

氮磷营养对夏玉米水分敏感性及生理参数的影响

王宗明, 梁银丽

(中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 杨凌 712100)

摘要:依据盆栽试验数据,采用 Jensen 模式,研究了黄土区夏玉米的水分模型。结果表明,玉米在拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期对缺水最敏感,拔节前和灌浆-成熟期敏感性小;较高肥力水平使需水关键期水分敏感性指数增加相对较多,而在非水分关键期增加较少。较高的 N、P 水平增大了玉米叶片的光合速率,中度干旱条件下,N、P 肥对 P_n 的增加幅度大于充分供水时的增加幅度;施用 N、P 增加了玉米叶片的蒸腾速率,但土壤水分条件影响了 N、P 对蒸腾速率的作用;施用 N、P 肥可以提高玉米的单叶 WUE,随水分条件的改善而增加。高 N 处理的玉米根重均低于相应的低 N 处理,施 P 对玉米根系生长有明显的促进作用,中度干旱条件下的增幅大于充分供水时的增幅;不同施 P 处理玉米地上生物量的增幅明显大于不同施 N 处理的增幅;随水分条件的改善,玉米的根冠比增加,不同水分条件下施 N 均降低了根冠比,而施 P 增加了根冠比。

关键词:夏玉米;水分敏感性;氮磷营养;生理生态参数

The effects of nitrogen and phosphorus on the water sensitivity and physiological parameters of summer maize

WANG Zong-Ming, LIANG Yin-Li (Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 751~757.

Abstract: As water is a major factor limiting agricultural productivity in dryland farming, it is very important, and possible, to regulate crop water use through fertilizer application under limited water resources. There are extensive researches reported on water sensitivity of different crops during different growth stages, however, there are few reports on the effect of inorganic nutrients on crop water sensitivity. In terms of methods and crops used in studies, the reports about the impact of inorganic nutrition on crop growth and development under water deficit conditions are inconsistent. The results presented in this paper address three issues: (1) the effect of nitrogen (N) and phosphorus (P) on summer maize's water sensitivity; (2) the function of inorganic nutrition in adjusting summer maize's CO_2 and H_2O exchange parameters and growth of roots and shoots; and (3) better solutions to fertilizer application for better water-saving irrigation schemes.

基金项目:中国科学院知识创新资助项目(KZCX1-06-02-01);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(02-B003)

收稿日期:2002-01-14;**修订日期:**2002-12-10

作者简介:王宗明(1976~),男,内蒙古赤峰人,主要从事生态系统生产力研究。E-mail: wzmoo01@sina.com

Foundation item: Under the auspices of the knowledge innovation project of Chinese Academy of Sciences(No. KZCX1-06-02-01) and grants of state key laboratory of soil erosion and dryland farming the Loess Plateau(No. 02-B003).

Received date: 2002-01-14; **Accepted date:** 2002-12-10

Biography: WANG Zong-Ming, Mainly engaged in the ecosystem productivity. E-mail: wzmoo01@sina.com

Potted summer maize was used in the experiments. Six fertilizer treatments and two water treatments were used. Based on the experimental data, the water supply model of summer maize in the Loess Plateau was proposed with reference to Jensen’s model. The results show that water sensitivity index of summer maize reaches the highest value from the booting to heading stages, and from heading to filling stages, and becomes comparatively low before booting and after filling. At a high fertilizer application rate, a higher water sensitivity index is achieved at key water-demand stages than that at unimportant water-supply stages. Higher N & P application rates also increase the photosynthesis rate, transpiration rate and water-use efficiency. The root dry matter under a high N level is lower than that under a low N level; the use of P boosts root growth obviously, and the enhancement under 50% Relative Soil Water Content (RSWC) is greater than that under 80% RSWC. The increase of above-ground biomass under different P treatments was greater than that under different N treatments distinctly. The root/shoot ratio is increased with the improvement of water condition. Under different water supply conditions, the use of N reduces the root/shoot ratio while the use of P raises it.

