

不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响

于亚军<sup>1,2</sup>, 李 军<sup>1</sup>, 贾志宽<sup>1</sup>, 王 蕾<sup>3</sup>

- (1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨陵 721200;
2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
3. 西北农林科技大学职成学院, 陕西 杨陵 721200)

摘 要: 在宁南(海原)旱农试验区,通过谷子生育期补充灌水模拟当地不同降水年型,研究了不同水肥配合对谷子产量、水分利用效率(WUE)及旗叶光合特性的影响。结果表明:在欠水年型(不补灌)和平水年型(中补灌和高补灌)水分条件下,谷子产量和WUE的最高值均在中肥水平(N120 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>108 kg/hm<sup>2</sup>)时获得。然而,在欠水年型,从施肥增加当季作物产量和提高有限水分利用效率方面考虑,中肥水平的施肥量并不经济,而应适当减少施肥量,以节约农业生产成本,但从培肥地力的角度看,这种施肥水平是可取的。在丰水年型(高补灌)水分供应条件下,高肥水平(N180 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>162 kg/hm<sup>2</sup>)可使谷子产量达到最高,而中肥水平WUE却最高,因此,从提高旱作农田作物WUE和肥料利用效率角度看,施中等肥量更为合理。不同水肥条件通过改善土壤水分状况而改善作物净光合速率(P<sub>n</sub>)和蒸腾速率(T<sub>r</sub>),在水分亏缺的年份,作物受土壤水分胁迫严重,施肥对P<sub>n</sub>和T<sub>r</sub>的效应不明显;但当土壤水分供应状况较好时,P<sub>n</sub>和T<sub>r</sub>随施肥量的增加有增加趋势。

关键词: 水肥调控; 谷子; 水分利用效率; 水分胁迫; 光合特性

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006)02-0087-04

Effect of Different Water and Fertilizer on Yield, WUE and  
Photosynthetic Characteristics of Millet in Southern Ningxia Semi-arid Area

YU Ya-jun<sup>1,2</sup>, LI jun<sup>1</sup>, JIA Zhi-kuan<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>

- (1. College of Agronomy, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
3. College of Vocational and Adult Education,
- Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In Southern Ningxia(Haiyuan), through supplementary irrigation during key growth period of millet, the different patterns of annual rainfall was simulated. The effects of different water and fertilizer on millet yield, water use efficiency (WUE) and photosynthetic characteristics of flag leaves were studied. The results of experiment showed that, in the dry year (no supplementary irrigation) and normal year(low supplementary irrigation and mid-supplementary irrigation), the highest yield and WUE are the treatment of mid-fertilizer(N120 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>108 kg/hm<sup>2</sup>). However, in the dry year, the quantity of fertilization should reduce properly because it's uneconomical in increasing yield and WUE of millet, which can save the cost. But to land improvement, this level of fertilizer is rational. In the humid year (high supplementary irrigation), the highest yield is obtained in the treatment of high-fertilizer(N180kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>162 kg/hm<sup>2</sup>), but WUE is the highest under mid-fertilizer. So, in order to improve WUE and fertilizer use efficiency, the mid-fertilizer is more rational than high-fertilizer. Through improving the soil moisture condition, net photosynthetic rate (P<sub>n</sub>) and transpiration rate(T<sub>r</sub>) of flag leaves are enhanced through coordination of different water and fertilizer. Under condition of soil water stress, the crop faced soil water stress seriously, the effect of fertilization in improving P<sub>n</sub> and T<sub>r</sub> isn't obvious, but when the soil moisture is sufficient, P<sub>n</sub> and T<sub>r</sub> improve with the increase of fertilizer correspondingly.

