

# 黄土塬区施加磷肥对小麦光合性能、水分利用效率及茎流速率的影响

张蓓蓓<sup>1,3</sup>, 刘文兆<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡文理学院, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:** 通过陕西长武黄土塬区的田间试验, 对3个磷肥施用水平(0、90、180 kg/hm<sup>2</sup>, 即 F0、F1 和 F2)下小麦的光合性能、瞬时水分利用效率及开花期植株茎流速率的变化进行了研究, 分析了不同施磷水平下小麦产量的差异, 对叶片蒸腾速率和植株茎流速率做了回归分析。结果显示: 不同磷肥处理下叶片净光合速率日变化均为双峰曲线, 上午9时各处理差异比较为 F2>F1>F0, 说明施加磷肥可以增大小麦的光合; 拔节期叶片蒸腾速率日变化总体趋势与叶片净光合速率相似为双峰曲线, 开花期呈单峰曲线, 两时期上午9时各处理差异比较为 F2>F1>F0, 说明施加磷肥促进了小麦的蒸腾; 小麦的瞬时水分利用效率开花期大于拔节期, 两个时期 F1 的瞬时水分利用效率都是最高, 分别为 3.04 μmol CO<sub>2</sub>/mmol H<sub>2</sub>O 和 3.77 μmol CO<sub>2</sub>/mmol H<sub>2</sub>O, 表明适当的磷肥施加可以提高小麦的水分利用效率; 茎流速率日变化呈现单峰曲线模式, F0、F1 和 F2 单株茎流速率最高时分别为 2.796、3.734 g/h 和 3.873 g/h, 随着施肥量的增加茎流量增大; 成熟期产量随着施磷量的增大而升高, 各处理间差异显著。辐射、大气温度、湿度和风速是影响茎流的主要环境因子; F1 和 F2 处理下叶片蒸腾速率与茎流速率日变化达到显著的相关关系( $r_{F1}=0.73^*$  和  $r_{F2}=0.73^*$ ), 回归分析得出在 F2 处理下茎流速率和叶片蒸腾速率的回归方程显著性最好, 决定系数达到 0.95。

**关键词:** 小麦; 施磷量; 光合性能; 水分利用效率; 茎流; 产量

**中图分类号:** S512.1; S143.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)04-0088-06

黄土高原大部分地区属半干旱半湿润气候类型区, 以旱作农业为主。区域年降水量少且季节分配不均, 水分亏缺和养分不足是当地农业生产发展的主要限制因素<sup>[1,2]</sup>; 这就使得如何利用有限的水资源及合理施肥成为该地区农业研究的一个主要方面, 其中合理施肥、以肥调水, 提高水分利用效率(WUE)是充分利用有限水资源的重要举措之一。对于施肥来说, 磷素可以提高作物的蒸腾速率, 有研究显示随着水分胁迫的加重, 施磷肥的效果会越好<sup>[3]</sup>。还有报道显示磷素有利于提高底墒的利用率和增加对土壤深层水的利用能力, 施磷对提高小麦的 WUE 和产量非常有益<sup>[4]</sup>。另有一些研究表明随着施磷量的增多, 叶片净光合速率(Pn)和叶绿素含量增大; 且在水分胁迫下, 施磷肥可明显提高小麦的 WUE<sup>[5,6]</sup>。

本试验在设计不同磷肥施加水平对黄土塬区小麦生理指标(光合和蒸腾速率)及产量影响的同时, 使用了一种可以实时测定作物整株蒸腾速率并反映其变化规律的仪器——茎流计, 来实测田间小麦的

茎流速率<sup>[7]</sup>, 同时对叶片蒸腾速率(Tr)和植株的茎流速率进行了回归分析, 为由叶片蒸腾速率推求整株的蒸腾速率提供了一定的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验品种及设计

试验品种为“长武 134 号”, 本试验设计了 3 个施磷肥处理: F0、F1、F2, 以 F0 作为对照, 随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 25 m<sup>2</sup>, 小区间隔 30 cm。试验小区施氮肥为尿素 N 90 kg/hm<sup>2</sup>, 磷肥为过磷酸钙 0 kg/hm<sup>2</sup> (F0)、90 kg/hm<sup>2</sup> (F1)、180 kg/hm<sup>2</sup> (F2), 所有肥料于作物播种前撒施于地表, 翻入土中。

