

研究报告

## 冬小麦产量的水肥耦合模型

翟丙年, 李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

**[摘要]** 采用五因素五水平二次通用旋转组合设计方案(1/2实施), 在盆栽条件下, 不同水分状况氮素对冬小麦产量的影响。通过建立回归模型及对其进行解析和寻优分析, 得出如下结论: 各试验因素对冬小麦籽粒产量影响的大小顺序为土壤含水量>越冬期施氮>拔节期施氮>灌浆期施氮>苗期施氮。施氮关键时期为越冬期、拔节期; 苗期施氮和土壤含水量及越冬期施氮和土壤含水量交互效应显著, 其中越冬期施氮和土壤含水量比苗期施氮和土壤含水量交互作用更为显著。

**[关键词]** 冬小麦; 氮素; 土壤含水量; 水肥耦合; 数学模型

**[中图分类号]** S152.1<sup>+1</sup>.062.071 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)09-0069-06

施肥的增产效果与土壤水分状况密切相关, 不同供水条件下, 施肥效果有很大差别<sup>[1-7]</sup>。印度学者以珍珠稗为材料连续4年的结果表明, 过分干旱的情况下, 施肥没有什么效果, 但在散见性干旱的条件下, 施肥对作物生长和产量有利<sup>[1]</sup>。Russel发现, 当春小麦生育期间降雨量小于120 mm时, 施用氮肥没有任何效果<sup>[8]</sup>。戴庆林等证明, 冬小麦生育期降水量小于109 mm时, 氮磷肥效为负值<sup>[9]</sup>。陈培元的研究结果表明, 水分条件不同, 施肥效果不同: 极端干旱年份, 施肥越多, 受旱越严重, 减产越多<sup>[1]</sup>。程宪国和杨建昌等分别研究了不同土壤水分条件下, 氮素对冬小麦和水稻生长发育及产量的影响<sup>[10,11]</sup>, 他们的研究结果显示, 水分缺乏, 养分的截获、质流和扩散均受到抑制, 加剧了作物生长过程中的营养不良状况; 养分不足, 作物生长缓慢, 有限的水分也不能充分利用, 导致减产。只有合理的水肥配合, 才能以水促肥, 以肥调水, 达到水分和养分的高效利用。近年来, 水分和养分的关系越来越受到人们重视, 进行了大量的研究工作。但这些研究都注重水分和养分在用

量上的相互配合, 而没有考虑这两个因子与作物生育期的配合。实际上, 水肥的相互关系极为复杂, 除考虑不同的土壤水分状况以及与之相适应的肥料用量之外, 还要考虑根据作物不同生育阶段的需水需肥规律确定最佳施肥灌水时期。根据作物的需水需肥规律, 寻找作物对水、肥的需求临界期, 水肥的最佳施用量及水、肥协同作用的最佳时期及相互配合, 才能充分发挥水、肥的效应。在水资源短缺的北方旱农区, 作物不同生育时期水分和养分用量的优化组合既是提高水分利用效率的关键, 也是提高养分利用效率的关键。

本试验以冬小麦为供试作物, 以苗期、越冬期、拔节期、灌浆期及土壤含水量作为因素, 采用五因素五水平二次通用旋转组合设计方案(1/2实施), 研究了不同水分状况下氮素不同时期、不同施用量对冬小麦籽粒产量的影响。旨在通过建立回归模型及寻优分析, 找出冬小麦施氮的关键期、用量及最优水肥配合, 为冬小麦高产及水肥的高效利用提供科学依据。

**[收稿日期]** 2002-01-04; **修回日期** 2002-03-25

**[基金项目]** 国家自然科学基金重大项目(49890330)、国家自然科学基金农业倾斜项目(30070429)、国家重点基础研究专项经费资助项目(G1999011707)及国家自然科学基金面上项目(39770425)资助。

**[作者简介]** 翟丙年(1967-), 男, 陕西宝鸡市人, 博士, 西北农林科技大学资源环境学院副教授

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

为了有效控制水分,本研究采用盆栽试验。供试冬小麦品种为小偃 597,系有潜力的推广品种。供试土壤采自西北农林科技大学农试站 0~20 cm 耕层的红油土。土壤 pH 值为 7.84 (pH 计),有机质 15.44 g/kg (重铬酸钾容量-外加加热法),碱解氮 41.08 mg/kg (碱解扩散法),Olsen-P 17.44 mg/kg,速效钾 130.59 mg/kg (NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度计法)<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试验方法

