植物营养与肥料学报 2005,11(4):473 - 480
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同水分状况下施氮对夏玉米水分利用效率的影响

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：通过盆栽试验采用五因素五水平通用旋转组合设计(1/2 实施)方案,研究了不同水分状况下氮肥的用量和施用时期对夏玉米水分利用效率的影响。结果表明,施氮对夏玉米水分利用效率的影响大于土壤含水量,但子粒产量和生物产量水分利用率($WUE_{子粒}$和$WUE_{生物}$)对施氮时期的要求不尽相同,苗期和灌浆期施氮对$WUE_{子粒}$的影响较显著,而苗期和拔节期施氮对$WUE_{生物}$的影响则更显著。从单因素效应看,并非施氮量和土壤含水量越高越好。水氮高效配合的关键期是拔节期,且存在阈值反应,其阈值是 N 0.2 g/kg,土壤含水量为 21%。低于阈值水平,水氮交互作用不明显,高于阈值水平,水氮互作效应显著。

关键词：夏玉米；水分状况；施氮；水分利用效率
中图分类号：S513.06　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2005)04-0473-08

Effects of nitrogen nutrition on summer maize water use efficiency under different status of soil moisture

ZHAI Bing-nian, LI Sheng-xiu
(*College of Resources and Environmental Sciences, North Western Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The precipitation is not stable in dryland farming area, it is also difficult to support water according to crop demand in irrigation area, water and fertilizer can not cooperation well according to people expect. In order to develop the effects of water and nutrient fully, it must to be done firstly to decide the key stage and compensatory effect of water and nutrient cooperation, so that it fits to unstable precipitation. Therefore, it is very important to study the condition and mechanism of water and nutrient cooperation, in order to develop the water and nutrient interaction, to improve the use efficiency of water and fertilizer. The pot experiment was conducted to study the effects of nitrogen application rate and stage on summer maize water use efficiency under different status of soil moisture by using the quadratic general spinning design in this paper. The results showed that the effect of nitrogen fertilizer on WUE is more great than that of soil moisture, but the N application stage for WUE is different between WUE based to grain yield and biological yield. Effects of N application in seedling stage and milking stage on WUE based to grain yield are more great than in other stage, while that of N application in seedling stage and jointing stage on WUE based to biological yield are more great than that in other stage. From the single factor effect, we found that the best N application rate and soil moisture are N 0.2g /kg soil and 21% respectively. Not the more N application rate and soil moisture, the more WUE. The key stage for water and nitrogen interaction is jointing stage. The threshold value existed in water-nitrogen interaction. If the N application rate and soil moisture are below the threshold value the interaction effect of N and soil moisture on WUE will be unremarkable, Otherwise that will be remarkable.

Key words: summer maize; status of soil moisture; N application; water use efficiency

---

收稿日期：2004-06-09　　**修改稿收到日期**：2004-10-27
基金项目：国家自然科学基金重点项目(30230230)、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)资助。
作者简介：翟丙年(1967—),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事旱地水肥管理研究。

旱地农田的主要问题是干旱缺水。因此,如何有效地利用有限的降水资源,提高作物水分利用效率,最大限度地发掘旱地农业降水生产潜力,并从多方面探讨各种有效途径和措施,成为提高旱地农田生产力水平的关键[1-5]。多年的研究和生产实践表明,土壤瘠薄和施肥水平低是制约水分潜势发挥和旱地农业粮食产量的主要原因[1-2]。在一定条件下,施肥可以大幅度提高作物的水分利用效率[2,6-7],从而提出了"以肥调水"的方针[8]。有关"以肥调水"的效果和作用机理的研究已有大量报道。杜建军、东先旺、汪德水等[9-12]认为,施肥的增产作用并不在于以消耗较多的土壤水分为代价,而是以提高水分的利用效率为基础的。Brown 等[13]认为,旱地条件下施肥均可促使植物吸收利用更多的土壤水分,然而 Porver[14]则认为,施肥增加利用水分的量通常较小。但是,这些研究大多集中在氮肥的施与不施,施多施少对作物水分利用效率的影响,而对如何根据作物的营养特点合理选择施肥时期这方面的报道不多。为此,本试验采用五因素五水平通用旋转组合设计(1/2 实施)方案,研究了不同水分状况下氮肥的用量、施用时期对夏玉米水分利用效率的影响,以期为北方旱地夏玉米生产中通过"以肥调水"达到节约用水,提高产量提供理论依据。

