水量, 2, 3 小区为 60 mm 灌水量(冬灌 1 水), 4, 5 小区为 120 mm 灌水量(冬灌、拔节灌 2 水), 6, 7 小区为 180 mm 灌水量(冬灌、拔节灌、乳熟灌 3 水), 8, 9 小区为 240 mm 灌水量(冬灌、拔节灌、乳熟灌、黄熟灌 4 水), 10, 11 小区为 360 mm 灌水量(冬灌 80 mm、返青灌 60 mm、拔节灌 60 mm、乳熟灌 80 mm、黄熟灌 80 mm, 5 水)。以取土烘干法计算冬小麦的耗水量, 每 10 d 测定土壤含水率一次, 雨后和灌溉后加测一次。每个试验小区选取土点 2 个, 取土深度为 0~20, 20~40, 40~60, 60~100 cm。小区四周用土工膜隔开, 土工膜埋深 2.5 m。试验小区采取定量施肥和同样的田间管理措施的处理方法, 冬小麦产量单打单收。采用自记雨量计记录降雨量, 依据长系列降雨频率分析的结果, 对有效降雨量进行分析处理, 确定某一年型的水分生产函数。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦水分生产函数拟合

#### 2.1.1 冬小麦灌水生产函数

文献[8]证明: 采用  $y = ax^2 + bx + c$  模型比较合理, 且拟合程度较好, 精度较高, 易于应用推广。根据田间试验数据, 采用最小二乘法拟合的灌水生产函数模型为

$$y = (-34.48 \times 10^{-3})x^2 + 27.46x + 640.704 \quad (1)$$

式中  $y$ ——冬小麦产量, kg/hm<sup>2</sup>;  $x$ ——灌水量, mm。

经一元方差分析计算, 灌水生产函数的均方差为 0.300, 复相关系数 0.9568。

#### 2.1.2 冬小麦阶段水分生产函数

基于 Blank 模型, 根据田间试验数据, 采用最小二

收稿日期: 2003-12-02 修订日期: 2004-04-11

基金项目: 国家自然科学基金研究项目(59479024, 59079380)

作者简介: 刘增进(1961-), 男, 河北省新乐人, 副教授, 博士生, 郑州 华北水利水电学院, 450008

乘法拟合的冬小麦阶段水分生产函数为

$$F = \max y_a / y_m = \max_{i=1}^5 A_i (ET_{ai} / ET_{mi})_i$$

$$= 0.00257ET_{a1} + 0.00598ET_{a2} + 0.0264ET_{a3}$$

$$+ 0.00224ET_{a4} + 0.00148ET_{a5} \quad (2)$$

式中  $Y_a$ ——实际产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $Y_m$ ——最大产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $A_i$ ——第  $i$  阶段的冬小麦缺水系数;  $ET_{ai}$ ——第  $i$  阶段冬小麦实际蒸发蒸腾量,  $\text{mm}$ ;  $ET_{mi}$ ——第  $i$  阶段冬小麦最大蒸发蒸腾量,  $\text{mm}$ 。

由 Blank 模型可见,  $A$  值的高峰出现在返青拔节期和拔节孕穗期, 其次是抽穗乳熟期和播种返青期, 乳熟成熟期相对不敏感。因此, 冬小麦的需水关键期是冬小麦水分生理特性及气象条件综合作用的结果。由于冬小麦对水分亏缺的反应存在着滞后效应, 前一周的缺水会在后一周才有反应, 过短的阶段划分将把实际缺水和冬小麦对水分亏缺的反应放在两个不同的阶段考虑, 不便于实际问题的解决<sup>[9]</sup>; 冬小麦从播种到返青, 时间长达 140 d 左右, 这段时间为冬小麦营养生长阶段, 主要是分蘖、长叶和盘根, 日耗水量相对较少, 基本维持在 0.2~0.9 mm 之间, 为了计算方便并与 Blank 模型的阶段划分一致, 将这两个生育期合并为一个生育期。因此, 冬小麦阶段水分生产函数(Blank 模型)的阶段划分数目取为 5 个阶段。