以苗期、越冬期、拔节期、灌浆期及土壤含水量为因子,前 4 个因子各设 5 个氮水平,后一因子设 5 个水分水平。采用完全方案则有 3125 个组合。本研究采用五因素五水平二次通用旋转组合设计方案 (1/2 实施)<sup>[13]</sup>,共 32 个处理,每处理重复 5 次。各因素水平及编码值列于表 1。

表 1 因素水平编码表

Table 1 Level code of experiment factor

因 素	变化 间距	自变量设计水平 (r=2)				
		-2	-1	0	1	2
苗期 N/g·(kg 土) <sup>-1</sup>	0.05	0	0.05	0.10	0.15	0.20
越冬期 N/g·(kg 土) <sup>-1</sup>	0.05	0	0.05	0.10	0.15	0.20
拔节期 N/g·(kg 土) <sup>-1</sup>	0.05	0	0.05	0.10	0.15	0.20
灌浆期 N/g·(kg 土) <sup>-1</sup>	0.05	0	0.05	0.10	0.15	0.20
土壤含水量/%	4	13	17	21	25	29

试验于 1999 年 10 月至 2000 年 6 月在西北农林科技大学农试站玻璃温室内进行。选用规格为高 21 cm×内径 15 cm 的塑料盆,每盆装土 3.5 kg。磷肥用过磷酸钙 (含 10% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),按每 kg 干土 0.30 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的用量作底肥于装盆前混入每盆土中;氮肥为尿素 (含 N 46%),按试验方案于小麦 4 个不同生育期结合灌水施入;土壤水分用称重法控制。于 1999 年 10 月 15 日播种,播种量为 20 粒/盆,三叶期留苗 10 株,2000 年 6 月 2 日分盆收获得籽粒产量 (表 2)。

## 2 结果分析

### 2.1 模型的建立与检验

根据二次通用旋转组合设计原理,以籽粒产量作为目标函数 (因变量),以灌水量和不同生育时期的施氮量作为自变量,采用唐启义等的

表 2 试验结构矩阵及产量结果表

Table 2 Experiment design and the yield results

处理 编号	设计水平					籽粒产量 /g·盆 <sup>-1</sup>
	苗期 施氮	越冬期 施氮	拔节期 施氮	灌浆期 施氮	土壤含 水量	
1	1	1	1	1	1	10.42
2	1	1	1	-1	-1	4.08
3	1	1	-1	1	-1	3.33
4	1	1	-1	-1	1	10.84
5	1	-1	1	1	-1	5.19
6	1	-1	1	-1	1	8.44
7	1	-1	-1	1	1	5.86
8	1	-1	-1	-1	-1	3.94
9	-1	1	1	1	-1	4.96
10	-1	1	1	-1	1	9.27
11	-1	1	-1	1	1	7.03
12	-1	1	-1	-1	-1	5.23
13	-1	-1	1	1	1	6.19
14	-1	-1	1	-1	-1	4.77
15	-1	-1	-1	1	-1	3.81
16	-1	-1	-1	-1	1	5.95
17	2	0	0	0	0	4.33
18	-2	0	0	0	0	6.36
19	0	2	0	0	0	6.72
20	0	-2	0	0	0	4.93
21	0	0	2	0	0	6.44
22	0	0	-2	0	0	4.905
23	0	0	0	2	0	6.39
24	0	0	0	-2	0	5.47
25	0	0	0	0	2	10.25
26	0	0	0	0	-2	1.46
27	0	0	0	0	0	4.81
28	0	0	0	0	0	5.31
29	0	0	0	0	0	6.85
30	0	0	0	0	0	4.19
31	0	0	0	0	0	6.75
32	0	0	0	0	0	6.52