1 材料与方法

盆栽试验于 1999 年 6 月至 10 月在西北农林科技大学西农校区农作一站网室内进行。供试土壤样品为采自西北农林科技大学西农校区农作一站 0—20cm 耕层的红油土,其有机质含量为 10.8g/kg,全 N 0.92g/kg, NH_4^+ - N 24.06 mg/kg, NO_3^- - N 35.10 mg/kg,速效 P 11.3mg/kg,速效 K 146.2mg/kg。每处理选用装干土 7.5kg 的米氏盆 3 个和装干土 12.0kg 的红塑料桶 2 个,由于盆型不一,采用区组控制。试验采用五因素五水平二次通用旋转组合设计方案(1/2 实施),以苗期、拔节期、喇叭口期、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,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 。所有处理均施过磷酸钙作底肥,按 P_2O_5 0.30g/kg 的用量于装盆前与土样混合;氮肥用尿素,严格按照试验方案于不同时期随灌水施入;水分用称重法控制。供试玉米品种为掖单,播种前对种子筛选,并用清水浸泡 12 h,捞出晾干备用。每盆播种 5 粒,留苗 1 株。

试验收获后统计全生育期的灌水量,并计算水分利用效率(WUE)。

表 1 因素水平编码表

Table 1 Level code of experiment factor

因素 Factor	间距 Interval	设计水平 Design level(r = 2)				
		-2	-1	0	1	2
苗期 Seedling stage(N g/kg)	0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
拔节期 Jointing stage(N g/kg)	0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
喇叭口期 Trumpet mouth stage(N g/kg)	0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
灌浆期 Milking stage(N g/kg)	0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
土壤含水量 Soil water content(%)	4	13	17	21	25	29

2 结果与分析

2.1 模型的建立和检验

水分利用效率计算结果见表 2。根据二次通用旋转组合设计原理,以子粒产量和生物量($WUE_{子粒}$ 和 $WUE_{生物}$)作为目标函数(因变量),以灌水量和不同生育时期的施氮量为自变量,采用唐启义等的 DPSWIN 软件计算,建立了 WUE 与 5 个试验因素编码值的回归数学模型为:

$$WUE_{子粒} = 1.9313 + 0.1996X_1 + 0.1363X_2 + 0.1396X_3 + 0.1588X_4 + 0.1238X_5 - 0.0644X_1X_2 - 0.0206X_1X_3 - 0.1056X_1X_4 - 0.1406X_1X_5 - 0.0569X_2X_3 - 0.0994X_2X_4 + 0.1631X_2X_5 - 0.1406X_3X_4 - 0.1356X_3X_5 + 0.0169X_4X_5 - 0.0838X_1^2 - 0.0675X_2^2 - 0.1113X_3^2 + 0.0700X_4^2 - 0.1000X_5^2 \quad (1)$$

$$WUE_{生物} = 4.3728 + 0.4213X_1 + 0.4821X_2 + 0.0896X_3 + 0.1729X_4 - 0.0704X_5 - 0.0106X_1X_2 - 0.1219X_1X_3 - 0.1681X_1X_4 - 0.2831X_1X_5 + 0.0069X_2X_3 - 0.1719X_2X_4 + 0.0056X_2X_5 - 0.2606X_3X_4 - 0.1081X_3X_5 - 0.0544X_4X_5 - 0.1366X_1^2 - 0.1416X_2^2 - 0.0666X_3^2 + 0.0497X_4^2 - 0.1278X_5^2 \quad (2)$$

式(1)和(2)中 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5 分别代表苗期、拔节期、喇叭口期、灌浆期施氮及土壤绝对含水量等 5 个因素。

方差分析表明，对 $WUE_{子粒}$ 和 $WUE_{生物}$，模型的失拟项 F 值分别为 1.800 和 1.780，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 F 值分别为 10.828 和 9.124，大于 0.01 水准下的 F 值(4.10)，说明了方程是极显著的，模型与实际情况拟合很好。

偏回归系数检验结果表明，在 $WUE_{子粒}$ 方程中，除 $b_7(X_1X_3)$，$b_{10}(X_2X_3)$，$b_{15}(X_4X_5)$ 外，其余都达到显著水平，说明方程拟合得很好；在 $WUE_{生物}$ 方程中，除 $b_3(X_3)$，$b_5(X_5)$，$b_6(X_1X_2)$，$b_{10}(X_2X_3)$，$b_{12}(X_2X_5)$，$b_{14}(X_3X_5)$，$b_{15}(X_4X_5)$，$b_{18}(X_{32})$，$b_{19}(X_{42})$ 外，其余也都达到显著水平。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，选用剔除不显著项后的方程为：

