

# 磷营养和土壤含水量对大豆光合特性的交互影响

王旭明, 张 铮, 史刚荣

(淮北师范大学生命科学学院, 资源植物学安徽省重点实验室, 安徽 淮北 235000)

**摘 要:** 采用盆栽砂培, 对不同磷(0.05、0.5、1.0、2.0 mmol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )、水(田间持水量的20%、40%、60%和80%)条件下大豆的光合特性进行了研究。结果表明:(1)低磷和干旱胁迫导致大豆叶片含水量和地上部分生物量显著降低,水分饱和和亏缺和根冠比增大。磷营养和土壤含水量对叶片水分饱和和亏缺、根冠比、叶片含水量、比叶面积、地上部分生物量具有显著的交互效应。(2)低磷和干旱胁迫显著降低了大豆的叶绿素含量(Chl a、Chl b和Chl a+b),缺磷导致叶绿素 a/b 比值显著升高,且具有显著的磷×水交互效应。(3)缺磷和干旱胁迫显著降低了Fv/Fm和ΦPSII,并对Fv/Fm具有显著的交互效应。(4)低磷和干旱胁迫下,大豆叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)和蒸腾速率(E)显著减小,气孔限制值(Ls)增大,磷营养和土壤含水量对水分利用效率(WUE)和Ls的交互效应显著。

**关键词:** 大豆;磷营养;干旱;光合作用

**中图分类号:** S565.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)05-0143-06

光合作用是植物生长的基础,是植物生产力构成的最主要因素。植物的绝大多数干物质和经济产量来源于光合作用产生的碳水化合物。水分状况是影响光合作用最重要的因子之一<sup>[1]</sup>。干旱胁迫会导致叶片气孔关闭,严重时甚至损伤叶肉细胞、破坏叶绿体、使叶绿素和类胡萝卜素的含量下降、降低光合酶的活性、使植物的光合速率降低<sup>[2,3]</sup>。

磷素作为植物生长发育的必需元素之一,不仅是植物体内许多重要化合物组分,而且还以多种途径参与植物体内的各种代谢过程,在作物光合作用过程中起非常重要的作用<sup>[4]</sup>。低磷胁迫时,由于叶片中腺苷三磷酸(ATP)、氧化型辅酶Ⅱ(NADP<sup>+</sup>)、还原型辅酶Ⅱ(NADPH)、氧化型辅酶Ⅰ(NAD<sup>+</sup>)的大幅下降,从而导致光合作用和碳水化合物的运输受到严重阻碍,单叶的光合速率降低了1/3~2/3<sup>[5-7]</sup>。

我国大豆主产区多分布在干旱或半干旱地区,水和磷资源的缺乏是这些地区大豆生产的主要限制因子,并且这种形势日益严峻。我国目前约有1/3的耕地处于磷缺乏状态<sup>[8]</sup>,而干旱则是限制世界大豆产量的一个重要的非生物因素,因干旱造成的减产占大豆产量损失的40%<sup>[9]</sup>。目前,关于植物对缺磷和干旱胁迫适应性研究较多,但对二者的交互效应则鲜有报道,并且结论不一致。大多数研究结果表明,充足的磷营养能提高植株的耐旱能力<sup>[10-17]</sup>。

然而,也有相反的研究结论。如Kramer<sup>[18]</sup>认为磷缺乏的植物会产生一系列类似于适应水分胁迫的性状;Radin<sup>[19]</sup>和Rodriguez等<sup>[20]</sup>发现磷素缺乏会提高棉花和小麦的脱落酸含量和降低气孔导度。最近,王西瑶等<sup>[21]</sup>对马铃薯24个品种(系)的盆栽沙培试验中发现缺磷胁迫反而增强了植株的耐旱能力。因此,本文采用盆栽沙培试验,研究了水分和磷含量对大豆光合作用的影响,旨在阐明大豆对不同水、磷环境的生理响应机制,为有效开发利用土壤磷资源、减投增效提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与实验设计

