

旱塬冬小麦水分利用特征及对施肥的响应^{*}

戚龙海^{1,2}, 党廷辉¹, 陈璐³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:为了揭示施肥对黄土高原旱地冬小麦水分利用效率(WUE)的影响,通过对不同施肥处理条件下水分利用效率相关指标的研究发现:增施氮肥降低了小麦生育前期的叶片 WUE,而提高了小麦生育后期的叶片 WUE,并显著提高了小麦的叶面积指数(LAI),而增施磷肥效果不明显。增施氮肥显著提高了小麦的生物量和产量,从而提高了相应的生物量 WUE 和产量 WUE;增施磷肥对小麦的生物量和产量的提高有一定的促进作用,但对生物量 WUE 和产量 WUE 的提高不明显。生物量、产量、LAI 和相应的生物量 WUE、产量 WUE 都呈极显著正相关,说明通过施肥提高了小麦的 LAI,进而提高了群体光合效率和干物质积累,从而提高了水分利用效率。

关键词:水分利用效率;施肥;旱地;叶面积指数;冬小麦

中图分类号:S512.11.062;S512.11.01

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)03-0105-05

The Water Use Characteristics of Winter Wheat and Response to Fertilization on Dry-land of Loess Plateau

QI Long-hai^{1,2}, DANG Ting-hui¹, CHEN Lu³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The impact of fertilization on water use efficiency (WUE) of winter wheat on dry-land of Loess Plateau was researched through observing the factors about water use efficiency under different fertilization treatments. The results show that increasing nitrogen application decreased the leaf WUE in prior period of growing periods but increased it in later period and increased the LAI of wheat. There was no obvious impacts on leaf WUE and LAI by increasing the phosphate fertilizer. Increasing nitrogen application significantly increased WUE in level of biomass and yield by increasing biomass and field of wheat and more phosphate fertilizer application increased the biomass and yield but was no significant impacts on WUE in level of biomass and yield. Correlation analysis between biomass, yield, LAI and WUE were significantly correlated because of increasing the LAI of wheat by fertilizing and then increasing the photosynthetic efficiency of population and accumulation of dry matter and increasing the WUE finally.

Key words: water use efficiency; fertilization; dry-land; leaf area index (LAI); winter wheat

水资源已成为制约全球农业发展的重要因子,无论在雨养区或者是灌溉区,进一步提高水分利用效率是当今农业实现水资源持续高效利用的重大课题。黄土高原地区生态环境脆弱,水分不足是限制农田系统生产力提高的首要因素。而在径流、渗漏、

无效土面蒸发接近于最大限度的控制之后,提高作物本身的水分利用效率(WUE)就成为进一步发展旱作农业和节水农业的一个中心问题^[1]。也唯有如此,才有可能在进一步大幅度减少农业用水方面取得新的突破^[2]。WUE 本身作为评价作物生长适宜

^{*} 收稿日期:2009-01-04

基金项目:国家“973”计划项目(2005CB121102);中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-424-2)

作者简介:戚龙海(1983-),男,硕士研究生,主要从事土壤环境和水分利用的研究。E-mail:qilonghai@163.com

通信作者:党廷辉(1964-),男,博士,研究员,主要从事土壤作物养分循环与管理研究。E-mail:dangth@ms.iswc.ac.cn

程度的综合生理生态指标已被广泛应用。国内外学者已就作物 WUE 做了很多工作,国外在 20 世纪 60 年代开始叶片水平上 WUE 的研究^[3],80 年代以后相当广泛^[4-5],随后开始作物节水生理基础的研究。国内关于 WUE 的研究起步较晚,娄成后和王天铎^[6]将作物 WUE 分为叶片水平、群体水平和产量水平,并取得大量的成果^[7],李俊等^[8]认为群体 WUE 可表征田间或区域的水分利用,这些都丰富了作物 WUE 的研究内涵。但对小麦 WUE 的系统研究至今还不多,为此研究了产量水平、生物量水平和叶片水平 WUE 的影响因素及其关联性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 - 2008 年在中国科学院长武农业生态实验站实施。本区属暖温带半湿润易干旱气候区,年均降水 584.1 mm,季节不均,7 - 9 月降水占全年降水 50 % 以上。年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d。试验布设前 2007 年耕层 0 - 20 cm 土壤含有机质 14.3 g/kg,全氮 0.97 g/kg,碱解氮 68.26 mg/kg,速效磷 22.1 mg/kg,速效钾 156.7 mg/kg, pH 8.6。