### 2.1.3 多年冬小麦耗水生产函数

把黑龙江冬小麦灌溉试验站十几年耗水量与产量的试验资料(样本容量为 137 个)进行统计分析对比, 采用最小二乘法拟合的多年冬小麦耗水生产函数为

$$y = (-30.61 \times 10^{-3})x^2 + 29.71x - 1825.38 \quad (3)$$

式中  $x$ ——耗水量,  $\text{mm}$ 。

经一元方差分析计算, 耗水生产函数的均方差为 35.41, 复相关系数 0.8312。

## 2.2 冬小麦耗水规律

### 2.2.1 有效降水量的计算

对于旱作物而言, 有效降水量是指降水后存留在作物根系吸水层内的降水入渗量, 根系层以下的深层渗漏量及地表径流量为无效降水量, 由于降水过程的蒸发损失相对较少, 计算时可以不计, 即

$$P_0 = P - S - F \quad (4)$$

式中  $P_0$ ——有效降水量,  $\text{mm}$ ;  $P$ ——降水量,  $\text{mm}$ ;  $S$ ——地表径流量,  $\text{mm}$ ;  $F$ ——深层渗漏量,  $\text{mm}$ 。

采用实测资料计算时, 有效降雨量为降雨前后计算土层深度内土壤储水量的差值, 即

$$P_0 = 10\gamma H(\theta_1 - \theta_2) \quad (5)$$

式中  $\gamma$ ——计划湿润层土壤平均容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ——降雨前、后计划湿润层土壤含水率, 以占干土重的百分数计;  $H$ ——计划湿润层深度,  $\text{cm}$ , 计算时取 100  $\text{cm}$ 。

### 2.2.2 耗水量计算

采用测定土壤含水率计算作物耗水量时, 耗水量的计算公式为

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{1i} - \theta_{2i}) + M + P_0 + K \quad (6)$$

式中  $ET_{1-2}$ ——阶段耗水量,  $\text{mm}$ ;  $i$ ——土壤层次号数;  $n$ ——土壤层次总数;  $\gamma_i$ ——第  $i$  层土壤干容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $H_i$ ——第  $i$  层土壤厚度,  $\text{cm}$ ;  $\theta_{1i}$ ——第  $i$  层土壤时段初的含水率, 以占干土重的百分数计;  $\theta_{2i}$ ——第  $i$  层土壤时段末的含水率, 以占干土重的百分数计;  $M$ ——时段内的灌水量,  $\text{mm}$ ;  $K$ ——时段内的地下水补给量,  $\text{mm}$ , 当地下水埋深大于 2.5  $\text{m}$  时, 可以不计。

耗水量计算采用田间 11 个试验的试验资料, 把冬小麦按生育期分成 5 个生育阶段, 从播种到收获逐日逐阶段进行土壤含水量计算, 并逐日逐阶段进行有效雨量分析, 然后计算阶段耗水量和全生育期冬小麦的耗水量, 计算结果见表 1。

表 1 冬小麦耗水量表

Table 1 Water consumption of winter wheat

试验序号	生育期/d					全生育期 /mm	产量 /kg·hm <sup>-2</sup>	水分生产率 /kg·m <sup>-3</sup>
	播种-返青	返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-乳熟	乳熟-成熟			
1	27.4	32.7	28.4	33.8	66.5	188.8	1762.5	0.93
2	86.7	34.9	43.9	43.9	42.8	268.5	2362.5	0.87
3	110.7	65.4	79.9	55.1	80.6	391.5	4425.0	1.51
4	98.7	51.9	107.8	87.2	117.9	598.7	6675.0	1.43
5	95.6	64.5	89.3	50.1	82.5	382.4	5325.0	1.39
6	91.8	51.6	99.7	52.1	79.1	378.5	5212.5	1.37
7	61.5	50.4	48.3	51.1	103.8	314.9	4687.5	1.48
8	110.5	69.6	46.4	48.7	66.1	339.8	5775.0	1.69
9	96.5	50.9	36.4	47.3	103.9	320.7	4837.5	1.55
10	122.2	97.4	70.7	49.1	90.2	429.4	6075.0	1.41
11	105.3	54.4	36.8	30.2	42.9	329.7	5700.0	1.72
平均天数/d	140	31	21	19	21	232		