供试大豆品种为徐豆10号,购自安徽睢溪县农技中心。试验于3月至5月在塑料大棚中进行(不补充光照)。用充分清洗的河沙作培养基质进行盆栽试验,盆钵为25 cm×40 cm的圆形塑料盆。每盆装砂量6.0 kg(干重)。试验采用2因素(含水量、磷含量)4水平随机组合设计,共16个处理,每个处理3次重复。土壤含水量设4个处理:分别为田间持水量(32.17%±1.26%)的20%(含水量6.43%,极度干旱)、40%(含水量12.87%,重度干旱)、60%(含水量19.30%,轻度干旱)和80%(含水量25.74%,正常);土壤磷含量设4个磷水平:缺磷(0.05 mmol/L)、低磷(0.5 mmol/L)、正常供磷(1 mmol/L)和高磷

收稿日期:2010-05-31

基金项目:安徽省高校教师自然科学基金项目(KJ2009B073)

作者简介:王旭明(1962—),男,副教授,主要从事植物生理生态学方面的研究。E-mail:xumingw02@163.com。

通讯作者:史刚荣, E-mail:swagr@126.com。

(2 mmol/L)。磷以  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  的形式与营养液一起加入,营养液配方为: $\text{NH}_4\text{NO}_3$  8 mmol/L; $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (4 个处理); $\text{KCl}$  1 mmol/L; $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  1 mmol/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.6 mmol/L; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.02 mmol/L; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  6  $\mu\text{mol/L}$ ; $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.016 mmol/L; $\text{ZnCl}_2$  0.3  $\mu\text{mol/L}$ ; $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.3  $\mu\text{mol/L}$ ; $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.3  $\mu\text{mol/L}$ ;用  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  或  $\text{H}_2\text{SO}_4$  把 pH 调整到 5.5~6.0。每盆播种大豆种子 10 粒,待出苗后第一片真叶完全展开时,每盆选留大小一致、分布均匀的幼苗 5 株。同时,开始控水控磷处理,培养期间,每隔 4 d 浇一次营养液(100 mL),以保证除磷以外的其它养分在各种处理中完全一致。砂基含水量采用称重补水法控制,每天下午 6 时 30 分称取盆重,补充当天失去的水分,使各处理保持设定的相对含水量。控水控磷培养 40 d 后,当对照组幼苗第 7 片复叶完全展开时,进行有关项目测定。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 植株生物量 轻轻从细沙基质挖出植株后,将根系和地上部分分开,根系用自来水冲洗干净,连同地上部分一起置于 105℃ 杀青 30 min,再在 70℃ 下烘至恒重,称重并计算根冠比。

1.2.2 水分饱和和亏缺和比叶面积 在同一叶位取各重复样株的 9 片叶称鲜重 ( $W_f$ ),浸入水中 12 h 后称饱和重 ( $W_t$ ),然后烘干称干重 ( $W_d$ )。水分饱和和亏缺(water saturation deficit, WSD)由公式  $WSD = (W_t - W_f) / (W_t - W_d) \times 100$  计算。叶面积用图像分析法测定,叶干重用烘干称重法测定。比叶面积(specific leaf area, SLA)由公式  $SLA = LA / LM$  求得 ( $LA$  为叶面积,  $LM$  为叶干重)。

1.2.3 叶绿素含量 光合色素测定参照张宪政<sup>[22]</sup>的方法:成熟叶(0.2 g)剪成碎片,置于 10 ml 离心管中,加入 5 ml 丙酮、酒精混合液( $v/v = 1:1$ ),在 4℃ 下避光放置至叶片完全退色。在 663、645 nm 下分别测定吸光值,按照 Lichtenthaler<sup>[23]</sup>的公式计算叶绿素(a 和 b)含量。

1.2.4 叶绿素荧光 在收获前,每盆选取 4 叶片,用 Mini PAM(Walz, Effeltrich, 德国)测定叶绿素荧光参数。植株叶片暗适应 30 min 后,测定暗适应后叶绿素的最小荧光 ( $F_0$ ) 和红光饱和脉冲后的最大荧光 ( $F_m$ ),据此计算  $F_v$ (最大荧光和最小荧光之差,即可变荧光)和  $F_v/F_m$ (可变荧光和最大荧光之比,是光系统 II 光化学反应量子产额的量度。在光强为 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  光化光下测定瞬时荧光  $F_s$ ,在光强为 5 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的饱和脉冲下测定最大荧光 ( $F_m'$ ),按下式计算光系统 II 有效量子产额 ( $\Phi_{PS}$