**Key words:** regulation of water and nutrients; millet; WUE; soil water stress; photosynthetic characteristics

水分亏缺和肥力低下是限制旱作农田产量和水分利用效率(WUE)提高的两个重要因素。研究表明,提高土壤肥力水

平,发挥“以肥调水”的作用是增进旱地农田有限降水生产潜力的重要方面。然而,随着干旱问题的日趋严重和农田投肥强度

① 收稿日期: 2005-09-12

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA2Z4021- 2); 国家自然科学基金项目(40371077 和 30471024)

作者简介: 于亚军(1978-),甘肃灵台人,硕士研究生,主要从事半干旱区资源开发与高效耕作制度研究。

© 2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的增加,水分亏缺已成为限制作物产量提高的首要因素<sup>[1]</sup>。同时,研究表明<sup>[2,3]</sup>,增加施肥可以提高作物的蒸腾效率,增强作物的光合能力,但施肥对提高叶片蒸腾速率和光合速率的效应受制于作物受土壤水分胁迫的程度。因此,在宁南半干旱偏旱区降雨量十分有限的旱作农田,实施作物生育期补充灌水是改善农田土壤水分状况,提高作物蒸腾效率,增强光合能力,实现作物高产稳产的重要途径。试验通过在谷子生育期补充灌水模拟当地不同降水年型,研究了不同水肥条件对旱地谷子产量、WUE 和旗叶光合特性的影响,为旱地农田进行合理水肥调控,增强作物光合能力,增加产量提供理论指导。

### 1 试验区概况和试验方法

#### 1.1 试验区概况

试验于 2004 年在宁夏海原县贾塘乡旱地农业试验区进行,试验地土壤类型主要为黄绵土,土壤养分测定结果为:有机质 14.3 g/kg,碱解氮 47 mg/kg,速效磷 7.6 mg/kg,速效钾 158 mg/kg,全氮 0.91 g/kg,全磷 0.69 g/kg。属低等肥力水平<sup>[4]</sup>。试验所在地海拔 1 780 m,年降水量 250~350 mm,蒸发量达 1 000~1 100 mm<sup>[5]</sup>,80% 保证率的年降水量仅 200~250 mm。通过对多年降雨量资料分析,当地降雨为丰水年型的几率为 14%,平水年型的几率为 23%,枯水年型的几率为 63%<sup>[6]</sup>。因此,当地有限自然降水满足作物生育期需水量的缺口较大,仅依赖自然降水很难实现作物的高产稳产。

#### 1.2 试验方法

水肥调控试验的设计是在不破坏土壤自然结构的情况下,做成田间试验微区,面积为 1 m×1 m=1 m<sup>2</sup>,四周用塑料纸(三层)隔开以防水分侧渗,塑料纸桶埋深 1.2 m,供试作物为谷子,品种为大同 14 号,播种密度每小区 34 株(34 万株/hm<sup>2</sup>),谷子播种期为 4 月 22 日,收获期为 10 月 6 日。生育期降水量 225.1 mm,属欠水年型<sup>[7]</sup>。试验以补充灌水量和施肥量二因素随机区组设计,共 4×4=16 个处理,3 次重复。

补充灌水量的确定及实施:研究认为,旱地谷子生育期需水量为 380~420 mm,且谷子播种期—拔节期、拔节期—抽穗期和抽穗期—成熟期需水量分别占全生育期需水量 29%、32%、39%<sup>[8,9,10]</sup>。同时,据多年降雨量分析,当地降雨平水年型谷子生育期降雨量可满足生育期需水量的 70%。据此,设计无补灌 X<sub>0</sub>、低补灌 X<sub>1</sub>、中补灌 X<sub>2</sub> 和高补灌 X<sub>3</sub> 四种灌水水平,以模拟当地不同降水年型。具体补灌水量如表 1。氮(N) 磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 水平(kg/hm<sup>2</sup>):无肥 A<sub>0</sub>:(0 0);低肥 A<sub>1</sub>:(60 54);中肥 A<sub>2</sub>:(120 108);高肥 A<sub>3</sub>:(N180 162)。肥料为尿素和磷酸二铵作基肥一次施入。

表 1 补充灌水因素水平		mm		
补水时期	播种期—拔节期	拔节期—抽穗期	抽穗期—成熟期	总补水量
需水比例	29%	32%	39%	
补水量	X <sub>0</sub>	0	0	0
	X <sub>1</sub>	11.6	12.8	15.6
	X <sub>2</sub>	23.2	25.6	31.2
	X <sub>3</sub>	34.8	38.4	46.8