表 2　试验结构矩阵及 WUE 结果表

Table 2　Experiment design and the WUE results

处理号 Treatment number	设计水平 Design level					水分利用率 WUE(g/kg)	
	氮水平 N levels				土壤含水量 Soil water content (x_5)	子粒产量 Grain yield	生物学产量 Biological yield
	苗期 Seedling (x_1)	拔节期 Jointing (x_2)	喇叭口期 Trumpet mouth (x_3)	灌浆期 Milking (x_4)			
1	1	1	1	1	1	1.75	3.82
2	1	1	1	-1	-1	2.10	5.65
3	1	1	-1	1	-1	1.58	5.28
4	1	1	-1	-1	1	2.09	4.81
5	1	-1	1	1	-1	2.17	4.16
6	1	-1	1	-1	1	1.65	3.59
7	1	-1	-1	1	1	1.91	4.15
8	1	-1	-1	-1	-1	1.41	3.84
9	-1	1	1	1	-1	1.32	3.98
10	-1	1	1	-1	1	1.99	4.58
11	-1	1	-1	1	1	2.42	4.61
12	-1	1	-1	-1	-1	0.68	3.16
13	-1	-1	1	1	1	1.64	3.48
14	-1	-1	1	-1	-1	1.26	2.84
15	-1	-1	-1	1	-1	1.25	3.37
16	-1	-1	-1	-1	1	0.85	2.65
17	2	0	0	0	0	2.00	4.60
18	-2	0	0	0	0	1.23	2.86
19	0	2	0	0	0	2.05	4.65
20	0	-2	0	0	0	1.31	2.77
21	0	0	2	0	0	1.92	4.49
22	0	0	-2	0	0	1.09	3.53
23	0	0	0	2	0	2.68	5.08
24	0	0	0	-2	0	1.78	3.87
25	0	0	0	0	2	1.66	3.49
26	0	0	0	0	-2	1.44	4.04
27	0	0	0	0	0	1.70	4.22
28	0	0	0	0	0	2.00	4.39
29	0	0	0	0	0	2.11	4.43
30	0	0	0	0	0	1.94	4.11
31	0	0	0	0	0	1.89	4.44
32	0	0	0	0	0	1.91	4.84

$$WUE_{子粒} = 1.9313 + 0.1996X_1 + 0.1363X_2 + 0.1396X_3 + 0.1588X_4 + 0.1238X_5 - 0.0644X_1X_2 - 1056X_1X_4 - 0.1406X_1X_5 - 0.0994X_2X_4 + 0.1631X_2X_5 - 0.1406X_3X_4 - 0.1356X_3X_5 - 0.0838X_1^2 - 0.0675X_2^2 - 0.1113X_3^2 + 0.0700X_4^2 - 0.1000X_5^2 \quad (3)$$

$$WUE_{生物} = 4.3728 + 0.4213X_1 + 0.4821X_2 + 0.1729X_4 - 0.1219X_1X_3 - 0.1681X_1X_4 - 0.2831X_1X_5 - 0.1719X_2X_4 - 0.2606X_3X_4 - 0.1366X_1^2 - 0.1416X_2^2 - 0.1278X_5^2 \quad (4)$$

2.2 数学模型的解析与寻优

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 WUE 的效应，其值越大，作用越突出。本试验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 WUE 影响的程度，其正负号表示因素的作用方向[15]。由简化后的回归方程(3)的一次项偏回归系数的绝对值大小可知，5 个试验因素对 $WUE_{子粒}$ 影响的大小顺序是：苗期施氮(X_1) > 灌浆期施氮(X_4) > 喇叭口期施氮(X_3) > 拔节期施氮(X_2) > 土壤含水量(X_5)；由简化后的回归方程(4)的一次项偏回归系数可知，对 $WUE_{生物}$ 的影响只有苗期施氮(X_1)、拔节期施氮(X_2)和灌浆期施氮(X_4)3 个因素显著，且大小顺序为：拔节期施氮(X_2) > 苗期施氮(X_1) > 灌浆期施氮(X_4)。