$$\text{II}): \Phi_{PS} \text{ II} = \Delta F / F_m' = (F_m' - F_s) / F_m'$$

1.2.5 气体交换 采用美国 LI-6400 便携式光合作用测定仪(Li-Cor, Lincoln, 美国)进行田间活体测定,仪器装有 LED 红蓝光源,光量子通量密度(PFD)为 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。选取植株主茎倒 2 叶,测定其净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $E$ )等指标,每个处理测定 6 株。水分利用率(WUE)由公式  $WUE = P_n/E$  计算得出;气孔限制值( $L_s$ )由公式  $L_s = 1 - C_i/C_a$  ( $C_a$  为大气中  $\text{CO}_2$  浓度)计算得出<sup>[3]</sup>。

## 1.3 统计分析

运用方差分析(ANOVA)揭示不同土壤磷含量和含水量处理对大豆叶片生理特征的影响。分析软件为 SPSS for Windows 13.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶片水分饱和和亏缺、含水量、比叶面积以及单株生物量的影响

土壤磷含量和含水量对大豆叶片水分饱和和亏缺(WSD)、叶片含水量、比叶面积、根系生物量、地上部生物量以及根冠比都具有一定的影响(表 1)。随着土壤含水量的增大,水分饱和和亏缺、根系生物量、根冠比显著减小,叶片含水量、比叶面积和地上部分生物量显著增大(表 1)。磷含量对叶片含水量、比叶面积和根系生物量的影响不显著,但对水分饱和和亏缺、地上部分生物量、根冠比具有显著影响。在缺磷条件下,大豆植株的地上部分生物量显著降低,水分饱和和亏缺和根冠比则显著增大(表 1)。

方差分析表明,除根系生物量以外,土壤磷含量和含水量对其它 5 项指标的交互效应均达到显著水平(表 1)。在干旱胁迫条件下(即含水量为 HWC 的 20% 和 40% 时),低磷导致叶片水分饱和和亏缺、根冠比显著增大,地上部分生物量显著降低,而叶片含水量和比叶面积则不受影响。

### 2.2 不同处理对叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是作物捕获光能同化  $\text{CO}_2$  的基本色素,其含量反映了作物的光合能力。由表 2 可知,土壤磷含量和含水量对大豆叶绿素 a 含量(Chl a)、叶绿素 b 含量(Chl b)、叶绿素总含量(Chl a+b)、叶绿素 a/b 含量比值(Chl a/b)都具有显著影响。随着土壤含水量和磷含量的提高,Chl a、Chl b 和 Chl a+b 均显著增加,而 Chl a/b 则呈减小的趋势(表 2)。方差分析表明,磷含量  $\times$  含水量对 Chl a/b 具有显著的交互效应(表 2)。缺磷会导致 Chl a/b 显著升高,而且在土壤含水量较低的情况下,这种效应更为明显。

表 1 磷和含水量对大豆的水分饱和和亏缺、叶片含水量、比叶面积、根系生物量、地上部生物量以及根冠比的影响

Table 1 Effects of phosphorus nutrition and soil water content on water saturation deficit, leaf water content, specific leaf area, root biomass, shoot biomass and root/shoot ratio in soybean seedlings

处理 Treatment	水分饱和和亏缺 Water saturation deficit (%)	叶片含水量 Leaf water content (%)	比叶面积 Specific leaf area (cm <sup>2</sup> /g)	根系生物量 Root biomass (g/plant)	地上部生物量 Shoot biomass (g/plant)	根冠比 Root/shoot ratio
磷含量(P)						
0.05	12.4 a	74.6 a	247 a	0.36 a	0.48 b	0.83 a
0.5	11.5 a	75.3 a	242 a	0.37 a	0.62 a	0.65 b
1.0	11.0 ab	75.2 a	247 a	0.40 a	0.68 a	0.61 b
2.0	10.3 b	75.5 a	248 a	0.38 a	0.63 a	0.61 b
含水量(W)						
20	15.6 a	72.6 c	213 d	0.40 a	0.45 d	0.93 a
40	11.8 b	74.3 b	237 c	0.39 ab	0.56 c	0.72 b
60	9.7 c	76.6 a	259 b	0.37 b	0.65 b	0.57 c
80	8.2 d	77.1 a	275 a	0.36 b	0.77 a	0.47 d
ANOVA						
P	5.97**	1.90ns	0.55 ns	2.07 ns	34.02***	27.38***
W	77.83***	63.62***	62.75***	4.16**	99.07***	119.35***
P × W	2.69*	2.13*	3.44**	1.39 ns	5.73***	3.86***

注:不同字母表示不同磷或水分处理间差异显著( $P < 0.05$ )。\*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 的水平上差异显著, ns 表示差异不显著。下同。

Note: Different letters denote significant differences between P or water levels (Duncan,  $P < 0.05$ ); \*, \*\*, \*\*\* : Significant at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively. ns: not significant. The same as below.