DPSWIN 软件计算,求得籽粒产量与各因素编码值的回归数学模型为:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{籽粒}} = & 5.6509 + 0.0348x_1 + 0.6083x_2 + 0.4329x_3 - \\
 & 0.1610x_4 + 1.9279x_5 - 0.0102x_1^2 + 0.1092x_2^2 + \\
 & 0.0711x_3^2 + 0.1361x_4^2 + 0.1164x_5^2 - \\
 & 0.0334x_1x_2 + 0.0616x_1x_3 + 0.0450x_1x_4 + \\
 & 0.5850x_1x_5 - 0.1713x_2x_3 - 0.1028x_2x_4 + \\
 & 0.7022x_2x_5 + 0.3828x_3x_4 + 0.1234x_3x_5 - \\
 & 0.2669x_4x_5 \quad (1)
 \end{aligned}$$

式 (1) 中： $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  分别代表苗期、越冬期、拔节期、灌浆期施氮及土壤绝对含水量 5 个因素。

方差分析表明，模型的失拟  $F = 1.001$ ，远小于 0.05 水准下的  $F$  值 (4.95)，说明失拟项不显著，即无失拟因素存在，而模拟项的  $F = 4.837$ ，大于 0.01 水准下的  $F$  值 (4.10)，又说明了方程是极显著的，模型与实际情况拟合很好<sup>[14]</sup>。

偏回归系数检验结果表明，越冬期施氮、拔节期施氮及土壤含水量一次项回归系数均达 0.10 的显著水平，交互项中苗期施氮和土壤含水量，越冬期施氮和土壤含水量的回归系数也均达 0.10 的显著水平。因此，从本试验结果看，对冬小麦生长有重要意义的是这三个主效应和两个交互效应。逐步回归证明，在优化设计中，剔除不显著项后，只有常数项和二次项的系数有变化，而且变化很小。所以，本研究选用剔除不显著项后的方程：

$$Y_{\text{籽粒}} = 5.6509 + 0.6083x_2 + 0.4329x_3 + 1.9279x_5 + 0.5850x_1x_5 + 0.7022x_2x_5 \quad (2)$$

### 2.2 数学模型的解析和寻优

2.2.1 主因子效应 在量纲相同情况下，偏回归系数反映了某一因子对产量的效应，其值越大，作用越突出。在本研究中，水分和氮素量纲不同，不能直接比较。经过无量纲线性编码代换，回归系数已标准化，可根据其大小判断试验因素对籽粒产量影响的程度，其正负号表示因素的作用方向<sup>[15]</sup>，经过对模型中偏回归系数的综合分析，各试验因素对籽粒产量影响的大小顺序是：土壤含水量 > 越冬期施氮 > 拔节期施氮 > 灌浆期施氮 > 苗期施氮。