### 1.2 试验地概况

试验于 2007 年 9 月~2008 年 6 月在黄土高原中部的陕西省长武县洪家乡王东村中国科学院长武生态实验站进行, 地理位置 107°40'30"E, 35°14'30"N, 海拔 1 200 m, 本区属暖温带半湿润偏旱气候, 年均降水 584 mm, 年均气温 9.1℃, ≥10℃的积温 3 029℃, 无霜期 171 d。试验布置在未进行灌溉的旱作农

收稿日期: 2011-02-01

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(NO 10502-Z10)

作者简介: 张蓓蓓(1983—), 女, 河南沈丘人, 博士, 研究方向为植物生理生态。E-mail: zbb83101@126.com。

通讯作者: 刘文兆(1960—), 男, 陕西省乾县人, 博士生导师, 研究员。E-mail: wzliu@ms.iswe.ac.cn。

耕地上,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。试验地平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄粘黑垆土。

### 1.3 管理与测定

**茎流:**开花期5月10日用美国Dynamax公司生产的Flow32包裹式茎流计测定各磷肥处理下单株小麦茎流日变化,每小时记录一次数据,单位时间内整株个体的茎流速率单位为g/h;由茎流速率计算出日茎流量(Sap flow),其单位为g。

**气象数据:**自动气象站采集。包括空气温度( $T, ^\circ\text{C}$ )、相对湿度( $RH, \%$ )、风速( $W, \text{m/s}$ )、总辐射( $E_g, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、反射辐射( $E_r, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、净全辐射( $E^*, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、紫外光辐射( $UV, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、光合有效辐射( $PAR, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。

**气体交换指标:**在拔节期4月20日和开花期5月10日早晨7:00~下午19:00每两个小时用LI-6400便携式光合仪随机选取具有代表性的与茎流测定不同株的小麦3株,测定拔节期倒二叶和开花期旗叶叶片净光合速率( $P_n, \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、叶片蒸腾速率( $Tr, \text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。瞬时水分利用效率( $WUE_i, \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ )= $P_n/Tr$ 。

**叶绿素含量:**SPAD-520叶绿素仪进行测定。

**产量:**小麦适期收获,选取小区有代表性的地段量出 $2 \text{ m}^2$ ( $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ )实地测产。

### 1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Office Excel 2003和SPSS16.0进行统计处理,运用One-Way ANOVA进行单因素方差分析、 $T$ 检验进行两组数据的差异分析、Pearson进行相关分析、Curve Estimation进行回归分析;并用LSD检验进行多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 拔节期和开花期生理指标及水分利用效率的变化

**2.1.1 拔节期和开花期叶绿素含量的变化** 把两个时期的叶绿素SPAD值列于表1,由表看出,两个时期的叶绿素SPAD值达到显著的差异。拔节期时,各处理下SPAD值差异不明显,随着时间的推移,到开花期时有所变化,开花期各处理之间的叶绿素SPAD值有了显著的差异,为 $F_2 > F_1 > F_0$ 。

**2.1.2 拔节期和开花期叶片净光合速率日变化** 对不同磷肥施加下小麦叶片净光合速率每两小时测定一次,得出图1。不同处理下小麦拔节期和开花期的 $P_n$ 日变化均呈现典型的双峰曲线模式,表明

该小麦品种在两个生育期都有“午休”现象。由图还可以看出,两个时期上午的 $P_n$ 均大于下午的 $P_n$ ,且上午9时左右 $P_n$ 最大,但不同时期出现午休的时间有所不同,拔节期出现在下午3时左右,拔节期上午9时叶片 $P_n$ 差异显著( $F=321.49^{**}$ );开花期午休出现在下午1点左右,上午9时叶片 $P_n$ 差异也达到了极显著差异( $F=363.51^{**}$ )。两个时期上午9时的 $P_n$ 没有太大差异。拔节期上午9时各处理 $P_n$ 之间的比较结果为 $F_2 > F_1 > F_0$ ;开花期与拔节期的结果相同。

表1 拔节期和开花期不同处理叶片叶绿素差异

Table 1 The differences of SPAD among 3 treatments at jointing and flowering stages

处理 Treatments	SPAD值 SPAD value	
	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage
F0	47.59a	48.36b
F1	48.64a	48.83ab
F2	48.90a	51.66a
F值 F value	1.67ns	4.36*
t值 t value	-2.06*	

注:每列平均值后的不同字母由LSD检验其差异性,\* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ ; ns,不显著。

Note: Means within each column with different letters are significantly different according to the LSD test; \* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ ; ns, not significant.