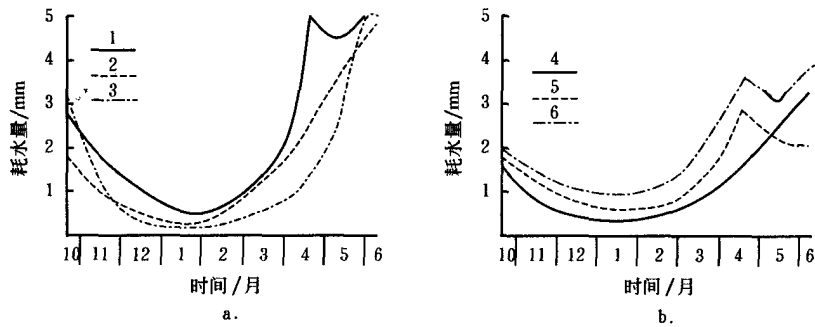
### 2.2.3 冬小麦耗水量变化幅度及规律

冬小麦全生育期的耗水量包括生理耗水和生态耗

水两部分, 冬小麦全生育期耗水活动是一个极其复杂的生物活动, 其耗水量的大小及变化规律受气象条件(光

照、温度、湿度、风速、气压等)、冬小麦品种特性、土壤质地以及农业技术措施等因素的影响, 这些影响因素之间的关系是错综复杂的。

根据表 1 的计算结果绘出的冬小麦日耗水量曲线如图 1 所示。



曲线 1, 2, 3, 4, 5, 6 分别为采用 1, 2, 3, 4, 5, 6 水平时试验小区中冬小麦日耗水曲线

图 1 冬小麦日耗水曲线

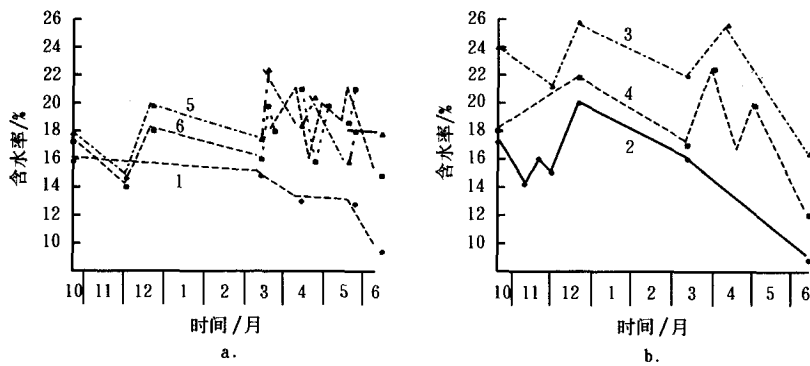
Fig 1 Water consumption curve of winter wheat

从图 1 可以看出, 冬小麦全生育期耗水量在不同灌水量时变化较大, 在同一灌水处理中, 不同生育阶段的耗水量变化较大。全生育期耗水量为 189~ 463.7 mm, 其值具有时空变化性。耗水最多的阶段为拔节抽穗、抽穗乳熟、乳熟成熟这三个阶段, 耗水量占总耗水量的 78% 左右。播种初期到越冬期冬小麦植株蒸腾耗水较少, 主要是株间土壤蒸发, 此时日耗水量为 0.9~ 1.5 mm, 阶段耗水量 27~ 67.5 mm。返青拔节期, 气温升高, 植株增高增大, 耗水量剧增; 随地面覆盖度增大, 株间土壤蒸发相对减少, 日耗水量为 0.5~ 2.7 mm, 阶段耗水量为 37.5~ 90 mm。抽穗前后冬小麦生殖生长和

营养生长很旺盛, 此时耗水量最大, 日耗水量为 5~ 6 mm, 阶段耗水量为 60~ 150 mm; 收获期, 随着夏天的到来和气温的迅速升高, 耗水量达到高峰, 以株间土壤蒸发为主, 日耗水量 5.3~ 6.3 mm, 阶段耗水量 60~ 105 mm。

#### 2.2.4 土壤有效水分储量及其变化规律

土壤具有蓄积水分, 长期保存, 调节和持续供应冬小麦耗水的功能。土壤的这种蓄水调节作用, 对缓解降水分布不均所造成的干旱具有重要作用。田间土壤含水率的变化速度在冬小麦各生育阶段变化较大, 如图 2 所示。



曲线 1, 2, 3, 4, 5, 6 分别为采用 1, 2, 3, 4, 5, 6 水平时试验小区中麦田含水率变化曲线

图 2 麦田含水率变化曲线

Fig 2 Soil water content of winter wheat field

从图 2 可以看出以拔节期和乳熟期最大, 每日土壤含水率降低 0.45%~ 0.60%, 其次是苗期, 每日土壤含水率变化 0.2%~ 0.3%。越冬到返青期间土壤含水率变化不大, 每日土壤含水量变化为 0.05%~ 0.10%。在不同的灌溉定额下, 收获时土壤含水率的实测值也不同, 0 灌水为 9.2%。灌 2, 3, 4 水为 12% 以上。播前灌水不足, 后期收获时的土壤含水率也较低。冬小麦返青前土壤有效水分含量较高, 占田间持水量的 70% 以上, 基本上适宜冬小麦生长发育的要求。返青后耗水量增加,