在谷子拔节期—抽穗期补充灌水 10 d 后,每小区选择完全展开的旗叶 4~5 片为供试叶片,即每一水肥处理水平共选择 12~15 片叶子,用美国 LI-COR 公司制造的 Li-6400 便携式光合测定仪测定叶片净光合速率(P<sub>n</sub>)和蒸腾速率(T<sub>r</sub>)。数据分析时将极端值、异样值剔除,取其算术平均值。

试验数据用 SAS(8.0) 统计软件进行分析,多重比较采用 Duncan 氏新复极差法进行。

### 2 结果与分析

#### 2.1 不同水肥条件对谷子抽穗期 0~200 cm 土层贮水量的影响

作物抽穗期是需水的关键时期,此时土壤的水分状况对产量的形成尤为重要,同时又直接影响作物叶片蒸腾速率和光合能力。从图 1 可见,补充灌水明显改善了谷子抽穗期土壤水分状况,但在不同的水肥条件,由于作物生长发育状况差异造成对土壤水分消耗程度不同,即使在同一补灌水平下,不同施肥处理 2 m 土层贮水量也明显不同。总的来看,逐施肥量的增加,土壤水分贮量呈下降趋势。特别在高补灌条件下,由于水肥条件较好,作物营养体生长旺盛,对水分的消耗较大,土壤贮水量比高补灌无肥处理和低肥处理均低,与中补灌条件下中肥处理和高肥处理土壤贮水量相当。可见,施肥在发挥“以肥调水”作用的同时,也加剧了土壤水分消耗

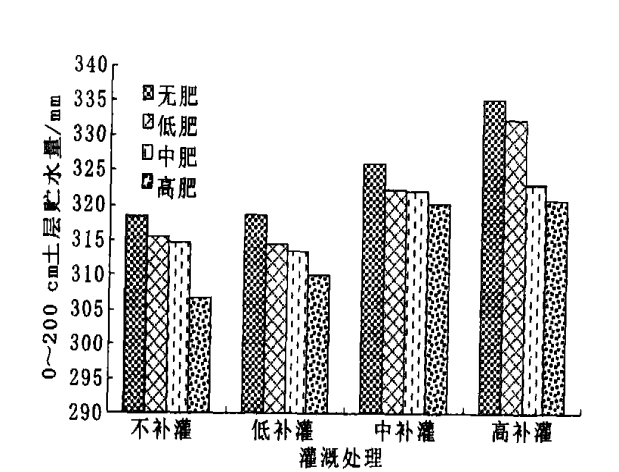


图 1 谷子抽穗期 0~200 cm 土层贮水量情况

#### 2.2 不同水肥条件对谷子产量和水分利用效率(WUE)的影响

不同水肥条件对谷子产量和水分利用效率(WUE)的影响见表 2。表 2 中籽粒产量和 WUE 后的字母为 Duncan 氏新复极差法差异显著性标记。根据当地 2004 年谷子生育期降水量,低补灌和中补灌与自然降雨量之和基本可满足作物生育期需水量的 70% 左右,属平水年型范围,而高补灌和自然降雨量之和基本可满足作物生育期需水量,属丰水年型。从表 2 可以看出,通过补充灌水模拟不同降水年型,随农田水分供应条件的改善,产量和 WUE 得到不同程度的提高。总体来看,在欠水年型(无补灌)水分条件下,谷子产量和 WUE 最差,而在丰水年型(高补灌)水分条件下,产量和 WUE 最好。然而,从多重比较结果看,由于水肥互促效应,在欠水年型,中肥处理与平水年型无肥和低肥处理产量和 WUE 并无显著性差异,在丰水年型,无肥和低肥处理与平水年型低肥、中肥和高肥处理产量和 WUE 差异也不显著。由此可见,当农田水分供应条件差异不大时,施肥能够发挥“以肥调水”的作用,补偿水分亏缺对作物产量的限制,使欠水年产量和 WUE 同样可达到平水年水平。水资源在旱作农区弥足珍贵,因此,通过合理增施化肥,加快低肥力农田的培肥进度,在应对干旱形势日趋严重对我国旱作农田农业生产的限制方面十分重要。