**2.1.3 拔节期和开花期叶片蒸腾速率日变化** 不同处理下叶片 $Tr$ 日变化分析结果如图2。拔节期间叶片 $Tr$ 日变化与 $P_n$ 的日变化趋势类似,都是呈现双峰曲线趋势。从早晨7时开始急剧升高,到上午11时达到最大( $F_1$ 除外),然后开始有所下降,下午1点下降到最低( $F_1$ 除外),然后又有所升高,到晚上下降到最低,各处理上午11时的叶片 $Tr$ 差异显著( $F=20984.10^{**}$ );开花期与拔节期有所不同,呈现单峰曲线模式,“午休”现象不明显,表现为叶片 $Tr$ 上午9时达到最大,然后开始下降,但下降比较缓慢,直到晚上7点还有较高的蒸腾速率,上午9时的叶片 $Tr$ 也都达到显著差异( $F=22.75^{**}$ )。比较两时期各处理叶片 $Tr$ 在拔节期上午9时的差异,得出 $F_2 > F_1 > F_0$ 。

**2.1.4 拔节期和开花期叶片瞬时水分利用效率变化** 拔节期和开花期小麦叶片的瞬时水分利用效率( $WUE_i$ )列于表2。由表看出,两个时期的 $WUE_i$ 差异显著,开花期时 $WUE_i$ 有所升高。拔节期 $F_1$ 的 $WUE_i$ 最高, $F_0$ 最低,施加磷肥与不施加磷肥的处理差异显著;开花期 $F_1$ 的 $WUE_i$ 最高, $F_0$ 最低, $F_2$ 居

中, F1 与其它两个处理差异显著。

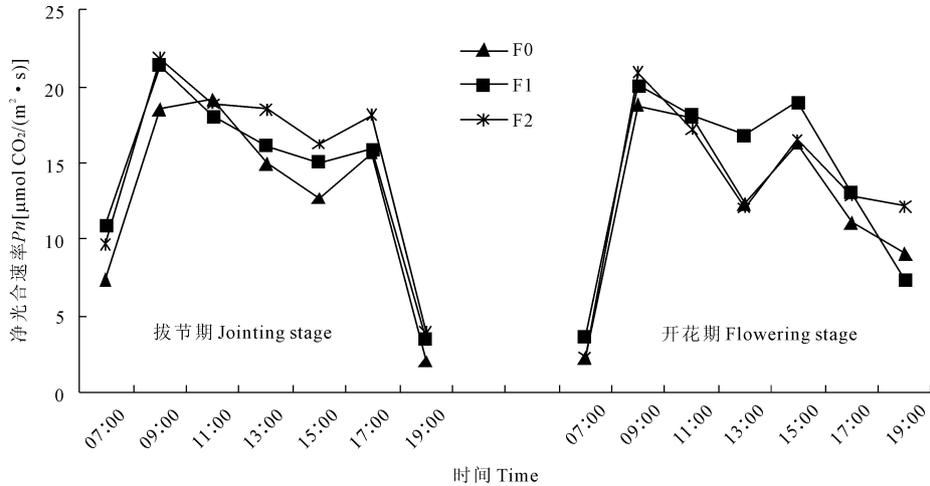


图 1 拔节期和开花期不同处理叶片净光合速率日变化  
Fig.1 The daily variation of  $P_n$  at jointing and flowering stages