1.2 试验设计

试验布置在未进行灌溉的旱作农耕地上。设 CK、N₁、P₁、N₁P₁、N₁P₂、N₂P₁ 六个肥料处理。CK 不施肥,N₁ 代表施氮量为 90 kg/hm²,N₂ 代表施氮量为 180 kg/hm²,P₁ 表示施磷量为 90 kg/hm²,P₂ 代表施磷量为 180 kg/hm²。小区面积 5 m × 5 m,3 次重复。肥料在播种前一次施入,田间管理同大田。小麦品种为长武 134,在 2007 年 9 月 23 日播种,播种量为 150 kg/hm²,每个小区播种 20 行。

1.3 观测指标及测定方法

试验采用打土钻取土烘干法测定小麦播种前和收获后 0 - 300 cm 的土壤含水量。降雨量由试验站的气象站自动记录。采用美国 Li - 6400 光合测定系统在小麦的返青期(2008 年 3 月 23 日)、拔节期(2008 年 4 月 20 日)、扬花期(2008 年 5 月 17 日)、灌浆期(2008 年 6 月 4 日)的上午 9:00 随机选择 3 株小麦测定旗叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)。小麦收获时测产。

1.4 数据处理及分析

小麦全生育期耗水量 $E_T = P + W - R + G$, P 为整个生育期的降雨量, W 为小麦收获后与播种前 0 - 300 cm 的土壤含水量之差, R 和 G 分别表示径流流失量和向地下渗漏量。本试验所在地为平坦

的塬面,同时该地区地下水埋藏很深,因此径流和地下渗漏量忽略不计,即 $E_T = P + W$ 。WUE 用 3 个层次的指标表示,以小麦籽粒产量(Y)与全生育期耗水量(E_T)之比表示产量水平的 WUE,即 $WUE = Y/E_T$;以全生育期小麦的生物量(D_w)与全生育期的耗水量(E_T)之比表示生物量 WUE,即 $WUE = DW/E_T$;以光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)之比表示叶片水平的 WUE,即 $WUE = P_n/T_r$;取全生育期的叶片 WUE 和 LAI 的平均值,来代表全生育期的叶片 WUE 和 LAI。

采用 SPSS 16.0 和 Excel 2003 对数据进行整理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥条件下的叶片水分利用效率

单叶水平的 WUE 是指叶片净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)的比值。因此凡是影响光合或蒸腾的作物和环境因子对其均有影响,施肥是重要的影响因子之一。单叶 WUE 与植物生理功能有最直接的关系,可反映植物代谢功能及作物生长与水分利用之间的数量关系^[9]。

不同施肥条件下,整个生育期,叶片的光合速率呈现倒“L”型,蒸腾速率呈明显的倒“U”型,而叶片 WUE 则近似为“L”型。增施氮肥和增施磷肥对小麦光合、蒸腾和水分利用效率的影响有差异。

2.1.1 不同氮肥用量对小麦光合、蒸腾和叶片水分利用效率的影响 不同氮肥处理返青期光合速率都高于 CK,除 P₁ 处理和 N₁P₁ 处理从返青到拔节期光合呈上升趋势外,整个生育期各处理的光合速率都呈下降趋势。在拔节期和扬花期,N₁P₁ 光合速率最高,而灌浆期随着施氮的增加,光合速率降低。

施肥处理提高了小麦的蒸腾效率,返青期各施氮处理间蒸腾效率差异很小,且在前两个时期都明显高于 CK。拔节期和扬花期,蒸腾速率各施氮处理依次为:N₁P₁ > N₂P₁ > P₁ > CK,灌浆期,蒸腾速率各施氮处理依次为:P₁ > N₁P₁ > CK > N₂P₁。这说明施氮在小麦生长前期,会提高小麦的蒸腾效率,而在小麦生长后期,表现不太明显。这可能是由于,前期施氮促进了小麦的茎叶生长,显著提高了小麦叶片的功能,而后期由于小麦叶片的衰老,施氮对小麦蒸腾效率影响较小。