表 2 不同水肥处理对谷子产量和水分利用效率的影响

处理	生物产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生育期耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
X <sub>0</sub> A <sub>0</sub> (CK)	6696.0	2113.5	G	320.74
X <sub>0</sub> A <sub>1</sub>	7077.0	2244.0	G	321.36
X <sub>0</sub> A <sub>2</sub>	7363.5	2596.5	F	323.79
X <sub>0</sub> A <sub>3</sub>	6445.0	2157.0	G	316.98
X <sub>1</sub> A <sub>0</sub>	6183.0	2574.0	F	345.58
X <sub>1</sub> A <sub>1</sub>	6885.0	2626.5	DF	350.64
X <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	8538.0	3052.5	CD	350.20
X <sub>1</sub> A <sub>3</sub>	8764.5	2911.5	DE	349.34
X <sub>2</sub> A <sub>0</sub>	7950.0	3066.0	CD	367.63
X <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	8250.0	3213.0	BCD	369.01
X <sub>2</sub> A <sub>2</sub>	7978.5	3349.5	BC	373.76
X <sub>2</sub> A <sub>3</sub>	8976.0	3444.0	B	372.30
X <sub>3</sub> A <sub>0</sub>	8602.5	3417.0	B	374.94
X <sub>3</sub> A <sub>1</sub>	9502.5	3516.0	B	374.48
X <sub>3</sub> A <sub>2</sub>	10338.0	4317.0	A	379.54
X <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	10692.0	4356.0	A	388.03

注: 表中数据均为 3 次重复平均值; 数据后不同字母表示在  $p < 0.01$  水平上差异显著。

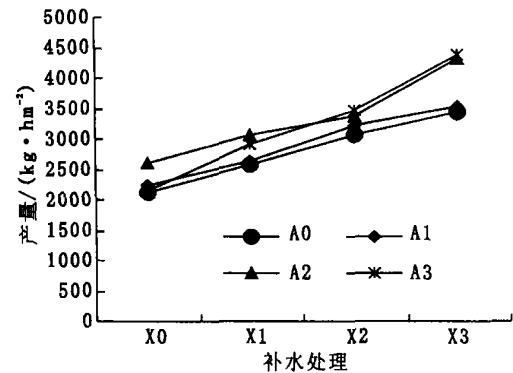


图 2 不同施肥量下补水对产量的影响

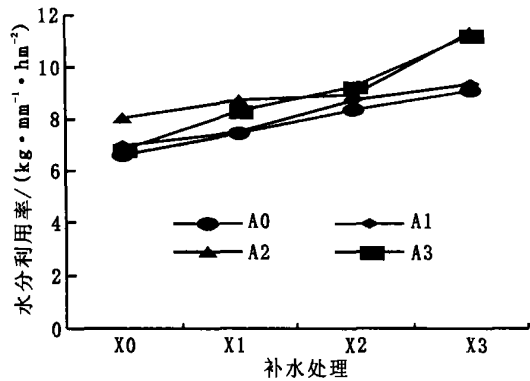


图 4 不同施肥量下补水对 WUE 的影响

2.3 不同水肥条件对谷子旗叶净光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )的影响

不同补水量条件下, 施肥对谷子旗叶净光合速率( $P_n$ )和蒸腾速率( $T_r$ )影响如图 6 和图 7 所示。从图 6 可以看出, 在没有补灌条件时, 不同施肥处理对谷子净光合速率( $P_n$ )的影响很小, 可见, 在当地欠水年型降水条件时, 由于作物受到土壤水分胁迫, 施肥对净光合速率的影响很小。在有补