Key words: summer maize; water sensitivity; nitrogen and phosphorus; physiological parameter
文章编号:1000-0933(2003)04-0751-07 中图分类号:Q945.79 文献标识码:A

缺水是影响旱作农区农业生产的一个主要限制因子,实行节水灌溉、优化补充供水,通过在作物生育期内进行最优分配,以达到节水、稳产、高效的目的,是缓解水资源紧缺的一条切实可行的途径。如何在有限的水资源条件下“以肥调水”,提高有限水资源的利用效率显得十分重要。作物-水模型(Model of Crop Response to Water, MCRW)是水分供应时间和数量对作物产量影响的数字化模拟,目前对于不同作物各个生长期水分敏感性的研究较多^[1~4],而无机营养对于作物水分敏感性的影响研究则较少。关于在土壤水分亏缺情况下,氮磷营养对植物生长发育的影响,由于研究方法和作物种类不同,报道很不一致。本文试图通过研究氮磷营养水平对玉米水分敏感性 & 水分胁迫下氮磷营养对夏玉米 CO₂/H₂O 交换参数及根冠关系的影响,为合理施肥与节水灌溉提供依据。

1 试验方法

1.1 试验设计

试验于 2001 年 5 月~10 月在中国科学院水利部水土保持研究所试验场内进行。试验采用盆栽,塑料盆内径 20cm,高 30cm,每盆装风干土 12kg,土壤取自长武黑垆土。施肥处理设 2 个氮素水平,高氮(HN)0.4gN/kg 土,低氮(LN)0.2gN/kg 土;3 个磷素水平,高磷(HP)0.6g P₂O₅/kg 土,中磷(MP)0.4 g P₂O₅/kg 土,低磷(LP)0.2 g P₂O₅/kg 土;将氮素及磷素折算成尿素及磷酸二铵,分 2 次施入土中。试验采取随机区组设计,重复 3 次。播种后 SRWC(土壤相对含水量)保持在 75%~85%,每盆留苗 2 株。

将玉米全生育期分为出苗-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆、灌浆-成熟 4 个生育阶段。在玉米生长至 5 叶期时进行第 1 期水分胁迫(SRWC 保持在 50%),每期 20 d,其余时间充分供水(SRWC 保持在 80%)。采用重量法控制水分。数据处理采用二因素方差分析(2-way ANOVA),检验不同 N 素水平、不同 P 素水平以及 N、P 之间交互作用对玉米叶片 CO₂/H₂O 交换参数的影响;利用水分胁迫和充分供水条件下的相对产量及各个生育阶段不同水分处理的相对蒸散量,计算不同营养水平下夏玉米各生育阶段的水分敏感性指数。

1.2 玉米水分敏感性指数计算方法

作物-水分模型是进行节水灌溉和有限水资源优化调配的基础。目前采用的作物产量和水分效率统计模型有两大类:一类反映作物产量与全生育期总蒸散量的关系;另一类反映作物产量与各生育阶段蒸散量的关系。由于在作物的不同生育阶段,缺水对产量的影响不同,第 1 类模型不能反映这一事实;而第 2 类模型不仅表明了水分供应量,而且表明了不同的水分供应时间对作物产量的影响。此类模型常见形式有相加(Blank)模式^[5]、乘积模式(Jensen)模式^[6]。一般认为相乘模式对构成产量的目标反应比相加模式更敏感、更符合实际^[3,5,6],因此本文采用相乘模式:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i}$$

式中, ET_a 、 ET_m 分别为特定气候条件下作物某阶段的实际蒸散量和充分供水条件下的最大蒸散量, Y_a 、 Y_m 分别为缺水 and 充分供水条件下的作物产量, λ_i 为第 i 阶段的缺水敏感指数(幂系数型), 表明第 i 阶段作物因缺水而影响产量的敏感程度指标, i 为生育阶段序号, $i=1, 2, \cdots, n$; n 为划分的作物生育阶段数。对于 Jensen 模型, λ_i 大者称敏感性大, 表示该阶段缺水后减产率大, λ_i 小者称敏感性小, 表示该阶段缺水后减产率小。由上可见 λ_i 是乘法模型的关键性参数。确定 λ_i 值的分析计算方法为: 若某种农作物共有 N 组不同灌溉处理的试验结果, 其实际的各阶段腾发量为 $\{ET_{1k}, ET_{2k}, \cdots, ET_{nk}\}$, 相应的产量为 $Y_k, k=1, 2, \cdots, N$ (本试验中 n 为生长发育阶段数, $n=4$; N 为灌溉处理的组数, $N=2$), 则 λ_i 的求解利用最小二乘法可化为寻求一组 λ_i 值满足下式, 联立求解 n 个方程 $\frac{\partial Q}{\partial \lambda} = 0, (i=1, 2, \cdots, n)$, 得出水分敏感性指数 λ_i 值:

$$\min Q = \sum_{k=1}^N \left(\ln \frac{Y_k}{Y_m} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \ln \frac{ET_{ik}}{ET_{mi}} \right)^2$$