降水量少, 土壤有效水量明显减少, 特别是 4~ 5 月份, 冬小麦正处于需水关键期, 土壤含水量远低于适宜含水量下限。土壤有效水分含量的这种季节变化规律说明春旱影响严重, 4~ 5 月份对冬小麦进行补充灌溉或非充分灌溉非常必要。

#### 2.2.5 麦田实际耗水量的组成

麦田水分消耗主要是植株蒸腾和土壤蒸发, 冬小麦全生育期内的植株蒸腾约占腾发量的 60%~ 70%, 土壤蒸发量约占 30%~ 40%。越冬前麦苗幼小, 麦地裸露

大, 以土壤蒸发为主。返青以后, 冬小麦叶面系数逐渐增加, 植株蒸腾逐渐成为麦田的主要耗水。成熟以后, 冬小麦逐渐黄熟, 这时以土壤蒸发为主。

冬小麦实际耗水量由土壤含水量、降水量和灌水量组成。越冬开始, 土壤供水量在耗水量中占的比重最大, 占阶段耗水量的 70% 左右。虽然冬小麦全生育期内降水量只能满足耗水量的 45.6%, 需水关键期降水只能满足需水量的 15% 左右, 由于土壤贮水的保障作用, 大大改善了麦田水分条件, 大大减轻了水分供需矛盾。

### 2.2.6 冬小麦缺水敏感期

通过冬小麦耗水规律的分析及 Blank 模型中缺水系数  $A$  值的大小, 冬小麦缺水敏感期为: 第一是拔节期抽穗期, 第二是抽穗乳熟期, 第三是越冬前的分蘖期。

## 3 冬小麦最优灌溉制度动态模型

把冬小麦全生育期划分为 5 个生长阶段, 采用二维动态规划方法, 以水分生产函数为依据, 将冬小麦对灌水效应的众多因素综合简化到动态模型中去<sup>[10]</sup>。在一定的灌溉定额下, 以产量最大化为目标建立灌溉制度的优化动态数学模型。

### 3.1 冬小麦最优灌溉制度动态模型建立

#### 3.1.1 阶段变量

阶段变量以冬小麦的自然生育阶段为顺序编号, 即: 播种—返青, 返青—拔节, 拔节—抽穗, 抽穗—乳熟, 乳熟—成熟 5 个阶段,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ , 其编号与冬小麦生育阶段编号一致。

#### 3.1.2 决策变量

决策变量为各生长阶段的灌水量  $m_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

#### 3.1.3 状态变量

状态变量有 2 个: 第  $i$  阶段初用于分配的有效灌溉水量  $q_i$ , 第  $i$  阶段初计划湿润土层内可供作物利用的土壤含水量  $W_i, W_i$  是土壤含水率的函数, 即

$$W_i = 10YH(\theta - \theta_0) \quad (7)$$

式中  $W_i$ ——第  $i$  阶段初计划湿润土层内可供作物利用的土壤含水量, mm;  $Y$ ——土壤容重,  $g/cm^3$ ;  $H$ ——第  $i$  阶段土壤计划湿润层深度, cm;  $\theta$ ——第  $i$  阶段计划湿润层内土壤平均含水率, 以占干土重的百分数计, %;  $\theta_0$ ——土壤含水率下限, 以占干土重的百分数计, %。

#### 3.1.4 系统方程

系统方程有 2 个: 水量分配方程, 若对第  $i$  个生长阶段采用决策  $m_i$  时, 可表达如下

$$q_{i+1} = q_i - m_i \quad (8)$$

式中  $q_i, q_{i+1}$ ——第  $i, i+1$  阶段初可用于分配的水量, mm;  $m_i$ ——第  $i$  阶段的灌水量, mm。土壤计划湿润层内的水量平衡方程, 可写成

$$W_{i+1} = W_i + P_{0i} + m_i - ET_{ai} \quad (9)$$

式中  $W_{i+1}, W_i$ ——第  $i, i+1$  阶段初土壤含水量, mm;  $P_{0i}$ ——第  $i$  阶段有效降水量, mm;  $ET_{ai}$ ——第  $i$  阶段冬小麦耗水量, mm。