为了进一步阐明水肥互促进作用对旱作农田增产和 WUE 的提高效应, 分别分析了不同施肥量下补水(图 2 和图 4)及不同补水量下施肥(图 3 和图 5)对谷子产量和 WUE 的影响。从图 2 可见, 在不同施肥水平下, 谷子产量随生育期补水量的增加呈明显的增加趋势; 在不补灌和低补灌条件下, 中肥产量均高于其它施肥水平, 比 CK 分别增产 22.9% 和 44.4%; 而在中补灌和高补灌时, 高肥产量均高于其它施肥水平, 且在高补灌高肥处理时产量达到最高, 为 4 356.0 kg/hm<sup>2</sup>, 比 CK 增产 106%。低肥处理和无肥处理产量随补水量的增加增产趋势基本一致, 表明作物生育期补充灌水在一定程度上可以补偿土壤肥力低下对产量的限制作用。从图 3 可以看出, 在不同灌水量条件下, 增加施肥对谷子产量的影响有所不同, 当施肥量不大(无肥、低肥和中肥水平)时, 不同量的补充灌水均有增产效应, 但在高施肥量条件下, 不补灌和低补灌产量有所下降, 分别比中肥处理低 16.9% 和 4.6%。表明当农田水分亏缺时, 施肥量过大对提高作物产量作用不明显<sup>[10]</sup>。

从不同水肥条件对 WUE 的效应(图 4 和图 5)看, WUE 和谷子产量随不同水肥处理变化趋势基本一致, 但 WUE 的最高值是在高补灌中肥处理时获得, 表明, 即使在农田水分供应充足时, 作物 WUE 的高值并非一定在产量最高时获得。因此, 从提高旱作农田水分利用效率和肥料利用率两方面考虑, 在丰水年型, 施中等肥量对谷子生产更为经济。

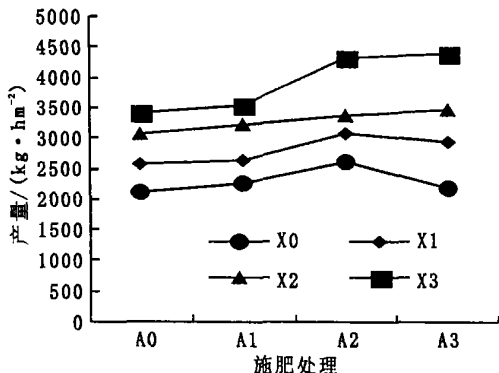


图 3 不同补水量下施肥对产量的影响

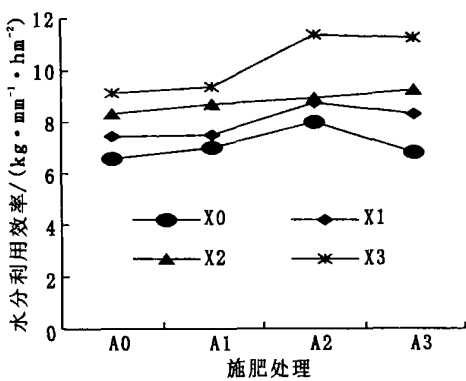


图 5 不同补水量下施肥对 WUE 的影响

灌条件时, 随施肥量的增加, 谷子旗叶净光合速率( $P_n$ )均呈先上升后下降的变化趋势。结合谷子抽穗期 0~200 cm 土层贮水量状况分析可知, 施肥对提高作物叶片净光合速率的效应受土壤水分状况的影响很大, 当土壤水分状况较好时, 作物净光合速率随施肥量增加而增加, 但当作物受到土壤水分胁迫时, 增加施肥对提高净光合速率的作用很小。