2.2.2 单因子效应 对模型 (2) 采用“降维法”可解析出单因子在其他因子居一定水平时的效应，相当于做多组单因子试验<sup>[16]</sup>。

将其他 4 个因素假定在零水平，得到各因素与籽粒产量的一元回归子模型为：

$$y_{\text{籽粒}}(x_1) = 5.6509 \quad (3)$$

$$y_{\text{籽粒}}(x_2) = 5.6509 + 0.6083x_2 \quad (4)$$

$$y_{\text{籽粒}}(x_3) = 5.6509 + 0.4329x_3 \quad (5)$$

$$y_{\text{籽粒}}(x_4) = 5.6509 \quad (6)$$

$$y_{\text{籽粒}}(x_5) = 5.6509 + 1.9279x_5 \quad (7)$$

由“降维法”所得结果做图 (图 1) 可看出各因素对籽粒产量的变化规律，图中曲线的斜率越

大，说明该因素对籽粒产量的影响越显著。

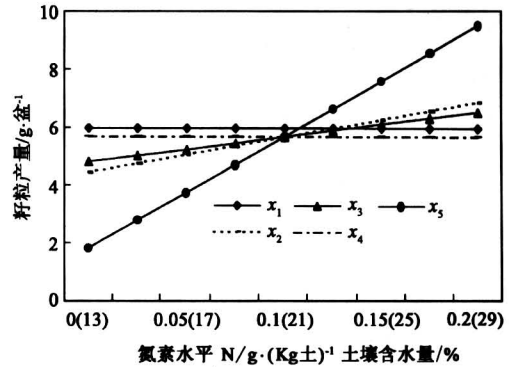


图 1 籽粒产量的单因素效应分析

Fig.1 Single factor effect analysis of winter wheat grain yield

从图 1 可看出，在其他因素假定为零水平时，苗期施氮、灌浆期施氮两因素随着施氮量的增大籽粒产量几乎不变，说明这两个因素对籽粒产量几乎无影响；越冬期施氮、拔节期施氮，直线呈平缓上升趋势，说明这两个时期施氮对籽粒产量有明显影响，但影响没有水分因素显著，而两者之间，前者要比后者更为显著。从图 1 中还可看出，土壤含水量对籽粒产量的影响最为显著，随着土壤含水量增大，籽粒产量显著增加。

2.2.3 双因子效应分析 根据系数显著性检验结果可看出，苗期施氮量和土壤含水量，越冬期施氮量和土壤含水量的交互作用均达到显著水平，按照模型 (1)，将其他因素假定为零水平分别得到其二元回归子模型为：

$$Y_{x_1x_5} = 5.6509 + 0.0348x_1 + 1.9279x_5 + 0.5850x_1x_5 \quad (8)$$

$$Y_{x_2x_5} = 5.6509 + 0.6083x_2 + 1.9279x_5 + 0.7022x_2x_5 \quad (9)$$

根据子模型作三维图 (图 2、图 3)。曲面图上各点的高度代表两因子一定水平组合时的籽粒产量，曲面的高度越高，表示籽粒产量越高。同时，从图中还可看出，当一个因子固定于某一水平时，籽粒产量随另一因子水平变化的规律。

由图 2 可以看出，当土壤含水量处于低水平时，籽粒产量随着苗期施氮量的增大而降低；相反，土壤含水量处于高水平时，籽粒产量随着苗期施氮量的增大而增大。同时也可看出，当苗期施氮量处于低水平时，籽粒产量随着土壤含水量的提高增产幅度较小，但当苗期施氮量处于高水平时籽粒

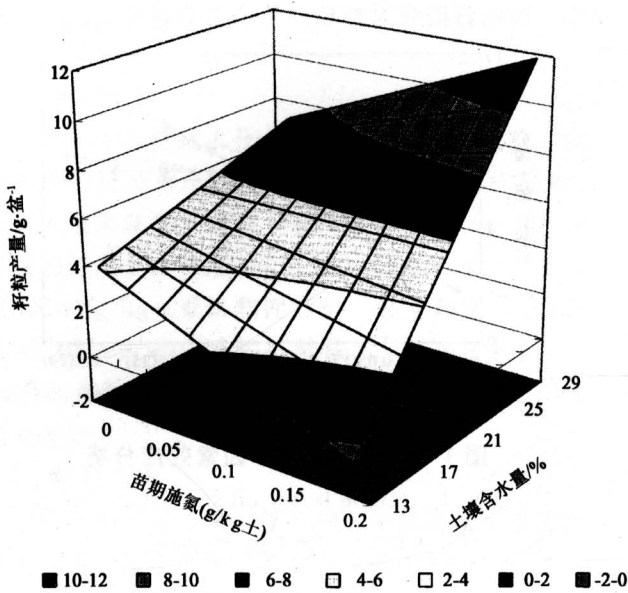


图2  $x_1$  和  $x_5$  双因子对籽粒产量效应分析  
Fig.2 Interaction of water and nitrogen on crop yield ( $x_1$ 和  $x_5$ )