在返青期和拔节期,随着施氮量的增加,叶片 WUE 呈下降趋势,且各处理都低于 CK;而扬花期和灌浆期则正好相反,施氮越多,叶片 WUE 越高,各施氮处理都高于 CK。

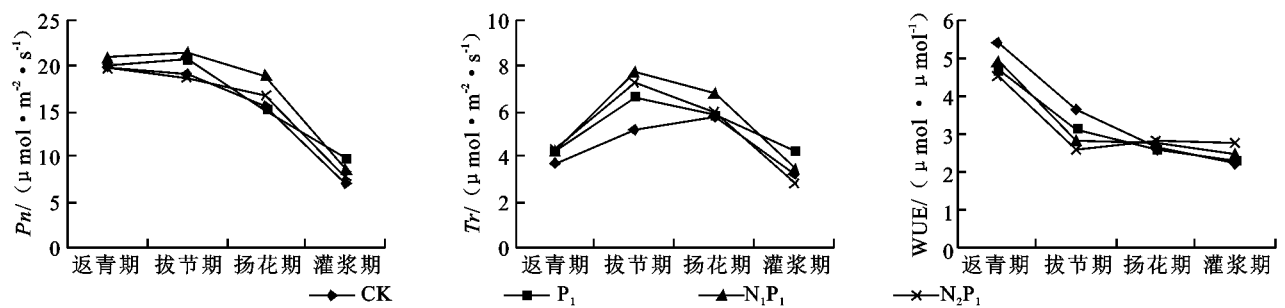


图 1 不同氮肥处理下,不同生育期小麦光合、蒸腾和单叶 WUE 的变化

2.1.2 不同磷肥用量对小麦光合、蒸腾和叶片水分利用效率的影响 不同施磷处理返青期光合速率接近,除 N_1P_1 处理和 N_1P_2 处理在拔节期光合速率略有上升外,在整个生育期,各个处理的光合速率都呈下降趋势。拔节期和扬花期,随着施磷量的增加,光合速率呈增加趋势,灌浆期则相反,但总体上都比 CK 要高。

整个生育期,施肥处理小麦从返青到拔节,蒸腾速率呈上升趋势,之后下降,CK 从返青期到扬花期都

呈上升趋势,之后下降。拔节和扬花时期,不同施磷条件下,蒸腾速率差别比较大, N_1P_1 处理最高, N_1 处理最低。不同施磷处理蒸腾速率总体高于 CK。不同生育期,施磷处理对 WUE 的影响表现的不太一致,但对 WUE 的提高有一定的作用。返青期和拔节期,CK 处理 WUE 最高,而后两个时期,不同施磷处理 WUE 都高于 CK。而在 N_1 水平下,磷的增加并没有对 WUE 提高起到显著作用,在扬花期和灌浆期 N_1P_1 和 N_1P_2 处理的 WUE 都低于 N_1 处理。