表 2 磷和含水量对大豆叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of phosphorus nutrition and soil water content on chlorophyll contents in soybean seedlings

处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chl a (mg/g FW)	叶绿素 b 含量 Chl b (mg/g FW)	叶绿素含量 Chl a + b (mg/g FW)	叶绿素 a/b 比值 Chl a/b
磷含量(P)				
0.05	2.64 b	0.64 c	3.27 c	4.26 a
0.5	2.82 ab	0.85 b	3.67 b	3.35 b
1.0	2.90 a	0.91 ab	3.81 ab	3.19 b
2.0	3.04 a	0.99 b	4.03 a	3.08 b
含水量(W)				
20	2.54 c	0.73 c	3.27 c	3.66 a
40	2.77 b	0.80 bc	3.57 b	3.54 a
60	3.00 a	0.91 ab	3.91 a	3.35 a
80	3.09 a	0.94 a	4.03 a	3.34 a
ANOVA				
P	17.67***	50.01***	33.08***	58.12***
W	38.72***	20.58***	39.00***	5.04**
P × W	1.26 ns	0.91 ns	1.03 ns	5.29***

2.3 不同处理对叶片叶绿素荧光的影响

$F_v/F_m$  和  $\Phi PS II$  反映了 PS II 反应中心利用所捕获激发能的情况。由表 3 可知,与正常供磷相比较,低磷和缺磷胁迫均导致叶片  $F_v/F_m$  和  $\Phi PS II$  显

著降低,高磷对  $\Phi PS II$  的影响不显著,然而却导致  $F_v/F_m$  下降。 $F_v/F_m$  和  $\Phi PS II$  随着含水量的下降而降低。磷含量 × 含水量对  $F_v/F_m$  具有显著的交互效应,但对  $\Phi PS II$  的交互效应不显著(表 3)。

表 3 磷和含水量对大豆叶绿素荧光的影响  
Table 3 Effects of phosphorus nutrition and soil water content on chlorophyll contents in soybean seedlings

处理 Treatment	$F_v/F_m$	$\Phi PS II$
磷含量(P)		
0.05	0.813 b	0.528 b
0.5	0.810 b	0.534 b
1.0	0.826 a	0.554 a
2.0	0.810 b	0.551 a
含水量(W)		
20	0.812 bc	0.517 c
40	0.808 c	0.537 b
60	0.820 a	0.548 b
80	0.819 ab	0.564 a
ANOVA		
P	14.63***	7.29***
W	8.25***	17.18***
P × W	3.68**	1.21 ns

#### 2.4 土壤含水量和磷含量对大豆气体交换参数的影响

土壤磷含量和含水量对大豆气体交换参数均有影响(表 4)。随着土壤磷含量的增大,  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $E$  和  $G_i$  增大,  $L_s$  减小, 而  $WUE$  的变化则不显著。随着土壤含水量的增大,  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $E$  和  $G_i$  增大, 而  $WUE$  和  $L_s$  则减小(表 4)。同时, 方差分析表明, 土壤磷含量和含水量对  $WUE$  和  $L_s$  有显著的交互效应。

### 3 讨论

磷素营养与水分之间有着非常密切的关系。大

量研究表明, 水分影响植物对磷的吸收、利用和分配, 反之适宜的磷素营养水平也能够一定程度上提高植物对干旱的适应性及其水分利用效率, 达到“以肥调水”的目的<sup>[10-17]</sup>。叶片含水量是反映叶片保水力的一个常用指标, 而水分饱和和亏缺(WSD)则是衡量叶片水分状况的一个重要指标, WSD 越大说明水分散失越严重。本研究结果表明, 干旱和低磷均导致大豆叶片水分饱和和亏缺增大, 含水量降低, 且具有交互效应。可见, 磷营养对增强作物对干旱胁迫的适应性具有非常重要的作用。