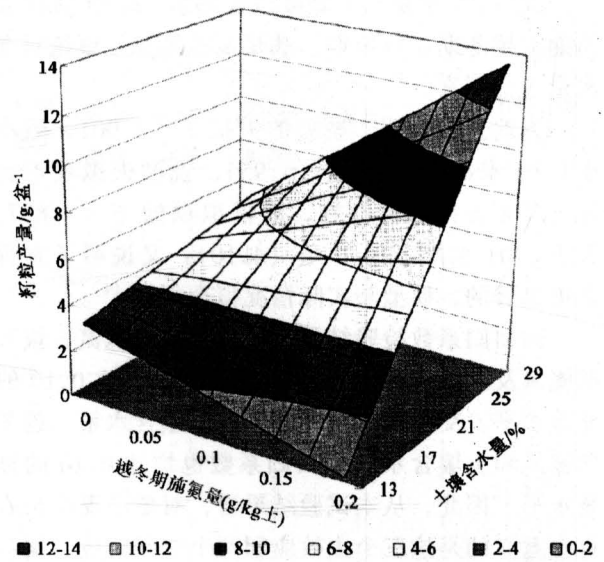


图3  $x_2$  和  $x_5$  双因子对籽粒产量效应分析  
Fig.3 Interaction of water and nitrogen on crop yield ( $x_2$ 和  $x_5$ )

产量随土壤含水量的提高增产幅度明显增大。由此可见，氮素的有效利用需要有充足的水分供应，如果土壤含水量过低，氮素的增产效应不但不能发挥，甚至还会引起减产；同样，水分利用也需要有适宜的氮素供应，否则，也会降低作物对水分的利用效率<sup>[17]</sup>。

越冬期施氮量与土壤含水量的交互效应趋势(图3)与苗期施氮与土壤含水量的交互效应基本相同，只是前者交互效应更为显著。

2.2.4 数学模型寻优 根据已建立的产量数学模型，在  $-2 \leq X_i \leq 2 (i = 1, 2 \dots 5)$  范围内取步长

为1进行计算机模拟，求得籽粒产量大于平均值5.97 g/盆的方案有1 250个，采用频数分析法得出在试验条件下最佳籽粒产量在95%置信区间各因子的优化配比方案为<sup>[18]</sup>：苗期施氮量0.105~0.113 g/kg土，越冬期施氮量0.126~0.133 g/kg土，拔节期施氮量0.107~0.115 g/kg土，灌浆期施氮量0.096~0.104 g/kg土，土壤含水量25.59%~25.95%，各因子配比方案及各变量取值的频率分布见表3。

通过对模型的寻优分析得到籽粒产量取最大值的因素组合如表4。

表3 籽粒产量大于平均值5.97 g/盆的各因子取值频率分布及配比方案

Table 3 Factor frequency distribution and cooperation plan when grain yield surpass average 5.97 g/pot

水平编码	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
-2	0.168	0.068	0.16	0.2	0.008
-1	0.18	0.136	0.168	0.2	0
0	0.196	0.236	0.2	0.2	0.2
1	0.224	0.26	0.232	0.2	0.376
2	0.232	0.3	0.24	0.2	0.416
总次数	1 250	1 250	1 250	1 250	1 250
编码加权均数	0.172	0.588	0.224	0.000	1.192
标准差	0.04	0.035	0.039	0.04	0.023
95%置信区间	0.094~0.250	0.520~0.656	0.147~0.301	-0.078~0.078	1.147~1.237
最优配比方案	0.105~0.113	0.126~0.133	0.107~0.115	0.096~0.104	25.59~25.95

由表4可看出,在苗期施氮、越冬期施氮、拔节期施氮、土壤含水量处于最高水平,灌浆期施氮处于低水平时籽粒产量可达到最大值16.74 g/盆。最大值在本试验中并未出现。