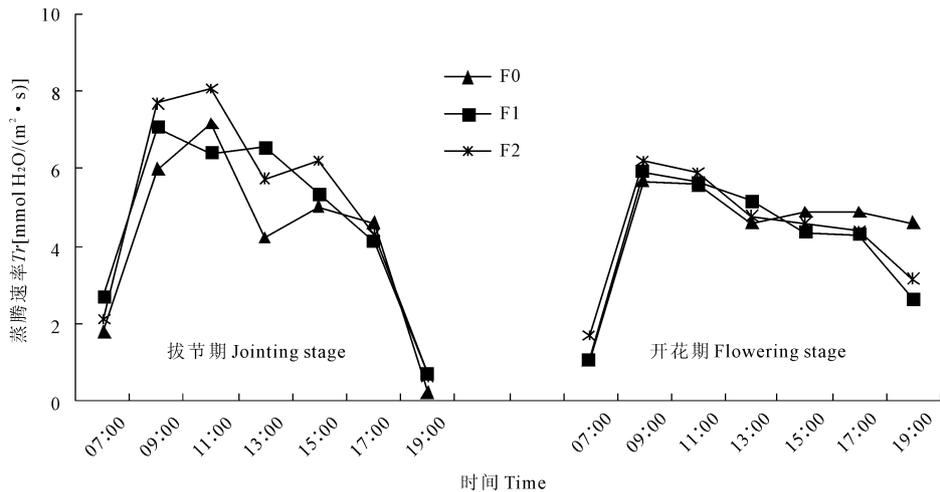


图 2 拔节期和开花期不同处理叶片蒸腾日变化  
Fig.2 The daily variation of  $T_r$  at jointing and flowering stages

表 2 拔节期和开花期不同处理下小麦瞬时水分利用效率差异

Table 2 The differences of instantaneous water use efficiency for 3 treatments at jointing and flowering stages

处理 Treatments	瞬时水分利用效率 $WUE_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )	
	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage
F0	2.33b	3.31b
F1	3.04a	3.77a
F2	2.85a	3.37b
F 值 F value	40.53 **	18.76 **
t 值 t value	-5.52 **	

注:每列平均值后的不同字母由 LSD 检验其差异性; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

Note: Means within each column with different letters are significantly different according to the LSD test; \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 。

## 2.2 开花期植株茎流变化

2.2.1 开花期植株茎流日变化 试验期间,天气晴好,测得单株茎流速率结果见图 3,由图看出小麦茎流日变化为单峰值,且有明显的昼夜节律性变化。另外不同磷肥处理下茎流日变化也有很大的差异,长武 134 号在 F0、F1 和 F2 处理下茎流速率最大值分别为 2.796、3.734 g/h 和 3.873 g/h。且 F1 和 F2 处理下茎流速率较高, F0 为最小,茎流速率最大值出现的时间一般都为下午 3 点左右(F0 最大值出现在下午 4 点左右)。同时测定了整株植物的日茎流量,得出 F0、F1 和 F2 处理下的值分别为 23.25、30.96 g 和 32.66 g, F1 和 F2 都与 F0 达到显著差异。有文献表明施磷肥可以改善植物的内环境<sup>[3]</sup>,增施磷肥可使蒸腾增加,这就使得 F2 和 F1 的茎流速率比 F0 大。总体来说,增施磷肥后茎流大于未施肥的

处理。

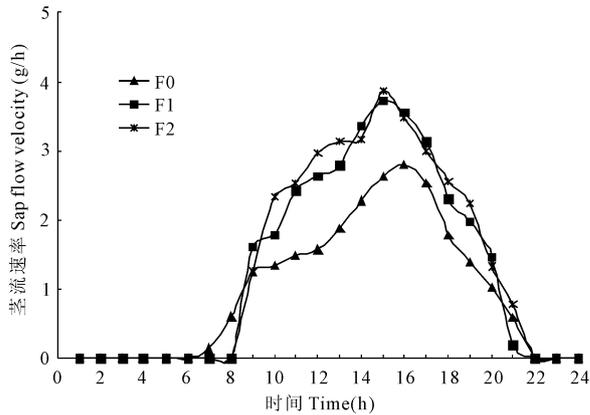


图 3 不同处理下小麦茎流速率的日变化

Fig.3 The daily variation of sap flow velocity under 3 treatments

表 3 不同肥料处理下小麦茎流与环境因子的相关分析

Table 3 The correlation analysis among sap flow velocity and environmental factors under 3 treatments

处理 Treatments	总辐射 $E_g$	反射辐射 $E_r$	紫外光 辐射 $UV$	净全辐射 $E^*$	光合有 效辐射 $PAR$	空气温度 $T$	相对湿度 $RH$	风速 $W$
F0	0.931 **	0.897 **	0.942 **	0.947 **	0.937 **	0.738 **	-0.741 **	0.492 *
F1	0.940 **	0.936 **	0.945 **	0.926 **	0.948 **	0.876 **	-0.858 **	0.635 **
F2	0.975 **	0.981 **	0.968 **	0.959 **	0.975 **	0.897 **	-0.869 **	0.615 **

注: \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; ns, 不显著。

Note: \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; ns, not significant.