2.2.2 单因子效应 对模型(3)和(4)采用"降维法"可解析出单因子在其它因子居一定水平时的效应，相当于做多组单因子试验[15]。

将其他 4 个因素假定在零水平，得到各因素与 $WUE_{子粒}$ 和 $WUE_{生物}$ 的一元回归子模型为：

$$WUE_{子粒1} = 1.9313 + 0.1996N_1 - 0.0838N_1^2 \quad (5)$$

$$WUE_{子粒2} = 1.9313 + 0.1363N_2 - 0.0675N_2^2 \quad (6)$$

$$WUE_{子粒3} = 1.9313 + 0.1396N_3 - 0.1113N_3^2 \quad (7)$$

$$WUE_{子粒4} = 1.9313 + 0.1588N_4 + 0.0700N_4^2 \quad (8)$$

$$WUE_{子粒5} = 1.9313 + 0.1238H - 0.1000H^2 \quad (9)$$

$$WUE_{生物1} = 4.3728 + 0.4213N_1 - 0.1366N_1^2 \quad (10)$$

$$WUE_{生物2} = 4.3728 + 0.4821N_2 - 0.1416N_2^2 \quad (11)$$

$$WUE_{生物3} = 4.3728 \quad (12)$$

$$WUE_{生物4} = 4.3728 + 0.1729N_4 \quad (13)$$

$$WUE_{生物5} = 4.3728 - 0.1278H^2 \quad (14)$$

由"降维法"所得结果做图(图 1、图 2)看出，各因素对 $WUE_{子粒}$ 和 $WUE_{生物}$ 的变化规律。图中曲线的斜率越大，说明该因素对产量的影响越显著。

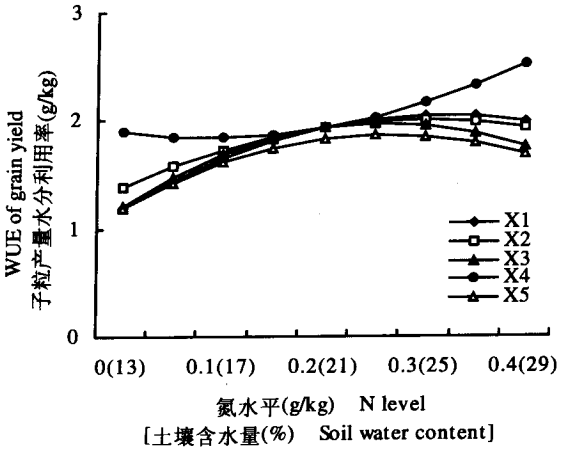

图 1 $WUE_{子粒}$ 的单因素效应分析

Fig. 1 Single factor effect analysis of WUE based to grain yield

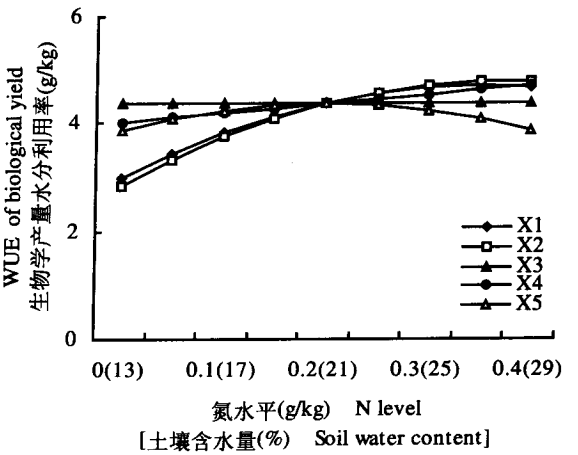

图 2 $WUE_{生物}$ 的单因素效应分析

Fig. 2 Single factor effect analysis of WUE based to biological yield

由图 1 可看出，苗期施氮(X_1)和拔节期施氮(X_2)对 $WUE_{子粒}$ 的单因素效应基本相同，即当控制因子处于零水平时，在一定区间(N 水平编码值≤0，即施 N 量≤N 0.2g/kg)，$WUE_{子粒}$ 随苗期和拔节期施 N 量的增加而明显增加，但当施 N 量超过 N 0.2g/kg 时，则随施 N 量的增加保持相对恒定，苗期施氮的效果更显著一些；喇叭口期施氮(X_3)和土壤含水量(X_5)对 $WUE_{子粒}$ 的单因素效应在零水平以前与苗期施氮的规律性基本一致，但超过零水平后，则随施氮量或土壤含水量的增加而明显地下降；灌浆期施氮(X_4)对 $WUE_{子粒}$ 的单因素效应在零水平以前随施氮

量的增加基本保持不变，而超过零水平后则随施氮量的增加一直增加。

图 2 表明，$WUE_{生物}$的单因素效应中，以苗期和拔节期施氮两个因素最为显著，其效应基本一致，即随施氮量的增加而明显增加，只不过在零水平以上增加的幅度逐渐减小；随灌浆期施氮量的增加，$WUE_{生物}$呈缓慢上升趋势；土壤含水量对 $WUE_{生物}$的影响在零水平以下（< 21%）随含水量的增加而增加，但超过零水平（> 21%）则随含水量的增加而减小，喇叭口期施氮对 $WUE_{生物}$几乎没有影响。