### 3.1.5 目标方程

本模型的目标是在灌水量一定时产量的最大化。采用 Blank 提出的在供水不足条件下需水量和实际作物产量的模型, 目标函数为单位面积的实际产量与最高产量的比值最大化。

$$F = \max y_a / y_m = \max_{i=1}^5 A_i (ET_{ai} / ET_{mi}) \quad (10)$$

### 3.1.6 约束条件

决策条件:

$$0 \leq m_i \leq q_{i+1} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (11)$$

$$m_i \leq Q \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

式中  $Q$ ——可用于分配的总水量, mm。

土壤水量约束:

$$W_{\min} \leq W_i \leq W_{\max} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (13)$$

式中  $W_{\max}$ ——土壤含水量上限, mm;  $W_{\min}$ ——土壤含水量下限, mm。

$$\theta_0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (14)$$

式中  $\theta_0$ ——土壤含水率上限, mm, 以占干土重的百分数计, %。

### 3.1.7 初始条件

冬小麦播种时田间土壤含水量  $W_0$  为

$$W_0 = 10YH(\theta_0 - \theta_0) \quad (15)$$

式中  $W_0$ ——播种时田间土壤含水量, mm;  $\theta_0$ ——土壤初始含水率, 以占干土重的百分数计, %。

第 1 阶段初可用于分配的水量为冬小麦全生育期的灌水量

$$q_1 = Q \quad (16)$$

### 3.2 冬小麦最优灌溉制度模型求解

由状态方程和目标方程得冬小麦最优灌溉制度模型的递推方程为

$$f^*(q_i, w_i) = \max \{ (A_i ET_{ai} / ET_{mi}) f_{n+1}^*(q_{i+1}, w_{i+1}) \} \quad (17)$$

$$f^*(q_i, w_i) = \max \{ A_i ET_{ai} / ET_{mi} \} \quad (18)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5$$

式中  $f(q_{i+1}, w_{i+1})$ ——当前阶段状态为  $q$  和  $w$ , 决策为  $m$  时, 其后阶段 ( $i+1, N$  阶段) 的最大相对产量。

## 4 应用实例

### 4.1 最优灌溉制度模型计算结果

输入岔河嘴灌区的基本数据(见表 2), 采用动态规划逐次渐进法求解冬小麦最优灌溉制度模型, 并编制和运行冬小麦最优灌溉制度计算程序, 计算结果见表 3。

表 2 基本数据表

Table 2 Basic testing data

项目	阶段				
	1	2	3	4	5
A	0.1690	0.2073	0.1897	0.1300	0.1162
E	65.77	34.65	71.89	58.14	78.66
P	9.41	4.40	17.41	21.34	12.07

表 3 计算结果表

Table 3 Calculated results

灌溉定额 /mm	阶段					$Y_a/Y_m$
	1	2	3	4	5	
0	0	0	0	0	0	0.3466
75	75	0	0	0	0	0.6428
150	75	75	0	0	0	0.7747
225	75	75	75	0	0	0.9032
300	75	75	75	75	0	0.9064
375	75	75	75	75	75	0.9398

本模型目标函数中包含了缺水系数 $A$ 值大小的权重。一般情况下,由灌水试验求得的缺水系数 $A$ 可以反映出作物生育期关键水的时段,从水量平衡方程及耗水规律和试验结果来看,上时段末的土壤含水量必然影响本时段的作物实际蒸腾量,本阶段为需水关键期,出现 $A$ 值偏小的现象。如第1阶段 $A$ 值较小,冬小麦在播种时的土壤墒情必然影响冬小麦在第1阶段的实际蒸腾量,第1阶段也是需水关键期,本模型正好反映了这个规律,与大田实测结果比较吻合,见表4。

表 4  $Y_a/Y_m$  结果对比表Table 4 Comparison of  $Y_a/Y_m$  results

项 目	灌溉定额/mm					
	0	75	150	225	300	375
实测结果	0.2640	0.3539	0.8112	0.8343	0.8988	0.9120
计算结果	0.3466	0.5114	0.3814	0.7309	0.8122	0.9173
优化结果	0.3466	0.6428	0.7747	0.9031	0.9064	0.9298

