

# 基于土壤-作物系统模拟模型的冬小麦田间水氮优化管理

陈 研, 胡克林, 冯 凌, 李保国\*

(中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 将作物生长模型与土壤水氮管理过程模块相结合, 构建了土壤-作物系统水分养分模拟模型。以灌水、施氮总量为决策变量, 冬小麦生物量、水分和氮肥利用效率为优化目标, 将冬小麦按生长发育时期分为 6 个阶段, 建立了多目标的动态规划模型。在土壤-作物系统过程模型的基础上, 用动态规划的方法对田间水、氮资源管理措施进行优化。通过对作物水分胁迫系数和氮肥胁迫系数的模拟计算, 可获得最佳的灌水、施肥时间及用量。算例结果表明: 在养分供应充足仅水分胁迫的条件下, 优化方案的灌水量较对照处理平均节约了 25%, 水分利用效率比对照处理平均高出约 12%。在水分和养分均胁迫的条件下, 优化方案的灌水量较对照处理平均节约了 12%, 水分和氮肥利用效率分别比对照处理提高了约 13% 和 16%。

**关键词:** 作物生长模型; 动态规划; 优化; 冬小麦

中图分类号: S31; S521.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)6-0055-06

陈 研, 胡克林, 冯 凌, 等. 基于土壤-作物系统模拟模型的冬小麦田间水氮优化管理[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 55-60.

Chen Yan, Hu Kelin, Feng Ling, et al. Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 55-60. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

为了最大程度地减少资源的浪费和对环境的污染、提高农田水肥资源的利用效率以及提高作物产量和品质, 就必须对土壤-作物系统的水分、养分运动与转化规律进行精确定量化的研究, 通过研究主要农作物的生长过程及其与土壤的交互作用, 建立土壤-作物系统整合模型, 为农业节水、合理施肥提供理论依据。

目前, 国内外所做的水肥管理研究中, 对于土壤水肥管理措施的实施大多是在试验前就已经制定了详细的管理方案, 或根据实测的土壤水分、养分状况来进行管理<sup>[1,2]</sup>, 而根据土壤水分、养分运移转化模型计算出来的土壤水分、养分动态状况来进行优化管理的研究还不多见。也有一些研究者试图通过设置大量的水肥处理, 来获得较优的管理方案<sup>[3]</sup>, 但由于田间条件的复杂性及气候的多变性, 这种方法在推广时也有局限性。因此, 将土壤水分和养分运移转化模型和优化模型相结合, 在试

验前进行数值模拟实验, 从而找到一个比较理想的管理方案, 通过与传统管理结果进行比较, 可以对优化管理结果进行评价。本文以作物高产、资源高效利用为研究目标, 根据作物经济产量和土壤水氮资源利用效率与灌水量和施氮量之间的函数关系, 先将土壤水氮过程模型和 PS123 模型进行整合, 在此基础上用动态规划方法对田间水、氮资源管理措施进行优化。

## 1 基本原理

### 1.1 作物生长模型——PS123 模型

1965 年, 荷兰的作物生长系统分析及模拟先驱 de Wit 教授首先在计算机上实现了对作物冠层光合作用的模拟, 在以后的几十年时间里, 众多的研究者建立了大量的作物生长模型, 并在很多领域得到了广泛的验证和应用<sup>[4]</sup>。其中以 PS123 模型为代表, 该模型是荷兰 Wageningen 大学土壤地质系 Driessen 教授等人开发的用于量化土地生产力评价的普适模型, 模型的机理与 BACROS、SUCROS 及 MACROS 等作物生长过程的模拟一样, 可以用来进行小麦、玉米、粟类及棉花等多种作物生产模拟的生长模型, 强调了作物生产力水平的层次性。其中, PS1 模型模拟作物光温生产潜力, 并假定水分、养分等非气候因子不影响作物的生长; PS2 模拟水分限制条件下的作物生产力, 并假定除气象和水分外的其他因子不影响作物的生长; PS3 计算实现目标产量 (PS1 和 PS2 下的作物生产力) 所需的施肥量<sup>[5]</sup>。PS123

收稿日期: 2006-09-14 修订日期: 2007-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40401025 和 30390080); 长江学者和创新团队发展计划 (IRT0412) 资助