2.2.3　双因子效应（因素间的交互作用）分析　这里仅分析水氮交互作用。根据回归系数 F 检验结果，对 $WUE_{子粒}$，除苗期和喇叭口期施氮（X_1X_3）、拔节期和喇叭口期施氮（X_2X_3）及灌浆期施氮与土壤含水量（X_4X_5）的交互作用不显著外，其余均达显著水平，但只有拔节期施氮与土壤含水量（X_2X_5）为正交互作用；对 $WUE_{生物}$，苗期与喇叭口期施氮（X_1X_3）、苗期与灌浆期施氮（X_1X_4）、苗期施氮与土壤含水量（X_1X_5）、拔节期与灌浆期施氮（X_2X_4）及喇叭口期与灌浆期施氮（X_3X_4）间的交互作用达显著水平，但均为负交互作用。

按照模型(3)和(4)，将其它因子假定为零，可得拔节期施氮与土壤含水量（X_2X_5）对 $WUE_{子粒}$和苗期施氮与土壤含水量（X_1X_5）对 $WUE_{生物}$的交互作用相应的二元回归子模型如下：

$$WUE_{子粒} = 1.9313 + 0.1363X_2 + 0.1238X_5 + 0.1631X_2X_5 - 0.0675X_2^2 - 0.1000X_5^2 \quad (15)$$

$$WUE_{生物} = 4.3728 + 0.4213X_1 - 0.2831X_1X_5 - 0.1366X_1^2 - 0.1278X_5^2 \quad (16)$$

根据子模型作三维图（图 3、图 4）看出，曲面图上各点的高度代表两因子一定水平组合时的 WUE，曲面的高度越高，表示 WUE 越高。同时，从三维图中还可看出，当一个因子固定于某一水平时，WUE 随另一因子水平变化的规律。

图 3 表明，当拔节期 N 处于低水平时，$WUE_{子粒}$随土壤含水量的增大，在小于 21%（零水平）的区间内有所增加，但变化幅度不大，而在大于 21% 的区间内则随土壤含水量的增加反而降低；当拔节期 N 处于较高水平时，$WUE_{子粒}$随土壤含水量的增大而显著增加，这说明增施氮肥可以提高玉米对水分的利用效率。当土壤含水量处于低水平时，随拔节期施氮量的增大，在小于 N 0.2 g/kg（零水平）时，$WUE_{子粒}$也在增加，但变化幅度很小；超出这个范围，则$WUE_{子粒}$随施氮量的增加而迅速减小，且在土壤含水量为 13%，施氮量达到 N 0.4 g/kg 时，$WUE_{子粒}$出现最低值，这说明有限的土壤含水量限制了氮作用的充分发挥，反而降低了水分利用效率；当土壤含水量处于较高水平时，随施氮量的增加，$WUE_{子粒}$明显增加，高水高肥时达到最大值。高肥低水或低肥高水都使 $WUE_{子粒}$明显降低。水肥配合存在阈值反应，其阈值是：N 0.2g/kg，土壤含水量为 21%。低于阈值水平，水肥交互作用不明显；高于阈值水平，水肥互作效应显著。说明在适宜的用量范围内，拔节期水肥间具有显著的正交互作用。由此可以得出，对夏玉米来说，水氮高效配合的关键时期是拔节期。

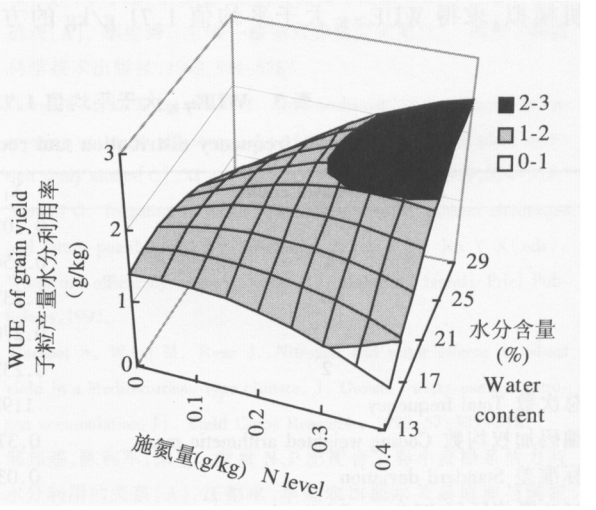

图 3　拔节期施氮和土壤含水量对 $WUE_{子粒}$的交互作用

Fig. 3　Interaction effect of soil water and N supply at jointing stage on WUE based to grain yield