#### 4.2 冬小麦节水灌溉模式

由于岔河嘴灌区是在季节性河流上提水灌溉的,水资源时空分布存在不确定性,以及河道来水的季节性与作物生长需水在时空上存在矛盾,因此,在不同降水年型中,不同的灌溉制度条件下产生不同的产量和相应的水分利用效率。根据冬小麦生育期降水频率分析和卫河来水过程分析,参照典型年降水量,分 $P=50\%$ 和 $P=75\%$ 两种水文年型考虑。以岔河嘴灌区实际来水情况和最优灌溉制度动态模型求解的结果(见表3)为依据,制定了典型年冬小麦节水灌溉的推广模式。在50%水文年型时,冬小麦灌水模式为:播前灌、冬灌、拔节灌3水,灌溉定额为60,80,60mm。在75%水文年型时,冬小麦灌水模式为:播前灌、冬灌、拔节灌、抽穗灌4水,灌溉定额为60,80,60,60mm。

## 5 结 论

依据冬小麦大田非充分灌溉试验资料,采用最小二

乘法拟合的灌水生产函数、阶段生产函数、多年耗水生产函数比较合理,且拟合程度较好,精度较高,易于推广应用。

依据冬小麦大田非充分灌溉试验资料,对冬小麦耗水量变化幅度及规律和麦田有效水分储量及其变化规律进行了系统的研究和展延,其结果具有较好的使用价值。

冬小麦拔节至孕穗期叶面系数最大,此阶段耗水强度最大,Blank模型中缺水系数 $A$ 值也最大,本阶段为需水关键期,与实际情况相符;冬灌期冬小麦对水分亏缺相对敏感,此时入境水量较多,灌区普遍进行冬灌。

应用实例中,冬小麦最优灌溉制度模型是基于岔河嘴灌区的自然条件及特定水文年型下冬小麦大田非充分灌溉试验资料的基础上建立的,实例计算结果表明,模型合理可行,其计算方法和计算结果对北方其他灌区同样有指导意义。

以岔河嘴灌区实际来水情况和最优灌溉制度动态模型求解的结果为依据,制定的典型水文年的冬小麦节水灌溉推广模式简便易行,便于农户掌握。总之冬小麦灌水模式是比较复杂的问题,必须因地制宜,研究它可以产生显著的经济效益。

#### [参 考 文 献]

- [1] Raven P H. Biology (sixth edition) [M]. New York: Mc Rurr Ridge, 2002
- [2] Luning R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for  $C_3$  plant [J]. Plant Cell Environ. 1995, (18): 339- 355
- [3] English M, Raja S N. Perspectives on deficit irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1996, (32): 1- 14
- [4] 于振文,田奇卓,潘庆民,等.黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J].作物学报,2002,28(5): 577- 585
- [5] 张寄阳,康绍忠,孙景生.霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度[J].农业工程学报,2000,16(4): 50- 54
- [6] 张喜英,裴冬,由懋正.太行山前平原冬小麦优化灌溉制度的研究[J].水利学报,2001,(1): 90- 95
- [7] 钱蕴璧,李英能,杨刚,等.节水农业技术研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002
- [8] 王康,沈荣开.作物水分与氮素生产函数的实验研究[J].水科学进展,2002,13(3): 308- 311
- [9] 崔远来,茆智,李远华.水稻水分生产函数时空变异规律研究[J].水科学进展,2002,13(4): 484- 491
- [10] 崔远来,李远华.作物缺水条件下灌溉供水量最优分配[J].水利学报,1997,(3): 37- 42

## Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat

Liu Zengjin<sup>1,2</sup>, Li Baoping<sup>2</sup>, Li Yuanhua<sup>3</sup>, Cui Yuanlai<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Water Conservancy, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China;

3. National Center of Irrigation and Drainage Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** A field non-full irrigation experiment was carried out to investigate the effects of different water supplies on the winter wheat yield and water consumption characteristics at different growth stages in winter wheat growing season under field production condition. Based on the experimental data of winter wheat in the fields, the water production function of winter wheat is fitted with least square method. Both the water use effect and the rule of water consumption are disclosed through the analysis of water consumption data. According to the principle of dynamic planning, the dynamic model for optimal irrigation schedule is developed. The best irrigation pattern of two different hydrological years (50% and 75%) is presented, which provides references for field practice in North China Plain.

**Key words:** winter wheat; water production function; rule of water consumption; model for optimal irrigation schedule