### 2.3 成熟期产量

成熟期脱粒得出不同处理下小麦的产量,其中 F0 处理下产量为 2 806 kg/hm<sup>2</sup>, F1 为 3 045 kg/hm<sup>2</sup>, F2 为 3 404 kg/hm<sup>2</sup>。3 个处理之间差异显著 ( $F = 6.72^* < 0.05$ )。说明产量随着施磷量的增大而增加。

### 2.4 植株茎流速率与叶片蒸腾速率及瞬时水分利用效率的关系

2.4.1 小麦茎流和蒸腾速率及瞬时水分利用效率相关分析 各施磷水平下小麦的茎流速率与蒸腾速率相关分析结果表明,蒸腾速率比茎流速率提前达到峰值,植株茎流速率有一定的滞后性,且 F1 和 F2 处理下的茎流速率与叶片蒸腾速率之间有显著的相关关系 (F0、F1 及 F2 的相关系数分别为 0.52、0.73<sup>\*</sup> 和 0.73<sup>\*</sup>);各处理下日茎流量与  $WUE_i$  相关分析结果显示,不同施磷水平之间均未达到显著相关(数据未列出)。

2.4.2 植株茎流与叶片蒸腾速率回归分析 对各施磷水平下单株小麦的茎流速率(g/h)与叶片蒸腾速率(mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s))进行回归分析,得出叶片蒸腾速率(x)及植株茎流速率(y)动态变化模拟理论方程为:

2.2.2 环境因子对茎流速率变化的影响 研究表明,太阳辐射、空气温湿度、风速、土壤湿度是影响植物茎流的主要环境因子<sup>[8]</sup>。太阳辐射是植物光合作用和蒸腾作用的启动因子,它同时直接或间接地对其他环境因子产生影响。对不同施磷量下的茎流速率日变化和各环境因子的日变化进行相关分析得出结果如表 3,由表可以看出各处理的茎流速率与环境因子相关性都达到显著或极显著的差异,其中茎流与相对湿度呈负相关关系,与其他的环境因子呈正相关关系。与总辐射  $E_g$  的相关系数我们看出,  $F2 > F1 > F0$ ,另外反射辐射  $E_r$ 、紫外光辐射  $UV$ 、可见光辐射  $PAR$  和空气温度与茎流速率的相关分析跟总辐射的趋势是一致的,说明施加 P 肥后更易受环境因素的影响。

$$F0 \quad y = -1.3166x + 0.7937 \quad R^2 = 0.57^*$$

$$F1 \quad y = -0.1270x^3 + 1.1009x^2 - 1.8918x + 0.9465 \quad R^2 = 0.89^*$$

$$F2 \quad y = -0.0721x^3 + 0.6896x^2 - 1.0117x + 0.0476 \quad R^2 = 0.95^{**}$$

从上面方程可以看出 F1 和 F2 决定系数  $R^2$  都达到了 0.80 以上,且都表现为显著,预测精度较高。说明这些曲线方程能有效拟合不同施磷水平下叶片蒸腾速率对应单株小麦茎流速率的回归动态变化。

## 3 讨论与结论

肥料的种类、数量对叶片的气孔开度和正常功能会产生影响,从而影响叶片的光合性能。其中磷素可促进叶绿素的合成,磷素可以通过影响 ATP 酶的磷酸化过程而影响作物的光合和蒸腾作用。本试验得出叶片  $P_n$  日变化呈现双峰曲线的趋势,有“午休”现象出现;对上午 9 时各处理叶片  $P_n$  进行比较,结果显示  $F2 > F1 > F0$ ,说明增施磷肥可以增加作物的光合作用。小麦叶片  $Tr$  日变化总体趋势是在日出后随着太阳辐射的增强而急速升高、随光强的减弱而降低,小麦叶片  $Tr$  日变化曲线拔节期为双峰型,开花期为单峰曲线,对上午 9 时各施磷水平叶