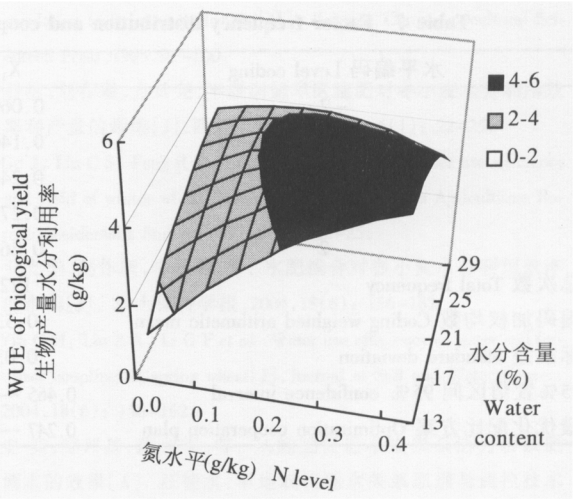

图 4　苗期施氮和土壤含水量对 $WUE_{生物}$的交互作用

Fig.4　Interaction effect of soil water and N supply at seedling stage on WUE based to biological yield

图4看出，苗期施氮与土壤含水量对$WUE_{生物}$的影响在一定范围内具有较明显的相互替代作用，当它们均处于最低水平时，$WUE_{生物}$最小，在苗期施氮量较小的情况下，$WUE_{生物}$随土壤含水量的增加而增加。在土壤含水量较低的情况下，$WUE_{生物}$随苗期施氮量的增加而显著增加，但在土壤含水量较高或苗期施氮较多时，$WUE_{生物}$却随着另一因素的增加变化不大甚至有所降低。而且在高施氮量低土壤含水量情况下$WUE_{生物}$达最大值，说明苗期施用氮肥可以提高玉米对土壤水分的利用效率，从而增加作物的抗旱能力。

2.2.4 数学模型寻优 根据已建立的数学模型，在$-2 \leqslant X_i \leqslant 2(i=1,2\cdots5)$范围内取步长为1进行计算机模拟，求得$WUE_{子粒}$大于平均值1.71 g/kg的方案有1198个，$WUE_{生物}$量大于平均值4.06 g/kg的方案有1229个。采用频率分析法可得出，在本试验条件下，最佳$WUE_{子粒}$的95%置信区间各因子的优化配比方案，施氮量为苗期N 0.230～0.245g/kg、拔节期N 0.222～0.237g/kg、喇叭口期N 0.213～0.228g/kg、灌浆期N 0.217～0.234g/kg，土壤含水量21.49%～22.08%；最佳$WUE_{生物}$量的95%置信区间各因子的优化配比方案，施氮量为苗期N 0.247～0.260g/kg、拔节期N 0.268～0.280g/kg、喇叭口期N 0.170～0.190g/kg、灌浆期N 0.204～0.220g/kg，土壤含水量20.39～21.02%。$WUE_{子粒}$和$WUE_{生物}$量各因子配比方案及各变量取值的频率分布见表3和表4。

表3 $WUE_{子粒}$大于平均值1.71 g/kg的各因子取值频率分布及配比方案

Table 3 Factor frequency distribution and cooperation plan when $WUE_{grain\ yield}$ surpass average 1.71g/kg

水平编码 Level coding	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
-2	0.1027	0.1252	0.1119	0.1937	0.1311
-1	0.1569	0.1711	0.1878	0.1603	0.1845
0	0.2371	0.2179	0.2646	0.1486	0.2437
1	0.2705	0.2513	0.2554	0.1895	0.2379
2	0.2329	0.2346	0.1803	0.3080	0.2028
总次数 Total frequency	1198	1198	1198	1198	1198
编码加权均数 Coding weighted arithmetic mean	0.374	0.299	0.205	0.258	0.197
标准差 Standard deviation	0.037	0.038	0.036	0.044	0.038
95%置信区间 95% confidence interval	0.302～0.446	0.223～0.374	0.134～0.275	0.172～0.344	0.123～0.271
最优化配比方案 Optimization cooperation plan	0.230～0.245	0.222～0.237	0.213～0.228	0.217～0.234	21.49～22.08

表4 $WUE_{生物}$量大于平均值4.06 g/kg的各因子取值频率分布及配比方案

Table 4 Factor frequency distribution and cooperation plan when $WUE_{biological\ yield}$ surpass average 4.06g/kg