作者简介: 陈 研 (1957-), 女, 吉林长春人, 副教授, 主要从事资源环境领域中的数学模型的研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。Email: chenyan\_num@yahoo.com.cn

\*通讯作者: 李保国 (1964-), 男, 山西襄汾人, 博士, 教授, 主要从事资源环境信息技术的研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。Email: libg@cau.edu.cn

模型的基本原理和计算过程详见文献[5]。该模型具有普适性、参数要求较少以及多种输出功能的特点,在中国的一些地方得到了验证,具有较好的适用性<sup>[6,7]</sup>。

## 1.2 动态规划方法

动态规划是运筹学的一个分支,是求解多阶段决策过程(Multistep decision process)的数学方法。其方法在于先将问题的过程分成相互联系的几个阶段,恰当地选取状态变量和决策变量以及定义最优值函数,从而把一个大大问题化成一族同类型的子问题,然后逐个求解<sup>[8]</sup>。国内外学者用动态—多目标规划的方法在作物的水、氮管理措施方面作了一定的探索性研究,为科学、合理地指导农业生产,以获得更高的经济效益提供了基础<sup>[9-11]</sup>。

## 1.3 PS123 模型的修正和发展

PS123 模型主要的计算过程有:生长发育进程,光合生产量,干物质分配,维持呼吸量,各器官净增重,叶面积指数等<sup>[4,5]</sup>。原模型 PS2 水平中水分运动采用了平衡模型,虽然避开了一些土壤水物理参数,计算相对简单,但是某些分量难以准确确定,精度不够高,而 PS3 水平上只能做一些静态或部分动态模拟。因此,本文对 PS2 和 PS3 模型进行了部分修改,用土壤水动力学和溶质运移模型来计算水分影响因子  $cf(Water)$  和养分影响因子  $cf(N)$ , 该模型的建立及验证见相关文献[12]。

### 1.3.1 水分影响因子的计算

在改进的 PS2 模型中,根据气象资料计算得到了作物的潜在蒸腾速率( $T_p$ , mm/d),用土壤水动力学模型计算了土壤水分胁迫条件下的作物实际蒸腾速率( $T_a$ , mm/d),则水分影响因子可表示为<sup>[12]</sup>

$$cf(Water) = T_a/T_p \quad (1)$$

### 1.3.2 氮肥影响因子的计算

在改进的 PS3 模型中,参考 Daisy 模型<sup>[14]</sup>,氮肥影响因子可表示为

$$cf(N) = \frac{TANC - TMNC}{TNNC - TMNC} \quad (2)$$

式中  $TANC$ ——作物地上部实际含氮量, kg/kg;  $TNNC$ ——作物地上部氮胁迫临界含氮量, kg/kg;  $TMNC$ ——作物地上部最小含氮量, kg/kg。

## 1.4 基于土壤-作物系统模拟模型的田间水氮优化管理的实现

### 1.4.1 阶段变量

通过对小麦吸氮耗水规律的分析,将小麦全生育期按生育阶段划分为  $T$  个阶段,将作物生育阶段数作为阶段变量  $t(t = 1, 2, \dots, T)$ 。

### 1.4.2 状态变量

在本模型中,状态变量确定为:

- 1)  $t$  阶段可用于分配的灌水量  $WQ_t$ (mm);
- 2)  $t$  阶段可用于分配的氮肥施用量  $NQ_t$ (kg/hm<sup>2</sup>);
- 3)  $t$  阶段冬小麦各器官的生物量  $S(org)_t$ (kg/hm<sup>2</sup>)。

### 1.4.3 状态转移方程(系统方程)

- 1) 水量分配方程

$$WQ_{t+1} = WQ_t - Wd_t \quad (3)$$

- 2) 肥量分配方程

$$NQ_{t+1} = NQ_t - Nd_t \quad (4)$$

- 3) 各器官生物量的变化

$$S(org)_{t+1} = S(org)_t + S(org)d_t \quad (6)$$

式中  $Wd_t$ —— $t$  阶段初的灌水分配量, mm;  $Nd_t$ ——施氮的分配量, kg/hm<sup>2</sup>;  $S(org)d_t$ —— $t$  阶段内各器官生物量的增加量, kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.4.4 目标函数