1.3 玉米生理参数测定方法

采用 CI-301 型光合系统测定仪, 于每个生育阶段典型晴日测定玉米叶片的净光合速率(P_n), 蒸腾速率(E)等 4 次, 重复 4 次, 水分利用效率(WUE)按照 $WUE = \frac{P_n}{E}$ 计算^[8]。

2 结果分析

2.1 氮磷营养与玉米水分敏感性指数

2.1.1 夏玉米各阶段水分敏感性指数及变化规律 根据盆栽试验数据, 得出不同氮、磷水平下夏玉米各阶段水分敏感性指数(表 1)。

表 1 N、P 营养水平对夏玉米水分敏感性指数 λ_i 的影响

Table 1 Effect of N、P nutrition on water sensitivity index of summer maize

敏感指数 λ_i Sensitivity index	出苗-拔节 Seedling to booting	拔节-抽穗 Booting to heading	抽穗-灌浆 Heading to filling	灌浆-收获 Filling to harvest
HN	0.1472	0.5745	0.2918	0.1861
LN	0.1428	0.2459	0.1786	0.1087
HP	0.1920	0.4579	0.2436	0.1399
MP	0.1696	0.2730	0.2028	0.1142
LP	0.0725	0.1729	0.1230	0.0894

由表 1 可知, 拔节期以前, 由于叶面积较小, 水分胁迫对夏玉米生长发育影响较小, 对玉米籽粒产量的影响不大, 敏感指数较小。进入拔节期后, 植株茎叶生长迅速, 是夏玉米株体形成的重要时期, 土壤水分供应充足, 有利于植株健壮生长, 积累更多的干物质, 为后期的生殖生长奠定良好的基础; 而且此时气温较高, 蒸腾强度大, 水分亏缺对籽粒产量的形成有很大影响, 敏感指数迅速变大。抽穗-灌浆期, 夏玉米由营养生长向生殖生长过渡, 叶面积系数和蒸腾均达到其一生中的最高值, 生殖生长和体内新陈代谢旺盛, 同时进入开花、授粉阶段, 为夏玉米需水的临界期。此后进入灌浆成熟期, 敏感指数迅速下降, 此时植株体已形成, 植株茎叶累积的养分向穗部器官转移, 此期保证适当的水分供应可以防止叶片早衰, 保持一定的绿叶面积, 积累一定量的干物质, 促进穗部很好地发育, 使灌浆得以顺利进行。因此, 当水分不能满足作物生长发育要求时, 应在足墒播种的条件下, 首先确保拔节-抽穗期的供水, 其次为抽穗-灌浆期的供水。

2.1.2 氮磷水平对玉米水分敏感性指数的影响 如表 1 所示, 对于不同氮肥处理, 在需水关键期拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期, 高氮水平比低氮水平的水分敏感性指数分别增加 133.6% 和 63.4%; 而在出苗-拔节期和灌浆-收获期, 高氮水平比低氮水平增加 3.1% 和 43.4%。

对于不同磷肥处理, 高磷处理增加各生育期玉米水分敏感性指数, 拔节-抽穗期, 高磷水平比中磷、低磷水平的水分敏感性指数分别增加 66.7% 和 164.8%; 抽穗-灌浆期, 高磷水平比中磷、低磷水平增加

20.1%和 98.0%；出苗-拔节期,高磷水平比中磷、低磷水平增加 13.2%和 66.3%；灌浆-收获期,高磷水平比中磷、低磷水平增加 22.5%和 59.8%。以上结果表明,较高肥力水平使需水关键期水分敏感性指数增加相对较多,而在非水分关键期增加相对较少。