水平编码 Level coding	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
-2	0.0692	0.0325	0.2311	0.1823	0.1880
-1	0.1400	0.1139	0.2229	0.1847	0.2148
0	0.2465	0.2368	0.2034	0.1953	0.2303
1	0.2775	0.3124	0.1774	0.2050	0.2213
2	0.2669	0.3043	0.1652	0.2327	0.1456
总次数 Total frequency	1229	1229	1229	1229	1229
编码加权均数 Coding weighted arithmetic mean	0.533	0.742	-0.177	0.121	-0.078
标准差 Standard deviation	0.035	0.032	0.040	0.041	0.038
95%置信区间 95% confidence interval	0.465～0.601	0.680～0.804	-0.256～-0.099	0.041～0.201	-0.152～-0.004
最优化配比方案 Optimization cooperation plan	0.247～0.260	0.268～0.280	0.170～0.190	0.204～0.220	20.39～21.02

通过对模型的寻优分析得到$WUE_{子粒}$和$WUE_{生物}$取最大值的因素组合(表5)可看出，要达到$WUE_{子粒}$和$WUE_{生物}$的最大值，其各个试验因素的组合不完全相同。在土壤含水量取最高水平29%的条件下，分别于拔节期和灌浆期重施氮肥(施氮量N 0.40g/kg)可得到$WUE_{子粒}$的最大值3.52g/kg；而在

表 5　$WUE_{子粒}$和 $WUE_{生物}$取最大值的各个因素组合

Table 5　Factor combination when $WUE_{grain\ yield}$ and $WUE_{biological\ yield}$ get to the maximum

项目 Items	施氮量 N rate (N g /kg) 苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing	喇叭口期 Trumpet mouth	灌浆期 Milking	土壤含水量 Soil water content(%)	最大值 Maximum value (g/kg)
$WUE_{子粒}$ $WUE_{grain\ yield}$	0.00	0.40	0.00	0.40	29	3.52
$WUE_{生物}$ $WUE_{biological\ yield}$	0.40	0.40	0.40	0.00	13	7.26

土壤含水量取最低水平 13% 的条件下,分别于苗期、拔节期和喇叭口期重施氮肥可得到 $WUE_{生物}$的最大值 7.26 g/kg。但本试验并未出现最大值。

3　结论

施氮和土壤水分对夏玉米水分利用效率影响的结果表明,施氮对 WUE 的效应明显大于水分效应。施氮对 WUE 的影响不仅与其施用量有关,而且与施用时期也有很大关系。$WUE_{子粒}$和 $WUE_{生物}$对施氮时期的要求不完全一致,苗期和灌浆期施氮对 $WUE_{子粒}$的影响较显著,苗期和拔节期施氮对 $WUE_{生物}$的影响则更显著。而这些时期同时也是影响子粒产量和生物量产量大小的关键时期,这进一步证明了施氮是通过增加作物产量来提高其水分利用效率的。从单因素效应看,并非施氮量和土壤含水量越高越好,而是以施氮量 N 0.2g/kg 和土壤含水量 21% 效果最好(图 1,图 2),最佳 $WUE_{子粒}$和 $WUE_{生物}$的 95% 置信区间各因子的优化配比方案中各因素的取值范围也充分说明了这一点(表 3 和表 4)。试验结果还表明,从以子粒产量为基础计算的水分利用效率看,水肥在拔节期表现出显著的正交互作用,但存在阈值反应,其阈值是:施氮量为 N 0.2g/kg,土壤含水量为 21%。低于阈值水平,水肥交互作用不明显,高于阈值水平,水肥互作效应显著(图 3);从以生物量产量为基础计算的水分利用效率看,水肥在苗期一定范围内具有较明显的相互替代作用,当它们均处于最低水平时,$WUE_{生物}$最小,在施氮量较小的情况下,$WUE_{生物}$随土壤含水量的增加而增加;在土壤含水量较低的情况下,$WUE_{生物}$随施氮量的增加而显著增加,但在土壤含水量较高或苗期施氮较多时,$WUE_{生物}$却随着另一因素的增加变化不大甚至有所降低。在高施氮量低土壤含水量情况下 $WUE_{生物}$达最大值,说明苗期施用氮肥可以提高玉米对土壤水分的利用效率,从而增加作物的抗旱能力(图 4)。

参 考 文 献:

[1] 曹 靖,胡恒觉.不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究[J]. 应用生态学报,2000,11(5): 713-717.
Cao J, Hu H J. Study of different fertilizer combination on water supply and demand condition of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(5): 713-717.