片  $T_r$  进行比较,结果显示  $F_2 > F_1 > F_0$ 。由叶片  $P_n$  和  $T_r$  日变化可以得出,不同磷肥水平施加仅改变了小麦光合性能日变化的幅度,而未改变其变化规律。对于光合日变化中午“午休”现象,可能是由于光强的提高,叶片获得的能量增多,叶温升高加大了水汽的饱和差,促使蒸腾作用加强,当温度增大到一定程度,蒸腾作用相当强烈,此时气孔部分关闭来限制强烈的蒸腾作用,同时保护植物叶片不受伤害<sup>[9]</sup>。

在反映作物蒸腾昼夜变化方面,茎流计能较灵敏地反映出外界环境的变化对作物蒸腾速率的影响<sup>[10]</sup>。黄土塬区各施磷水平下小麦茎流日变化表现出单峰曲线模式,夜晚茎流较小几乎为零,随着太阳辐射增强,茎流波动剧烈<sup>[11]</sup>。不同磷肥处理下小麦日茎流量有很大的差异,其中  $F_2$  的茎流量最大, $F_0$  茎流量最小。分析其原因可能为施加高浓度的磷肥使小麦的气孔开度增加,使得蒸腾增加;该区小麦茎流变化主要受太阳辐射、风速、空气湿度和大气温度的影响。

不管是植株茎流还是叶片蒸腾都反应了作物的水分运动,在本质上有一定的联系。蒸腾速率与茎流速率相关分析表明,茎流速率在  $F_1$  和  $F_2$  处理下与蒸腾速率达到了显著的相关关系,但是在  $F_0$  处理下没有显著性,可能原因是因为茎流速率测定的是单株小麦在某一时间点的茎流速度,而蒸腾速率是在某时间点选取一些主要的叶片进行测定,蒸腾速率所选用的与茎流速率所选用的不是同一株小麦,一个是单株效应,一个是单叶结果,这就造成了一定的偏差;同时水分运动通常经土壤—根—茎—叶这一路径而进行,但是系统内各部分如土—根部,根—茎部等水分运动特征也是非常复杂的,在每个部分中通过该部分截面的入流量和出流量也是不相同的,水分运动过程中有可变水阻和水容的加入使得植物的水分运动更难以准确测定,这就决定了叶片的蒸腾速率不能代表整株植物的蒸腾;并且还有研究表明茎流计的探头不适合于应用在室外环境下<sup>[12]</sup>,导致茎流速率与蒸腾速率不能在各施磷水平下较好吻合。但是各施磷水平下茎流速率与叶片蒸腾速率回归分析表明茎流速率可以用叶片的蒸腾速率进行模拟,决定系数较高;Bethenod 等<sup>[13]</sup>对全天的茎流量与蒸腾量以及每小时的茎流速率和蒸腾速率做了相关分析,结果表明每小时的茎流速率与蒸腾速率的相关更能作为以后的实验方法进行应用。本试验在比较茎流速率和蒸腾速率的相关以及回归分析中可以看出,二者之间相关系数较高,且回归系数较大,这与 Bethenod 等的研究结果类似,可以在以后

的试验中加以参考应用。

$WUE_i$  与茎流量相关不显著,分析原因可能为外界环境可显著地影响叶片  $P_n$  和  $T_r$ ,而  $WUE_i$  是二者的比值,叶片  $P_n$  和  $T_r$  的变化就改变了该叶片的  $WUE_i$ ,并且  $WUE_i$  是出现在叶片水平上,而茎流出现在整株水平上,二者相差较多,造成最终结果不显著。

综合来说,不同施磷处理对小麦叶片净光合速率的影响来看,施磷越多, $P_n$  越高;施磷对叶片蒸腾速率的影响来说,与叶片  $P_n$  结果类似, $F_0$  的蒸腾速率最小, $F_2$  的最大;茎流速率的结果为  $F_2$  处理下最大, $F_0$  最小;适当地施加磷肥增加了植物的光合和蒸腾。磷肥对产量的影响来看, $F_2 > F_1 > F_0$ ;对于水分利用效率的影响来说,两时期各施磷水平相比都为  $F_1 > F_2 > F_0$ 。说明旱作条件下适当施加磷肥可使作物增产,提高作物的水分利用效率,其主要原因是增施磷肥可缓解干旱对作物产量的不利影响,促进根系发育,提高根系活力,减少叶片水分蒸腾,增加叶片渗透调节物质含量,进而增产;相反低磷可以降低根系活力,而不利于产量形成。