表4 籽粒产量最大时各因素的优化组合

Table 4 Factor corporation when grain field get to the maximum

苗期施 氮/g· (kg 土) <sup>-1</sup>	越冬期施 氮/g· (kg 土) <sup>-1</sup>	拔节期施 氮/g· (kg 土) <sup>-1</sup>	灌浆期施 氮/g· (kg 土) <sup>-1</sup>	土壤 含水量 /%	籽粒产量 最大值 /g·盆 <sup>-1</sup>
0.2	0.2	0.2	0.0	29	16.74

### 3 讨 论

#### 3.1 水分和氮素在用量上的合理配合是达到其高效利用的基础

在旱地农业生产中,只有进行合理的水分和养分投入,协调供应,才能真正做到“以肥调水”、“以水促肥”,这已被许多研究者所证实。张岁岐在冬小麦上的试验结果表明<sup>[19]</sup>,氮素营养和水分胁迫对作物生长发育和产量皆有很大影响,当两者结合时,情况更为复杂,既取决于土壤干旱程度,也与施肥量有关。李玉山等在渭北旱塬进行的6年水肥双因子试验结果表明<sup>[20]</sup>,无论是欠水、平水还是丰水年,施肥均能增加作物的产量,但丰水年施肥的增产作用明显大于欠水年,而且在旱作条件下,年降水量超过500 mm时,有利于肥效的充分发挥,而低于400 mm,则肥效受较大抑制。Garabet等人分别在小麦全生育期降水量为323 mm和275 mm的1991/1992和1992/1993,连续两年考查了小麦产量与灌水量的关系,结果表明,灌溉和氮肥都能增加小麦产量,但在1991/1992相对湿润年份对N的效应更大,而在1992/1993相对干旱的条件下,对灌溉的效应更大。在雨养条件下,湿润年份,低氮对小麦籽粒产量具有显著的影响;而在干旱年份,即使中氮,也无多大影响,而且高氮还引起籽粒产量的明显降低,这反映了在干旱条件下施氮量与籽粒产量具有负效应<sup>[21]</sup>。R. F. James和J. C. James在美国东南部平原冬小麦试验也表明,春季高的施氮量增加了非灌溉条件下胁迫对冬小麦的伤害,进而也影响到籽粒产量<sup>[22]</sup>。梁银丽等研究了水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应,认为土壤水分与氮肥用量的适宜组合可以提高小麦幼苗的叶面积和根系干

重及水分利用效率<sup>[23]</sup>。本试验的双因子分析结果表明,无论在苗期还是在越冬期,均以高氮高水配合的冬小麦籽粒产量最高;在低水分条件下,随施氮量的增加产量显著地下降;而在低氮条件下,产量并不随水分含量的增加而增加;相反,在高氮条件下随水分含量的增加或是在高水条件下随施氮量的增加,产量则大幅度的增加。另外,从主因子和单因子效应分析可看出,在本试验条件下,水分效应大于氮素效应,这主要是因为施氮量相对偏高,必须有与之相适应的水分条件才能促进养分的溶解、迁移和吸收运输,充分发挥氮素的作用效果。这些结果更进一步证实了上述结论。

#### 3.2 水肥高效配合要注意用量的合理配合并考虑最佳配合时期

目前,有关水分和养分的关系问题已有大量的研究报道,但这些研究都注重水分和养分在用量上的相互配合,而没有考虑这两个因子与作物生育期的配合。实际上水肥的相互关系极为复杂,除应考虑不同的土壤水分状况以及与之相适应的肥料用量之外,还要考虑根据作物不同生育阶段的需水需肥规律确定最佳施肥灌水时期。根据作物的需水需肥规律,寻找作物对水、肥的需求临界期,水肥的最佳施用量及水、肥协同作用的最佳时期及相互配合,才能充分发挥水、肥的效应。在水资源短缺的北方旱农区,作物不同生育时期水分和养分用量的优化组合既是提高水分利用效率的关键,也是提高养分利用效率的关键。本试验通过建立水肥耦合模型,并对其进行解析和寻优分析表明,越冬期和拔节期施氮对冬小麦籽粒产量的影响达显著水平;在苗期和越冬期进行水氮配合,其交互作用达显著水平,且越冬期的交互作用效果更为显著。这表明越冬期是冬小麦水氮配合的最佳时期。