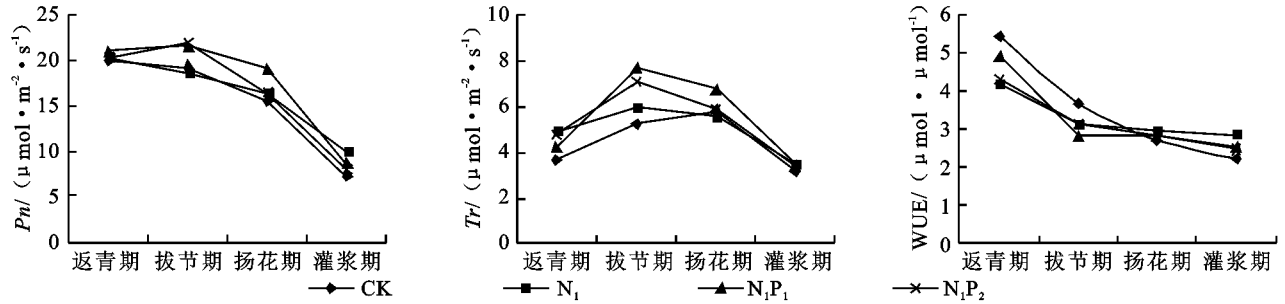


图 2 不同磷肥处理不同生育期小麦光合、蒸腾和 WUE 的变化

2.2 不同施肥处理对小麦叶面积指数的影响

叶面积指数(LAI)是用来衡量作物群体结构发育的重要指标,较高的叶面积指数有利于作物生物量和产量的形成,同时也会提高作物的蒸腾耗水。另外当叶面积指数增大时,由于对地表的覆盖度较高,会减少土壤水分的蒸发,从而提高了蒸腾对蒸发的比率^[10-11]。不同施肥对叶面积指数的影响有所差异,但从整个生育期看,都呈现倒“U”型。随着氮肥的增施,叶面积指数在各个生育期都增加明显(图 3a)。对于不同施磷水平,表现不太一致,除 N_1P_2 处理小麦叶面积指数在拔节期明显升高外,其它各个生育期,磷肥的增施对叶面积指数没有明显的影响(图 3b)。

2.3 不同施肥水平下小麦的生物量、产量水分利用效率的变化

对于黄土高原旱地小麦,施肥是提高其生物量和产量的主要手段。在适当的范围内,随着施肥量的增加,小麦的生物量和产量都会增加,从而影响水分利用效率。

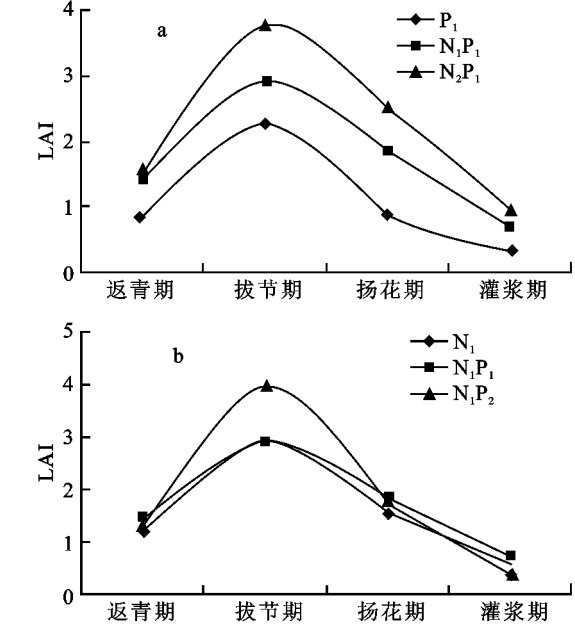


图 3 不同施肥处理下小麦叶面积指数的生育期变化

2.3.1 不同施氮水平下小麦的生物量、产量水分利用效率 随着施氮量的增加,小麦生物量和产量增加明显。在 P_1 水平下,增施氮肥 90 kg/hm^2 、 180

kg/hm²,小麦生物量、产量分别比 P₁ 水平下增加 69.2%,67.8%和 74.0%,98.5%。增施氮肥也增加了小麦的耗水量,同时提高了小麦的生物量 WUE 和产量 WUE。小麦的耗水量虽然相应增加了 23.8%和 21.3%,但 N₁P₁、N₂P₁ 处理的生物量 WUE 和产量 WUE 分别比 P₁ 处理高 36.7%,43.5%和 35.6%,63.6%,说明增施氮肥对提高小麦水分利用有显著的作用,这与李裕元等^[12]、胡亚妮等^[13]的研究一致。

表 1 不同施氮水平下的小麦水分利用效率及相关指标

施 N 水平	生物量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	生物量 WUE/ (kg·m ⁻³)	产量 WUE/ (kg·m ⁻³)
CK	4201.20	1466.50	2864.00	1.47	0.51
P ₁	4280.13	1868.80	2989.79	1.43	0.63
N ₁ P ₁	7240.36	3136.80	3700.21	1.96	0.85
N ₂ P ₁	7447.87	3709.73	3626.46	2.05	1.02

表 2 不同施磷水平下的小麦水分利用效率及相关指标

施 N 水平	生物量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	生物量 WUE/ (kg·m ⁻³)	产量 WUE/ (kg·m ⁻³)
CK	4201.20	1466.50	2864.00	1.47	0.51
N ₁	6268.93	2930.00	3424.93	1.83	0.86
N ₁ P ₁	7240.36	3136.80	3700.21	1.96	0.85
N ₁ P ₂	7551.11	3189.07	3841.37	1.97	0.83