以小麦生物量(总干物质)、水分利用效率( $WUE$ )及氮肥利用效率( $FNUE$ )为目标,三者共同成为衡量灌水、施肥决策优劣的尺度,目标函数为

$$\begin{cases} \max \text{ 干物质质量} \\ \max WUE \\ \max FNUE \end{cases} \quad (6)$$

土壤水、氮资源利用效率( $WUE$  和  $FNUE$ ) 具体可定义为消耗单位土壤水分(氮肥)所生产的经济产量。水分消耗量包括蒸腾、蒸发、渗漏和径流等,一般农田可忽略径流项;即水分消耗量  $W_{con} = ET_a + D$ ,  $D$  是水分渗漏量。 $ET_a$  的计算:先用 FAO 推荐的 Penman-Montheith 公式<sup>[18]</sup>计算出参考作物潜在蒸散量  $ET_0$  和农田实际作物潜在蒸散量  $ET_p$ , 然后采用 CERES 模型<sup>[19]</sup> 中的经验公式计算潜在蒸发  $E_p$  和潜在蒸腾  $T_p$ , 进一步通过水分胁迫系数计算出实际蒸发  $E_a$  和实际蒸腾  $T_a$ <sup>[12]</sup>。水分渗漏量  $D$  由土壤水动力学模块计算得到。

PS123 模型的基本核心是作物在生长过程中将光合产物按一定比例分配给作物的各个器官,从而完成干物质的累积。由于作物各器官干物质的增加量同水分胁迫系数  $cf(Water)$  和氮胁迫系数  $cf(N)$  的乘积成正比。因此,式(6)可改写为

$$\begin{cases} \max \sum [S(org)_t \times cf(Water) \times cf(N)] \\ \max \frac{\text{经济产量 } Y}{W_{con}} \\ \max \frac{\text{经济产量 } Y}{N_{fert}} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $S(org)_t$ ——第  $t$  阶段无水分和养分胁迫下的各器官干物质量, kg;  $N_{fert}$ ——氮肥施用量, kg/hm<sup>2</sup>。

在作物生长前期, 由于没有形成产量(果实部分的出现往往都在冬小麦开始生长 100 d 以后), 目标函数只需考虑式(7)中第一个函数。在果实出现后, 对于特定作物品种来说, 收获指数是一定的, 即作物总的干物质量与经济产量成正比, 从而得到经济产量。

#### 1.4.5 基本方程

根据动态规划的最优化原理和目标函数式, 采用顺序递推方法求解时的递推方程为

$$f_k(WQ_{k+1}, NQ_{k+1}, S(org)_{k+1}) = \max[v_k(Wd_k, Nd_k) + f_{k-1}(WQ_k, NQ_k, S(org)_k)] \quad k = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

式中  $f_k(WQ_{k+1}, NQ_{k+1}, S(org)_{k+1})$ ——第  $k$  阶段状态为  $WQ_{k+1}, NQ_{k+1}, S(org)_{k+1}$  时, 相对于始点的最优指标函数值;  $v_k(Wd_k, Nd_k)$ ——第  $k$  阶段状态为  $WQ_{k+1}, NQ_{k+1}, S(org)_{k+1}$  取决策为  $Wd_k, Nd_k$  时对本阶段的阶段效益值。

#### 1.4.6 初始条件

- 1) 初始阶段可供灌溉的有效水量  $WQ_1$ (mm);
- 2) 初始阶段可供分配的氮肥施用量  $NQ_1$ (kg/hm<sup>2</sup>);
- 3) 初始阶段冬小麦的生物量(包括叶、根、茎、穗各自的生物量)  $S(org)_1$ (kg/hm<sup>2</sup>)。

#### 1.4.7 约束条件

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T Wd_t \leq WQ_1 \\ \sum_{t=1}^T Nd_t \leq NQ_1 \\ 0 \leq Wd_t \leq W_{\max} \\ 0 \leq Nd_t \leq N_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

由于在具体的问题中, 决策变量的取值往往限制在某一范围内, 此范围称为允许决策集合。在本研究中规定, 每次进行田间管理时, 一次性灌水量最大值为  $W_{\max} = 160$  mm, 即灌水允许决策集合为  $0 \sim 160$  mm; 一次性施氮量最大值  $N_{\max} = 220$  kg/hm<sup>2</sup>, 施肥允许决策集合为  $0 \sim 220$  kg/hm<sup>2</sup>。