#### 参考文献

- [1] 许旭旦. 旱作农业中的合理施肥及其生理学基础[J]. 干旱地区农业研究, 1985, 1(2): 56~71
- [2] 李玉山. 渭北农田水分条件评价和提高旱地水分生产效率的途径[J]. 陕西农业科学, 1982, (2): 17~21
- [3] Viets F G. Water deficits and nutrient availability[A]. kozlowski, T T, ed. water deficits and plant growth [C]. Acad. Press, 1972, Vol3, 217~247
- [4] 山 仑. 黄土高原水土流失区旱作农业的增产途径[J]. 水土保持通报, 1981(1): 33~41



- [5] Bhan S, Misra D K. Effects of variety, spacing and soil fertility on root development in groundnut under arid conditions[J]. Indian J. Agric Sci 1970, (40): 1050 ~ 1055
- [6] Begg J E, Turner N C. Crop water deficits[J]. Adv Agron, 1976, (28): 161 ~ 218
- [7] 张岁岐. 干旱条件下无机营养对作物生长发育和水分利用效率的影响[A]. 旱地农业生理生态基础[C]. 北京: 科学出版社, 1998. 233 ~ 246
- [8] Russell J S. Nitrogen fertilizer and wheat in semiarid environment[J]. Aust J Exp Agric and An Husb, 1967, (7): 453 ~ 462
- [9] 戴庆林, 杨文耀. 阴山丘陵旱农区水肥效应与耦合模式的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 20 ~ 24
- [10] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67 ~ 74
- [11] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 58 ~ 66
- [12] 李酉开. 土壤农化常规分析[M]. 北京: 农业出版社 1987
- [13] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998
- [14] 魏其克, 李耀辉, 党建忠. 渭北旱原冬小麦高产农艺措施优化方案的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1990(增刊): 39 ~ 48
- [15] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿. 商丘试验区夏玉米节水高产水肥耦合数学模型与优化方案[J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 18 ~ 21
- [16] 金 轲, 汪德水, 蔡典雄. 旱地农田水肥耦合效应及其模式研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(5): 104 ~ 106
- [17] 韩丽梅, 邹永久, 王树起, 等. 水分胁迫与施肥对小麦经济性状及产量影响的研究[J]. 吉林农业科技, 1998, (2): 19 ~ 22
- [18] 武雪萍, 张乃明. 高产优质高效冬小麦优化配方施肥模式研究[A]. 土壤 - 植物营养文集[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 688 ~ 691
- [19] 张岁岐, 山 仑. 氮素营养对春小麦抗旱适应性及水分利用的影响[J]. 水土保持研究, 1995, 2(1): 31 ~ 35
- [20] 李玉山. 渭北旱原旱作水分生产潜势与水 - 肥 - 产量关系, 长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991
- [21] Rasmussen P E, Rohde C R, Tillage. Soil depth and precipitation effects on wheat response to nitrogen[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, (55): 121 ~ 124
- [22] James R F, James J C. Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern coastal plain, grain yield and kernel traits[J]. Agron J, 1995, (87): 521 ~ 526
- [23] 梁银丽, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J]. 西北植物学报, 1995, 15(1): 21 ~ 25

## The Model of Water and Nitrogen Coupling in Winter Wheat Yield

Zhai Bingnian, Li Shengxiu

(College of Resources and Environment Science, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling Shanxi 712100, China)

[Abstract] By using the quadratic general spinning design, pot experiments were conducted to study the comprehensive effect of the stage and rate of N fertilizer application under different status of soil moisture on winter wheat yield systematically. The results showed that the mathematical model established based on the result of experiments is significant. By analysing the mathematical model, the soil moisture, tillering and jointing stage were thought to be the remarkable factors, while the influencing sequence from large to small is: soil moisture > tillering stage > jointing stage > milking stage > seedling stage; The interaction effects exist between different factors.

[Key words] winter wheat; nitrogen; soil moisture; water and nitrogen coupling; mathematical model