2.2 N、P 营养对水分胁迫下玉米 CO₂/H₂O 交换参数的影响

作物 CO₂/H₂O 交换参数包括光合速率(*P_n*)、蒸腾速率(*E*)、水分利用效率(*WUE*)等。这些参数是确定作物水分高效利用的重要指标。为此研究水分胁迫下氮磷营养对玉米叶片 CO₂/H₂O 交换参数的影响,探寻这些参数在不同水分及氮磷水平下的生理响应及变化规律(所列交换参数为拔节-抽穗期测得)。

表 2 N、P 营养对玉米叶片光合速率、蒸腾速率、单叶水分利用效率影响

Table 2 Effect of N、P nutrition on *P_n*, *E* and *WUE* of summer maize

处理 Treatment	<i>P_n</i> (μmol · s ⁻¹ · m ⁻²)		<i>E</i> (μmol · s ⁻¹ · m ⁻²)		<i>WUE</i> (μmol · mmol ⁻¹)	
	50%土壤水分	80%土壤水分	50%土壤水分	80%土壤水分	50%土壤水分	80%土壤水分
	<i>RSWC</i> =50%	<i>RSWC</i> =80%	<i>RSWC</i> =50%	<i>RSWC</i> =80%	<i>RSWC</i> =50%	<i>RSWC</i> =80%
HN	12.28	18.26	5.56	5.87	2.29	2.93
LN	7.96	13.14	3.78	5.35	2.24	2.38
HP	9.72	13.88	4.69	6.48	2.36	2.61
MP	8.05	11.66	4.32	5.21	1.87	1.94
LP	7.85	8.69	3.28	3.55	1.65	1.72

表 3 二因素方差分析结果

Table 3 Result of 2-way ANOVA

生理参数 Physiology parameters	50%土壤水分条件下的差异来源 Source of variance when <i>RSWC</i> =50%			80%土壤水分条件下的差异来源 Source of variance when <i>RSWC</i> =80%		
	氮肥处理(N)	P 肥处理(P)	N×P	氮肥处理(N)	P 肥处理(P)	N×P
	N treatment	P treatment		N treatment	P treatment	
	<i>F</i>	<i>F</i>		<i>F</i>	<i>F</i>	
光合速率 Photosynthesis ratio	76.35***	8.73*	5.72*	20.79***	3.05	3.71
蒸腾速率 Transpiration ratio	13.70*	14.48**	1.50	0.45	15.58***	0.27
水分利用效率 Water use efficiency	2.69	8.31*	0.32	14.01**	11.27**	0.15

* *F* 值的显著性 *F*-values are given and significant effects: * *F*=0.05; * * *F*=0.01; * * * *F*=0.005

2.2.1 水分胁迫下 N、P 营养对玉米叶片光合速率的影响 不论何种氮磷水平,玉米叶片的光合速率均随土壤水分条件的改善而提高,这说明干旱抑制了玉米叶片的净光合速率。N、P 营养水平对不同土壤水分下玉米叶片的净光合速率产生了明显影响。较高的 N 肥水平增大了玉米叶片的 *P_n*,不同水分条件下 N 肥对 *P_n* 的影响均达到显著水平,中度干旱条件下,高 N 比低 N 处理的 *P_n* 增加幅度为 54.3%,大于充分供水条件下的增加幅度 38.9%。中度干旱条件下 P 肥对 *P_n* 的影响差异显著,而充分供水条件下差异不显著(表 2 和表 3)。表明中度干旱条件下施 P 对 *P_n* 的提高有明显作用。方差分析结果表明:充分供水条件下,N、P 交互作用不显著;而在干旱条件下,N、P 之间交互作用显著(表 3)。

2.2.2 水分胁迫下 N、P 营养对玉米叶片蒸腾速率的影响 蒸腾作用强弱可以反映作物吸收水分的能力,施用 N、P 均增加了玉米叶片的蒸腾速率,但土壤水分条件影响了 N、P 对蒸腾速率的作用。中度干旱条件下,高 N 肥处理玉米叶片蒸腾速率比低 N 处理增加 47.4%,而充分供水条件下 N 肥处理间无显著差异。充分供水下,高 P 处理比中 P、低 P 处理叶片蒸腾速率增加幅度为 24.3%、82.5%,明显大于中度干旱条件下的增加幅度(8.6%和 42.9%)。中度干旱条件下,不同氮素水平、不同磷素水平之间的蒸腾速率差异显著,N、P 间无交互作用;充分供水时,不同磷素水平之间差异显著,而不同氮素之间差异不显著,N、P 交互作用不显著(表 2 和表 3)。