## 2 算例

试验设在中国农业大学河北曲周实验站东, 一块面积约 0.3 hm<sup>2</sup>、土壤为粉砂质潮土的田块上, 该地小麦-玉米一年两作。大田试验设置了不同水分(灌溉量、灌溉水质)、不同施肥水平和当地目前使用的主要品种及不同播种时期的试验, 以期得到不同水肥管理条件下作物的生长性状和主要品种的参数<sup>[6, 15, 16]</sup>。每个小区面积为

27 m<sup>2</sup>, 重复 3 次。

田间观测的主要项目包括气象、作物、土壤、田间管理措施等。采用自动气象站记录气象数据。在 4 个土壤剖面分别安装了溶液提取器和负压计, 并安装有中子管和地下水观测孔以及热敏电阻温度计; 每周测定一次, 并在降雨后和灌溉前后进行加测。冬小麦品种为邯 5316, 播种日期为 1999 年 10 月 9 日, 收获日期为 2000 年 6 月 5 日, 每个小区取样的植株数量为 20 株, 测定了作物主要生育期的株高, 叶面积指数, 根、茎、叶和穗的生物量, 比叶面积, 扎根深度, 作物吸氮量并考种测产<sup>[15, 16]</sup>。

在该实验地, 已经开展了相关的土壤水氮迁移转化模型和作物生长模型 PS123 的验证及应用研究, 并有相关的文章发表<sup>[6, 15-17]</sup>。因此, 验证本模型的主要参数的取值详见相关文献[15]和[17]。

通过对 1997~1998 年冬小麦耗水、吸氮规律的分析, 将 1999~2000 年冬小麦的生育期划分为 6 个阶段, 分别为播种-出苗、出苗-返青、返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆、灌浆-成熟, 考虑田间水肥管理措施实施的可操作性, 这里规定了每次进行田间管理时灌水、施肥的最小量 ( $W_{\min} = 20$  mm,  $N_{\min} = 10$  kg/hm<sup>2</sup>)。为了简化计算过程, 设定每次的灌水量和施肥量都是其最小量的整数倍。

## 3 结果与分析

### 3.1 PS2 水平

本模型所选取 1999~2000 年冬小麦 PS2 水平的对照处理: 处理 1、处理 2 和处理 3 分别为: 00-05 处理(施肥充足, 冬后灌微咸水, 电导率为 5.40~5.47 dS/m)、00-06 处理(施肥充足, 灌溉关键微咸水)和 00-08 处理(施肥充足, 灌溉关键微咸水)<sup>[17]</sup>, 详细的水分管理见表 1, 水分利用效率见表 2。

由表 2 可知, 本模型模拟得到的对照处理 1、2、3 的经济产量分别为 11.8、12.6、10.0 t/hm<sup>2</sup>, 由于处理 3 受水分胁迫相对严重, 故其产量相对最低; 它们的水分利用效率分别为 1.72、1.70、1.88 kg/m<sup>3</sup>。

采用表 3 所示的方案对灌溉处理进行优化, 由表 2 可知, 优化后的经济产量约为 12.5 t/hm<sup>2</sup>, 水分胁迫系数较为接近于 1, 水分利用效率为 1.98 kg/m<sup>3</sup>。同给定灌水方案的对照处理相比, 灌水量分别较处理 1 和处理 2 节约了 18% 和 32%; 水分利用效率 (WUE) 比对照处理 1 和 2 分别高出 15% 和 16%; 虽然优化处理的灌水量较处理 3 多用 88%, 但经济产量明显高于处理 3, 水分利用效率也比处理 3 高出 5%。因此, 无论是从经济产量的角度还是从水分利用效率的角度, 优化模型的模

拟结果明显优于前面3种灌溉处理的结果,并且同时达到了高产、节水的目的,因此,优化结果基本令人满意。

### 3.2 PS3水平

本模型所选取1999~2000年冬小麦PS3水平的对照处理:处理4和处理5分别为00-13处理(常规水肥)和00-14处理(常规水肥)<sup>[15]</sup>,详细的水肥管理见表4,水分利用效率见表2。