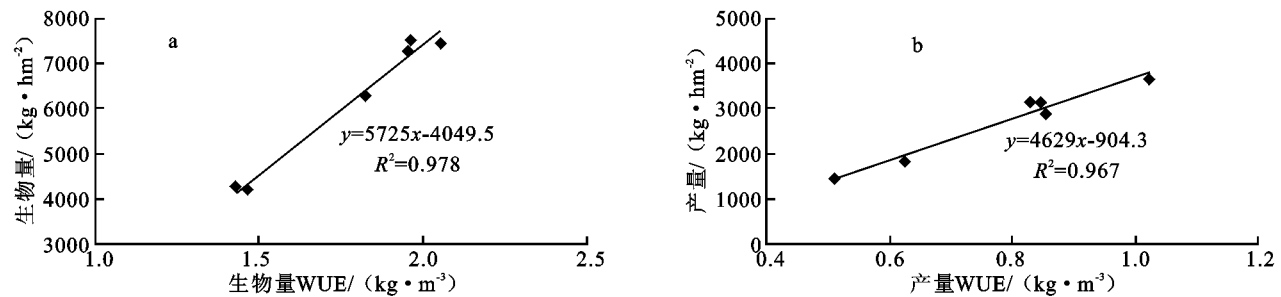


图 4 生物量、产量与相应水分利用效率的回归方程

2.3.3 生物量、产量和耗水量与水分利用效率的关系 小麦的生物量、产量和小麦的水分利用效率紧密相关。生物量和生物量 WUE、产量和产量 WUE 之间都达到了极显著的正相关关系(如图 4a,b)。这说明对于同一小麦品种,通过提高小麦的生物量和籽粒产量是提高小麦生物量 WUE 和产量 WUE 的有效途径。用 SPSS 16.0 对耗水量和水分利用效率做偏相关分析,耗水量与生物量 WUE($R = -0.784, P = 0.068$)和产量 WUE($R = 0.694, P = 0.147$)的相关性都不显著,但一个为正相关,一个为负相关。表明了降低耗水量对提高生物量 WUE 有相当作用,但对提高产量 WUE 的影响不大。但这并不是说耗水量的多少对作物本身没有影响。从表 3 可以看出,小麦的生物量和产量与耗水量都达到

2.3.2 不同施磷水平下小麦的生物量、产量水分利用效率 增施磷肥,增加了小麦的生物量、产量和耗水量,但不太明显。在 N₁ 水平下增施磷肥,小麦的生物量分别增加了 15.5%,20.5%,而产量则仅增加 7.0%和 8.1%。生物量 WUE 和产量 WUE 随磷肥的增加表现正好相反,生物量 WUE 呈上升趋势:N₁P₁、N₁P₂ 处理分别比 N₁ 处理提高 6.9%和 7.4%,而产量 WUE 则表现出下降趋势:N₁P₁、N₁P₂ 处理分别比 N₁ 处理降低了 1.1%和 3.4%。

了极显著的正相关关系,当极度缺水时,会引起生物量和产量的明显降低,从而降低生物量和产量 WUE,因此必须有一定的水分保证,才能获得高的生物量和产量,从而提高小麦的水分利用效率,可见三者是紧密相关的。

小麦的 LAI 与小麦的生物量、产量都达到了极显著的正相关关系,和耗水量呈显著的正相关关系。说明通过提高叶面积指数,提高了群体的光合效率,增加了干物质累积,从而提高了小麦的生物量和产量,另一方面也提高了群体的蒸腾效率,增加了耗水量。

2.4 不同层次的水分利用率之间的关系

叶片 WUE 反映了作物生产与耗水之间的动态联系^[14],生物量 WUE 作为群体水平 WUE 的最终结果,反映的是作物群体光合产物与作物总蒸散量

的关系,产量 WUE 最接近实际生产,也是研究最多的一个层次^[15-16],它是叶片水平和群体水平 WUE 的最终结果。三者之间存在着密切的关系。由表 4 可知,生物量 WUE、产量 WUE 和 LAI 之间都达到极显著正相关,这说明了施肥对生物量、产量以及对应的水分利用效率的提高在一定程度上是通过对小麦植株叶面积的增大和分蘖的增多,从而达到提高小麦叶面积指数的目的而实现的。叶片 WUE 和产量 WUE 呈显著相关,而和生物量 WUE 相关性不显著,这可能由于叶片 WUE 仅仅反映的是单个植株叶片的水分利用状况,而生物量 WUE 为整个群体的水分利用状况,由于地表蒸发等其他因素对其影响,使其相关性不显著。