[2] 张仁陟,李小刚,胡恒觉.施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[A]. 李生秀. 土壤—植物营养研究文集[C]. 西安: 陕西科学技术出版社.1999.574-578.
Zhang R Z, Li X G, Hu H J. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency [A]. Li Shengxiu. Soil and plant nutrition study album[C].Xi an: Shannxi Sci-Tec Press. 1999,574-578.

[3] Stanhill G. Irrigation in Isreal: Past achievements, present challenges and future possibilities[A]. Shalhevet J, Liu C M, Xu Y X(eds). Water use efficiency in agriculture[M]. Rehovot, Isreal: Priel Publishers,1992.

[4] Garabet S, Wood M, Ryan J. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate. I. Growth, water-use and nitrogen accumulation[J]. Field Crops Research, 1998,57:309-318.

[5] 邹邦基,陈利军,朱玺. 变量 N、P 肥配合下春小麦根系活力与水分利用的关系[A].汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[M].北京:中国农业科技出版社,1995.91-100.
Zou B J, Chen L J, Zhu X. The relationship of root vigor and water use in spring wheat at the condition of changeable rate N and P cooperation [A]. Wang D S. The principle of water and fertilizer relationship and regulation techniques in dryland[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press,1995.91-100.

[6] 谷洁,刘存寿,方日尧.半湿润偏旱区施肥对冬小麦水分利用效率和产量的影响[J].西北农业学报,1997,6(1): 22-25.
Gu J, Liu C S, Fang R Y. Effect of fertilization on water use efficiency and yield of winter wheat in semi-arid area[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 1997,6(1): 22-25.

[7] 尹光华,刘作新,李桂芳,等. 水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6): 156-162.
Yin G H, Liu Z X, Li G F *et al* .Water use efficiency of water and fertilizer coupling on spring wheat[J].Journal of Soil and Water Conser. 2004,18(6): 156-162.

[8] 史 奕,邹邦基,陈利军,等. 从施肥促进小麦根系活力看以肥调水的效果[A]. 汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社,1995. 111-115.
Shi Y, Zou B J, Chen L J *et al* . Effect of fertilization regulating water was studied by fertilization promoting wheat root vigor[A]. Wang D S. The principle of water and fertilizer relationship and regulation tech-

niques in dryland[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1995.111-115.

[9] 杜建军,李生秀,高亚军,等.氮肥对冬小麦抗旱适应性及水分利用的影响[J]. 西北农业大学学报,1999.27(5): 1-5.
Du J J, Li S X, Gao Y J *et al*. Effects of N fertilizer on the mechanism of adaptation to water stress and water use of winter wheat[J]. Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 1999,27(5): 1-5.

[10] 东先旺,刘树堂,陶世荣.不同肥水组合对夏玉米水分利用效率及经济效益的影响[J].华北农学报,2000,15(1): 81-85.
Dong X W, Liu S T, Tao S R. Effect of different water and fertilizer combination on WUE and economic effect of summer maize[J]. Acta Agriculturac Boreali-Sinica, 2000,15(1): 81-85.

[11] 汪德水,程宪国,张美荣,周涌. 旱地土壤中的肥水激励机制[J].植物营养与肥料学报,1995,1(1): 64-70.
Wang D S, Cheng X G, Zhang M R, Zhou Y. The excitation mechanism between fertilizer and waterunder dryland condition[J]. Plant Nutrition and fertilizer Science,1995,1(1): 64-70.

[12] 汪德水,张美荣,姚晓晔,等. 变量施肥对冬小麦出苗的水分阈值及水分利用效率的影响[A].汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[C].北京: 中国农业科技出版社.1995.116-122.
Wang D S, Zhang M R ,Yao X Y *et al*. Effect of variable fertilization on water threshold value and WUE of winter wheat germination [A]. Wang D S. The principle of water and fertilizer relationship and regulation techniques in dryland[C]. Beijing: China Agricultural Scientech Press,1995.116-122.

[13] Brown P J. Water use and soil water deletion by dry land wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. Agron.J.,1972,63:43-46.

[14] Porver J F. Soil management for efficient water use soil fertility[A]. Taylor H M *et al* (eds). Limitation to efficient water use in crop production[M]. USA: ASA-CSSA-SSSA, 1983. 87-113.

[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.
Meng Z J, Liu A N,Wu H Q. The mathematical model and optimal scheme of water-fertilizer interaction for water-saving and high yield of summer maize in Shang Qiu test area[J]. Irrigation and Drain,1997, 16(4): 18-21.