2.2.3 水分胁迫下 N、P 营养对玉米单叶水分利用效率的影响 不论何种肥力水平,玉米的单叶 *WUE* 均随水分条件的改善而提高,施用 N、P 肥可以提高玉米的单叶 *WUE*,中度干旱情况下高 N 处理比低 N 处

理单叶 WUE 的增加幅度为 2.2%, 差异不显著; 充分供水时增幅为 23.1%, 差异显著。中度干旱时高 P 处理比中 P、低 P 处理单叶 WUE 的增加幅度分别为 26.2%、43.3%, 充分供水时高 P 处理比中 P、低 P 处理下单叶 WUE 的增加幅度分别为 34.5%、51.7%, 差异均显著; N、P 之间无交互作用(表 2 和表 3)。

2.3 N、P 营养对玉米根冠生长的影响

图 1 表明, 无论 N、P 水平高低, 单株玉米的根重均随水分条件的改善而提高, 但 N、P 对玉米根系生长的影响不同。两种水分水平上, 高 N 处理的玉米根重均低于相应的低 N 处理。施 P 对玉米根系生长有明显的促进作用, 高 P 处理的根重均大于中 P、低 P 处理; 中度干旱情况下, 增幅分别为 67.8%、89.6%; 高于充分供水时的增幅(分别为 48.1%、64.7%)。

由图 2 可知, 施用 N、P 均增加了玉米的地上部生物量, 不同施 P 处理玉米地上生物量的增幅明显大于不同施 N 处理的增幅。两种水分处理下, 高 N 处理的玉米地上部生物量比相应的低 N 处理地上部生物量增加幅度分别为 20.4%、22.8%; 施 P 对玉米根系生长有明显的促进作用, 高 P 处理的地上生物量均大于中 P、低 P 处理, 中度干旱情况下, 增幅分别为 72.8%、89.6%; 高于充分供水时的增幅(分别为 28.1%、64.7%)。

随水分条件的改善, 玉米的根冠比均增加, 由于 N、P 对地上、地下部生长的不同影响, N、P 对玉米根冠比有不同的影响。如前所述, 施 N 降低了根干重, 同时增加了玉米的地上生物量, 因此, 不同水分条件下施 N 均降低了根冠比, 而施 P 正好相反, 增加了根冠比(图 3)。