本模型模拟得到的对照处理4和处理5的经济产量分别是10.0 t/hm<sup>2</sup>和9.5 t/hm<sup>2</sup>,水分利用效率相

同,均为1.67 kg/m<sup>3</sup>(表2),氮肥利用效率分别为40 kg/kg和47.5 kg/kg。

采用表5所示方案对水肥管理进行优化,由表2可知,优化后的经济产量为10.6 t/hm<sup>2</sup>,比对照处理4和处理5分别提高了约6%和12%;水分利用效率为1.89 kg/m<sup>3</sup>,较对照处理4和5提高了13%;氮肥利用效率为50.5 kg/kg,比处理4和处理5分别提高了26%和6%,模拟结果也基本令人满意。

表1 1999~2000年冬小麦实际灌溉处理

Table 1 Irrigation scenarios for the different treatments during 1999~2000

| 处理号 | 1999-11-16 | 1999-12-05 | 2000-03-31 | 2000-04-19 | 2000-05-10 | 合计  |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| 处理1 | 75         | 68         | 60         | 0          | 90         | 293 |
| 处理2 | 75         | 68         | 60         | 60         | 90         | 353 |
| 处理3 | 0          | 68         | 60         | 0          | 0          | 128 |

表2 PS2水平和PS3水平下的水分利用效率

Table 2 Water use efficiency(WUE) under PS2 and PS3 level

| 处理号     | 经济产量/t·hm <sup>-2</sup> | ET <sub>a</sub> /mm | 水分渗漏量/mm | 水分消耗量/mm | WUE/kg·m <sup>-3</sup> |
|---------|-------------------------|---------------------|----------|----------|------------------------|
| 处理1     | 11.8                    | 511                 | 174      | 685      | 1.72                   |
| 处理2     | 12.6                    | 540                 | 202      | 742      | 1.70                   |
| 处理3     | 10                      | 483                 | 49       | 532      | 1.88                   |
| PS2水平优化 | 12.5                    | 568                 | 63       | 631      | 1.98                   |
| 处理4     | 10                      | 490                 | 108      | 598      | 1.67                   |
| 处理5     | 9.5                     | 454                 | 114      | 568      | 1.67                   |
| PS3水平优化 | 10.6                    | 490                 | 71       | 561      | 1.89                   |

表3 1999~2000动态规划后的优化灌溉方案

Table 3 Optimal irrigation scheme using the dynamic programming

| 处理 | 1999-10-09 | 1999-10-18 | 2000-03-12 | 2000-04-08 | 2000-04-23 | 2000-05-04 | 合计  |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| 优化 | 0          | 0          | 0          | 100        | 0          | 140        | 240 |

表4 1999~2000年冬小麦田间实际水肥管理

Table 4 Management scenarios for the different treatments during 1999~2000

| 处理号 | 管理                      | 1999-10-09 | 1999-12-15 | 2000-03-09 | 2000-04-12 | 2000-05-24 | 合计  |
|-----|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| 处理4 | 灌水/mm                   | 0          | 95         | 0          | 95         | 95         | 285 |
|     | 施N肥/kg·hm <sup>-2</sup> | 140        | 0          | 0          | 0          | 110        | 250 |
| 处理5 | 灌水/mm                   | 0          | 95         | 0          | 95         | 95         | 285 |
|     | 施N肥/kg·hm <sup>-2</sup> | 0          | 0          | 90         | 110        | 0          | 200 |

表5 1999~2000动态规划后的水肥优化管理方案

Table 5 Optimal management of water and fertilizer using dynamic programming

| 优化管理                    | 1999-10-09 | 1999-10-18 | 2000-03-12 | 2000-04-08 | 2000-04-23 | 2000-05-04 | 合计  |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| 灌水/mm                   | 0          | 0          | 0          | 120        | 120        | 20         | 260 |
| 施N肥/kg·hm <sup>-2</sup> | 30         | 0          | 20         | 80         | 80         | 0          | 210 |