表 3 产量、耗水量与叶面积指数的相关关系

指标	生物量	籽粒产量	耗水量	LAI
生物量	1	-	-	-
籽粒产量	0.961 **	1	-	-
耗水量	0.985 **	0.923 **	1	-
LAI	0.942 **	0.970 **	0.887 *	1

注: * 表示显著性为 0.01, * 表示显著性为 0.05。

表 4 不同层次水分利用效率及与叶面积指数的相关关系

指标	生物量 WUE	产量 WUE	叶片 WUE	LAI
生物量 WUE	1	-	-	-
产量 WUE	0.931 **	1	-	-
叶片 WUE	0.722	0.866 *	1	-
LAI	0.960 **	0.946 **	0.705	1

注: * 表示显著性为 0.01, * 表示显著性为 0.05。

3 结 论

不同施氮处理小麦生育期前期,施氮量越高,叶片 WUE 越低,且各处理都低于 CK;而后期则正好相反,施氮越多,叶片 WUE 越高,各施氮处理都高于 CK。增施磷肥对小麦叶片 WUE 的提高没有显著作用。

增施氮肥显著提高了小麦的生物量、产量和相应的水分利用效率以及 LAI,增施磷肥对小麦的生物量、产量的提高有一定作用,但对相应的水分利用效率和 LAI 的影响不明显。

生物量、产量、LAI 和相应的生物量 WUE、产量 WUE 都呈极显著正相关,这说明通过施肥提高了小麦的叶面积指数,相应地提高了小麦的群体光合效率,从而实现了生物量、产量以及相应的水分利用效率的提高。由于生物量 WUE 是多因素综合作用的结果,而叶片 WUE 仅仅反映单个叶片的水分

利用状况,两者之间的相关关系受其他因素的影响而不显著。

参考文献:

[1] 山仑.作物抗旱生理生态与旱地农业:旱地农业生理生态基础[M].北京:科学出版社,1998:1-17.

[2] Stanhill G. Water use efficiency[J]. Advances in Agronomy,1986,39:53-85.

[3] Bierhuizen J F, Slatyer R Q. Effect of atmospheric concentration of water vapor and CO₂ in determining transpiration photosynthesis relationships of cotton leaves [J]. Agric. Meteorol,1965,2:229-270.

[4] Frank A B, Barker R E, Berdahl J D. Water use efficiency of grasses grown under controlled and field conditions [J]. Agronomy Journal,1987,79:541-544.

[5] Kumar K, Singh D P. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield of *Brassica juncea* [J]. Field Crops Research, 1994,37:95-101.

[6] 姜成后,王天铎.绿色工厂:主要作物高产高效抗逆的生理基础研究[M].长沙:湖南科学技术出版社,1995.

[7] 许大全,徐宝基,沈允钢. C₃ 植物光合效率的日变化 [J]. 植物生理学报,1990,16(1):1-5.

[8] 李俊,于沪宁,刘苏峡.冬小麦水分利用率及其环境影响因素分析[J].地理学报,1997,52(6):552-560.

[9] 上官周平,周维.栽培条件对冬小麦叶片水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,1998,4(3):231-236.

[10] 李生秀,李世清,高亚军,等.施用氮肥对提高旱地作物土壤水分利用的作用机理和效果[J].干旱地区农业研究,1994,12(1):38-46.

[11] 周苏玫,马元喜,王晨阳,等.干旱胁迫对冬小麦根系生长及营养代谢的影响[J].华北农学报,2000,15(2):57-62.

[12] 李裕元,郭永杰,邵明安.施肥对丘陵旱地冬小麦生长发育和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2000,18(1):15-21.

[13] 胡亚妮,刘文兆,王俊,等.黄土塬区氮磷配施对冬小麦光合作用、产量形成及水分利用的影响[J].水土保持学报 2007,21(6):159-178.

[14] 刘文兆.作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系[J].自然资源学报,1998,13(1):23-27.

[15] Angus J F, Van Herwaarden A F. Increasing water use and water use efficiency in dry-land wheat [J]. Agronomy Journal, 2001,93(2):290-298.

[16] Frank A B, Barker R E, Berdahl J D. Water use efficiency of grasses grown under controlled and field conditions[J]. Agronomy Journal, 1987,79(3):541-544.