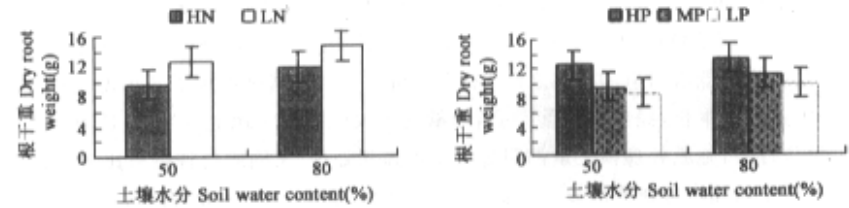


图 1 N、P 营养对玉米根干重的影响

Fig. 1 Effect of N、P nutrition on root dry matter of summer maize

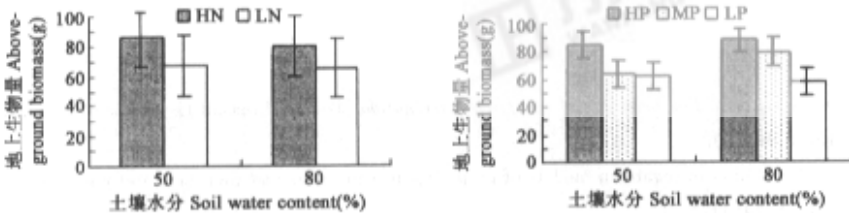


图 2 N、P 营养对玉米地上生物量的影响

Fig. 2 Effect of N、P nutrition on above-ground biomass of summer maize

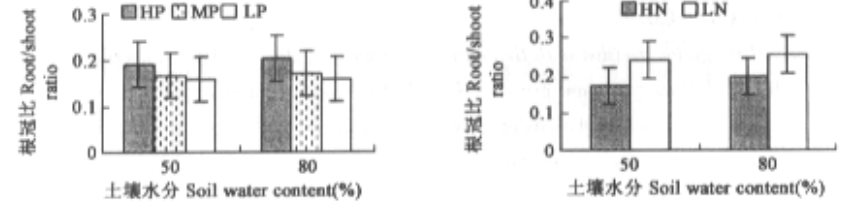


图 3 N、P 营养对玉米根冠比的影响

Fig. 3 Effect of N、P nutrition on root/shoot ratio of summer maize

3 讨论

3.1 对于无机营养对作物 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 交换参数的影响研究,不同学者所得结果不一致。例如,春小麦、水稻和菜豆等植物的高氮植株对干旱较敏感,干旱下光合速率降低幅度也较大^[7~11],棉花、茶树等植物的高氮植株对于干旱的敏感性较小,干旱下光合速率降低的幅度也小^[12,13];对羊茅草的研究发现,充分供水时,高氮植株的光合速率明显提高,但蒸腾强度提高更大,导致水分利用效率降低,但在干旱条件下,高氮植株的 WUE 高于低氮植株^[14]。水分胁迫时,高肥条件下高粱和糜子的光合速率比低肥条件下的高,蒸腾速率并未升高,甚至有所降低,因而高肥条件下 WUE 升高^[15];水分胁迫条件下,施用氮磷肥使旱地小麦光合速率增加,蒸腾强度下降,从而增加了水分利用效率,表明因水分胁迫导致的水分利用效率的减少可以通过施用氮磷肥得到部分补偿^[16]。

干旱抑制了玉米叶片的净光合速率,不同水分条件下,较高的氮肥水平均增大了玉米叶片的净光合速率,中度干旱条件下,高氮植株 P_n 增加幅度大于充分供水条件下的增加幅度,这表明高氮植株对干旱较敏感;中度干旱条件下 P 肥对 P_n 的影响大于充分供水时。施用氮、磷均增加了玉米叶片的蒸腾速率,中度干旱时,高 N 玉米叶片蒸腾速率比低 N 处理增加明显,而充分供水时差异不显著;磷肥对蒸腾速率的影响则随土壤水分条件的改善而降低。玉米的单叶 WUE 均随水分条件的改善而提高,施用 N 、 P 肥可以提高玉米的单叶 WUE ,施 P 对玉米单叶 WUE 的促进作用要大于施 N 处理。

3.2 在提高土壤水分和养分资源利用效率的诸多途径中,增加根系对水分和养分的吸收是一个重要环节,而根系吸收功能的加强,与根系的发育有关。据报道,与地下部相比较,无机营养对水稻地上部生长的促进作用更大,并且减消了植株的根冠比^[17];在缺磷逆境下,植物发育增强^[18],缺磷胁迫早期促进根系生长,根冠比增大是植物降低磷胁迫的机制之一^[19];干旱情况下增施磷肥增加了冬小麦根数,提高了叶面积、生物量,可显著加速根系生长,提高根干重^[20];营养缺乏不仅限制作物地上部不生长,还限制其根系生长。在供水充足和干旱条件下,施肥处理根干重都明显大于不施肥处理,不施肥处理根冠比大于施肥处理^[21]。

单株玉米的根干均随水分条件的改善而提高,两种水分处理下,高 N 处理的玉米根重均低于相应的低 N 处理;施 P 对玉米根系生长有明显的促进作用,中度干旱条件下的增幅大于充分供水时的增幅。施用 N 、 P 均增加了玉米的地上部生物量,施 P 处理的增幅明显大于施 N 处理的增幅。随水分条件的改善,玉米的根冠比均增加, N 、 P 对玉米根冠比有不同的影响,不同水分条件下施 N 均降低了根冠比,而施 P 增加了根冠比。

References:

- [1] Chen Y X, Kang S Z. *The principle of insufficient irrigation*. Beijing: Press of Hydraulic Engineering and Electric Power, 1995. 86~89.
- [2] Chen Y X. Validation in regard to models of crop response to water and their sensitivity indexes. *Irrigation and Drainage*, 1995, **14**(4): 1~6.
- [3] Liang Y L, Shan L, Kang S Z. Crop-water model for arid cropland in loess plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **9**: 86~90.
- [4] Rong F T, Wang Y R. Study on water production function of main crops in shanxi province. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, **1**: 78~83.
- [5] Blank H. *Optimal irrigation decision with limited water*. Denver: Colorado states university, 1975. 245~268.
- [6] Kozlowski T. *Water deficits and plant growth*. New York: Academic press, 1986. 11~22.
- [7] Ishihara K, Iida O, Hirasawa T. Relationship between nitrogen content and photosynthetic rate of rice plants with reference to stomatal aperture and conductance. *Jap. J. Crop. Sci.*, 1979, **48**: 543~550.
- [8] Morgan J A. The effect of N nutrition on the water relation and gas exchange characteristics of wheat. *Plant Physiol.*, 1986, **80**: 52~58.
- [9] Ishihara K, Iida O, Hirasawa T. Effects of air humidity on the photosynthetic rate in leaf of rice plant. *Jap. J. Crop. Sci.*, 1986, **55**: 465~473.

- [10] Xue Q W, Chen P Y. The impact of N nutrient on water condition and photosynthesis of wheat under arid soil condition. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1990, **16**(1): 49~56.
- [11] Shang Guan Z P. Adjustment of nitrogen nutrition on photosynthetic properties of dryland wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, **3**(2): 105~109.
- [12] Nagafajah S. The effect of nitrogen on plant water relation in tea (*Camellia sinensis*). *Physiol. Plant*, 1981, **51**: 304~308.
- [13] Radin J W, Ackerson R C. Water relation of cotton plant under nitrogen deficiency Ⅲ. Stomatal conductance, photosynthesis and ABA accumulation during drought. *Plant Physiol.*, 1981, **67**: 115~119.
- [14] Ghashagaie J, Saugier B. Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthetic response of tau fescue to water deficit. *Plant Cell Environ.*, 1989, **12**: 261~271.
- [15] Zhang Q Z, Jing J H, Wang S T. Effect of water stress on photosynthesis and water use efficiency in sorghum and proso millet seedlings under different fertility conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1993, **11**(2): 46~49.
- [16] Tian X H, Li S X. Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2000, **20**(1): 22~28.
- [17] Yambao E B O', Toole J. C. Effects of nitrogen and root medium water potential on growth, nitrogen uptake and osmotic adjustment of rice (*Oryza salive cultiar* IR36). *Physiol. Plant*, 1984, **60**: 507~515.
- [18] Anuradha M, Narayanan A. Promotion of root elongation by phosphorus deficiency. *Plant & Soil*, 1991, **136**: 273~275.
- [19] Rufty Jr TW, Israel DW, Volk R J, *et al.* Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. *J. Ep. Bot.*, 1993, **44**: 879~891.
- [20] Liang Y L. The adjustment of soil water and nitrogen phosphorus nutrition on root growth and water use of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(3): 258~264.
- [21] Xu M, Shan L. Effects of inorganic nutrition on the adaptations of spring wheat to drought. *Acta Phytoecologica Et Geobotanica Sinica*, 1991, **15**(1): 79~97.

参考文献:

- [1] 陈亚新, 康绍忠. 非充分灌溉原理. 北京: 水利电力出版社, 1995. 86~89.
- [2] 陈亚新. 作物-水模型及其敏感指标的确认. 灌溉排水, 1995, **14**(4): 1~6.
- [3] 梁银丽, 山仑, 康绍忠. 黄土旱区作物-水分模型. 水利学报, 2000, **9**: 86~90.
- [4] 荣丰涛, 王仰仁. 山西省主要农作物水分生产函数中参数的试验研究. 水利学报, 1997, **1**: 78~83.
- [10] 薛青武, 陈培元. 土壤干旱条件下氮素营养对小麦水分状况和光合作用的影响. 植物生理学报, 1990, **16**(1): 49~56.
- [11] 上官周平. 氮素营养对旱作小麦光合特性的调控. 植物营养与肥料学报, 1997, **3**(2): 105~109.
- [15] 张权中, 荆家海, 王韶唐. 不同肥力水平下水分胁迫对高粱、糜子幼苗光合作用及水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 1993, **11**(2): 46~49.
- [16] 田霄鸿, 李生秀. 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应. 西北植物学报, 2000, **20**(1): 22~28.
- [20] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节. 生态学报, 1996, **16**(3): 258~264.
- [21] 徐萌, 山仑. 无机营养对春小麦抗旱适应性的影响. 植物生态学与地植物学学报, 1991, **15**(1): 79~97.