#### 参 考 文 献:

- [1] 李凤民,郭安红,雒梅,等.土壤深层供水对冬小麦干物质生产的影响[J].应用生态学报,1997,8(6):575—579.
- [2] 山仓,徐萌.节水农业及其生理生态基础[J].应用生态学报,1991,2(1):70—76.
- [3] 梁银丽,陈培元.土壤水分和氮磷营养对冬小麦根苗生长的效应[J].作物学报,1996,(4):476—482.
- [4] 张岁岐,山仓.磷素营养和水分胁迫对春小麦产量和水分利用效率的影响[J].西北农业学报,1997,6(1):22—25.
- [5] 张岁岐,山仓,薛青武.氮磷营养对小麦水分关系的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):147—151.
- [6] Li F M, Song Q H, Liu H S, et al. Effects of pre-sowing irrigation and phosphorus application on water use and yield of spring wheat under semi-arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2002, 49(3):173-183.
- [7] 尹光彩,周国逸,王旭,等.应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究[J].生态学报,2003,(10):1984—1990.
- [8] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠.应用热技术研究树干液流进展[J].应用生态学报,2004,15(6):1074—1078.
- [9] 赵海波,林琪,刘义国,等.氮磷肥施肥对超高产冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(10):2545—2550.
- [10] 蒋进.极端气候条件下胡杨的水分状况及其与环境的关系[J].干旱区研究,1991,2:35—38.
- [11] 何斌,李卫红,陈永金,等.干旱胁迫条件下胡杨茎流与茎直径变化分析——以塔里木河下游英苏断面为例[J].西北植物学报,2007,27(2):315—320.
- [12] Gerdes G, Allison B E, Pereira L S. Overestimation of soybean crop

transpiration by sap flow measurements under field conditions in Central Portugal[J]. *Irrigation Science*, 1994, 14:187—200.

[13] Bethenod O, Katerji N, Goujet R, et al. Determination and valida-

tion of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, 67:153—160.

## Responses of photosynthetic characters, water use efficiency and sap flow velocity to phosphorus adding of wheat on the Loess Plateau

ZHANG Bei-bei<sup>1,3</sup>, LIU Wen-zhao<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

**Abstract:** The objective of the research was to understand the gas exchange, instantaneous water use efficiency ( $WUE_i$ ) and sap flow differences under 3 phosphorus fertilizer treatments (F0, F1, and F2) at different growth stages on the Loess Plateau in Shaanxi Province; and the correlation and regression relationship between leaf transpiration rate ( $Tr$ ) and sap flow velocity were also investigated. Results showed that: under different treatments, the daily variation curve of leaf photosynthesis rate ( $P_n$ ) had two peaks and the value of  $P_n$  was  $F2 > F1 > F0$ ; it was said that the P adding could improve the leaf  $P_n$ . The daily variation of leaf  $Tr$  was similar to  $P_n$  at jointing stage; the daily variation curve of  $Tr$  at flowering stage had one peak and  $F2 > F1 > F0$ . The  $WUE_i$  of wheat at flowering stage was higher than that at jointing stage, and the highest value of the  $WUE_i$  at both stages was under F1 treatment, and it was 3.04 and 3.77  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$  respectively; it showed that adding P could increase the  $WUE_i$ . The daily variation of sap flow velocity for different treatments was similar to the result of the  $Tr$  at flowering stage, and the highest sap flow velocity in a day was 2.796, 3.734 g/h and 3.873 g/h under F0, F1 and F2 respectively; the sap flow was increased by the P adding. At same time, the yield was improved by the fertilizer adding and there was significant treatment differences. Radiation, temperature, humidity and wind speed were the main factors to sap flow. There was a significant positive correlation between sap flow velocity and leaf transpiration rate at F1 and F2 ( $r_{F1} = 0.73^*$  和  $r_{F2} = 0.73^*$ ). And there was also significant regression between them; the best regression was under F2 treatment, the value of coefficient of determination was 0.95.

**Keywords:** wheat; phosphorus; photosynthetic characteristics; water use efficiency; sap flow; yield