## 4 结 论

在荷兰 PS123 作物生长模型和土壤溶质运移模型的基础上, 构建了土壤-作物系统农田水氮运移及作物生长联合模拟模型。将该模型与多目标动态规划方法相结合, 以作物生物量、水分利用效率及氮肥利用效率为目标, 将冬小麦 6 个生长发育期作为阶段变量, 分别对水分限制下(PS2 水平) 和水氮限制下(PS3 水平) 的农田水、氮资源管理措施进行了优化。结果表明: 在 PS2 水平下, 优化方案的灌水量较对照处理 1 和处理 2 平均节约了 25%, 水分利用效率比对照处理平均高出约 12%。在 PS3 水平下, 优化方案的灌水量较对照处理 4 和 5 平均节约了 12%, 水分利用效率比对照处理平均高出约 13%; 氮肥利用效率比对照处理平均提高了约 16%。无论是从经济产量的角度还是从水分、氮肥利用效率的角度, 优化的结果均明显好于对照处理结果, 并且同时达到了高产、节水、减肥的目的。因此, 应用多目标动态规划方法可以很好地实现冬小麦田间水氮管理措施的优化。

致谢: 中国农业大学资源与环境学院宇振荣教授提供了田间试验数据。

### [参 考 文 献]

- [1] 沈荣开, 王 康, 张瑜芳, 等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 35- 38.
- [2] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 基于养分平衡和土壤测试的冬小麦氮肥优化管理方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, (11): 211- 215.
- [3] 贺明荣, 杨雯玉, 王晓英, 等. 不同氮肥运筹模式对冬小麦籽粒产量品质和氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2005, (8).
- [4] Ahuja L R, Ma L W, Howell T A, et al. Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer[M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2002.
- [5] 宇振荣, 王建武, 邱建军 译. 土地利用系统分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 105- 152.
- [6] 毛振强, 张银锁, 宇振荣. 基于作物生长模型的夏玉米灌溉需求分析[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 419- 426.
- [7] 吴绍洪, 靳 京, 戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 93- 97.
- [8] 何坚勇. 运筹学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [9] 崔远来. 缺水条件下水稻灌区优先水土资源最优分配[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4): 18- 21.
- [10] 罗蕴玲, 汪 雷. 最佳效益施肥方案[J]. 运筹与管理, 1999, 8(2): 99- 102.
- [11] 邱 林, 陈守煜, 张振伟, 等. 作物灌溉制度设计的多目标优化模型及方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 90- 93.
- [12] 金 梁. 基于 SPWS 模型的华北平原农田水氮利用效率及环境效益分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [13] Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model [J]. Environmental Modelling and Software, 2000, 15: 313- 330.
- [14] Giasson E, Bryant R B, Nelson L B. Environmental and economic optimization of dairy manure management: a mathematical programming approach [J]. Agronomy J, 2002, 94: 757- 766.
- [15] 毛振强. 基于田间试验和作物生长模型的冬小麦持续管理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [16] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 104- 109.
- [17] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 预测农田水分渗漏和氮肥淋失的两种模型比较研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 87- 93.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements[Z]. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome. 1998.
- [19] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development [M]. College Station, Texas: Texas A&M University Press, 1986.

## Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field

Chen Yan, Hu Kelin, Feng Ling, Li Baoguo<sup>\*</sup>

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The paper introduced the development of a process model that used for water and nutrients management in soil-plant system by integrating the crop growth module in PS123 model and the soil water and nitrogen dynamic process module. The growth season of winter wheat was divided into six stages, taking the total amounts of irrigation and nitrogen application as the decision variables, the biomass of winter wheat, water and nitrogen use efficiency (WUE) were selected as the optimal objectives, then a multiple-object dynamic programming decision model was developed based on the process model in soil-plant system. The decision model was employed to optimize the management scenarios of irrigation and nitrogen application for winter wheat. Through calculating the crop water and nitrogen stress index, the optimal time and amount of water and nitrogen management were obtained. The results indicated that the irrigation amount had a 25% reduction on the average compared with the control, and the WUE increased by 12% compared with the average of control treatment under the condition of water stress (PS2 level), while under the condition of water and nitrogen stress (PS3 level), the irrigation amount had a 12% reduction on the average compared with control, and water and nitrogen use efficiency had a 13% and 16% increase compared with controls, respectively.

**Key words:** crop growth model; dynamic programming; optimal management; winter wheat