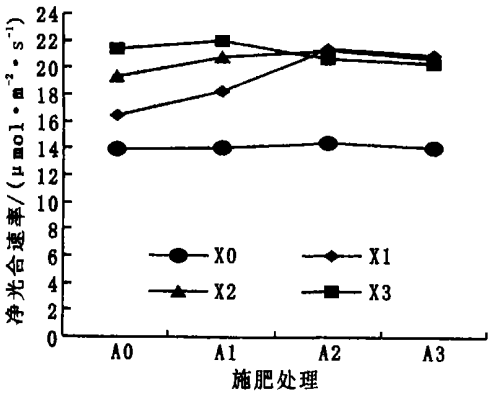


图 6 不同补灌水量对谷子旗叶  $P_n$  影响

从不同补灌水条件下谷子旗叶蒸腾速率( $T_r$ )随施肥量的变化情况(图 7)看,不同水肥条件配合对谷子旗叶  $T_r$  的影响不同。当不补灌时,蒸腾速率随施肥量的增加变化不明显,在低补灌和中补灌条件下,蒸腾速率随施肥量的增加呈上升趋势。但在高补灌条件下,由于中肥处理和高肥处理时土壤贮水量偏低,作物蒸腾作用受到影响,蒸腾速率明显下降。李世清等<sup>[12]</sup>研究认为,施肥以后作物蒸腾损失的水分增加,而蒸发损失的水分减少,蒸腾与蒸散( $T/ET$ )所消耗的水分比值明显提高。也有人在冬小麦上研究表明<sup>[3,13]</sup>,施肥对叶片蒸腾速率的影响明显受到土壤水分的影响,随土壤相对含水量的下降,高施肥量时叶片蒸腾速率下降比低施肥量时快,且当严重土壤水分胁迫时,高施肥量叶片蒸腾速率反而低于低施肥量叶片。从本试验结果看,施肥对谷子旗叶蒸腾速率的影响受土壤水分状况的影响很大,在土壤水分供应不足时,随施肥量的增加叶片蒸腾速率的增加不明显,但当土壤水分状况较好时,施肥有增加叶片蒸腾速率的趋势。

3 小 结

试验以谷子生育期补充灌水模拟不同降水年型,研究了宁南旱地谷子田不同水肥条件对谷子产量和 WUE 的影响。结果表明,农田水分亏缺是限制旱地谷子高产和 WUE 提高的首要因素,但合理增施化肥,加快低肥力农田培肥进度,对

参考文献:

[ 1 ] 刘巽浩. 对我国西北半干旱地区农业若干规律性问题的探讨[ J ]. 干旱地区农业研究, 2000, 18( 1 ): 1- 8.

[ 2 ] 李秧秧. 无机营养提高作物抗旱性的生理基础[ A ]. 山 仑, 陈培元. 旱地农业生理生态基础[ M ]. 北京: 科学出版社, 1998. 222- 232.

[ 3 ] 杜建军, 王同朝, 田霄鸿, 等. 氮素营养对水分胁迫下冬小麦光合效率的影响[ A ]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[ M ]. 北京: 中国科技出版社, 1995. 145- 149.

[ 4 ] 信乃谄, 王立祥. 中国北方旱区农业[ M ]. 南京: 江苏科技出版社, 1998. 296- 298.

[ 5 ] 李军, 邵明安, 王立祥. 旱作糜子田水分利用调控技术研究[ J ]. 西北农业学报, 2002, 11( 3 ): 122- 127.

[ 6 ] 张万宝, 骆安胜. 宁南山区窖灌农业非充分灌溉制度试验[ J ]. 宁夏农林科技, 2003, ( 5 ): 9- 10.

[ 7 ] 廖允成, 张景林, 王留芳, 等. 宁南旱区粮食生产与降水丰歉年景的划分[ J ]. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18( 3 ): 180- 183.

[ 8 ] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰, 等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[ M ]. 北京: 气象出版社, 1993. 84- 92.

[ 9 ] 赵聚宝, 李克煌. 干旱与农业[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1995.

[ 10 ] 冷石林, 韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术[ M ]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 112- 118.

[ 11 ] 苗果园, 伊 钧. 旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[ J ]. 作物学报, 1997, 23: 263- 270.

[ 12 ] 山 仑, 陈培元. 旱地农业生理生态基础[ M ]. 北京: 科学出版社, 1998. 222- 232.

[ 13 ] 李世清, 王喜庆, 高亚军, 等. 施肥对提高作物蒸腾, 减少蒸发的影响[ A ]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理和调控技术[ M ]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 187- 190.

[ 14 ] 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[ J ]. 植物生理学报, 1990, 16( 1 ): 49- 56.