比叶面积反映了叶片捕获光照资源的能力, 与相对生长速率和净光合速率成正比, 与叶寿命成反比, 高 SLA 的植物通常生长在资源较为丰富的环境中, 而低 SLA 植物叶片营养投资较高, 能够适应干旱和高光强环境<sup>[24]</sup>。根冠比可以反映植物地上与地下的分布情况, 其大小能反映植物在不同条件下的生长情况, 以及抗胁迫的能力。本文研究结果表明, 干旱条件下, 大豆叶片 SLA 减小, 根冠比增大, 说明植物本身具有一定的抗旱能力。缺磷则导致根冠比增大, 且缺磷和干旱对 SLA 和根冠比的叠加效应显著。这一结果似乎与水分饱和和亏缺及含水量的结果不相一致, 说明磷对植物抗旱能力的影响可能存在多种不同的机制。一方面, 在水和磷胁迫的条件下, 大豆地上部分同化物向根系的运输量增加或根对碳水化合物利用效率提高, 以增加根的相对质量来吸收更多的水和磷, 以此来弥补水和磷的不足<sup>[25-27]</sup>。另一方面, 缺磷条件下, 生长的作物主要通过降低对汞敏感的水通道蛋白活性或含量来降低

表 4 磷和含水量对大豆气体交换的影响

Table 4 Effects of phosphorus nutrition and soil water content on gas exchange in soybean seedlings

处理 Treatment	净光合速率 $P_n$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 $G_s$ [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $G_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	蒸腾速率 $E$ [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ]	水分利用率 $WUE$	气孔限制值 $L_s$
磷含量(P)						
0.05	14.4 b	0.18 b	208 b	2.72 b	5.43 a	0.46 a
0.5	15.4 b	0.21 ab	219 ab	2.98 ab	5.22 a	0.45 a
1.0	16.8 a	0.22 a	227 a	3.25 a	5.20 a	0.41 b
2.0	17.0 a	0.23 a	230 a	3.27 a	5.21 a	0.40 b
含水量(W)						
20	14.5 b	0.18 b	211 b	2.67 c	5.53 a	0.46 a
40	15.3 b	0.19 b	221 ab	2.91 c	5.30 a	0.44 ab
60	17.1 a	0.24 a	229 a	3.29 b	5.20 a	0.42 b
80	17.4 a	0.25 a	227 a	3.58 a	4.86 b	0.39 c
ANOVA						
P	14.29***	6.05**	8.21***	11.43***	2.83*	13.30***
W	18.42***	15.48***	7.06***	27.30***	11.27***	12.55***
P × W	0.71 ns	1.07 ns	1.95 ns	1.36 ns	4.54***	3.23**

其根质膜上的导水能力<sup>[28]</sup>,从而降低了植株根系的导水率<sup>[11]</sup>。

本研究发现,缺磷和干旱均导致大豆的光合速率降低。通常认为,光合速率降低主要有两方面的原因:气孔限制和非气孔限制<sup>[29]</sup>。Farquhar和Sharkey<sup>[30]</sup>认为,可用胞间CO<sub>2</sub>浓度*C<sub>i</sub>*和气孔限制值(*L<sub>s</sub>*)判断气孔导度是否是光合速率相应变化的主要原因。只有当*C<sub>i</sub>*与*P<sub>n</sub>*变化方向相同,两者都减小且*L<sub>s</sub>*增大时,才可认为光合速率的下降主要是由于气孔导度的降低引起的,否则,如果*P<sub>n</sub>*下降,*C<sub>i</sub>*升高,*L<sub>s</sub>*减小,便可以肯定光合速率下降的决定因素是叶肉细胞光合活性的降低,而不是气孔导度的因素<sup>[31]</sup>。本文研究结果显示,大豆叶片的*P<sub>n</sub>*、*G<sub>s</sub>*、*E*和*C<sub>i</sub>*均随着土壤含水量和磷含量的降低而减小,而气孔限制值(*L<sub>s</sub>*)则增大。因此,可以认为缺磷和干旱引起大豆光合速率的降低主要是由于气孔限制所致。方差分析表明,土壤磷含量和含水量对*L<sub>s</sub>*具有显著的交互效应,说明缺磷和干旱胁迫对气孔限制具有累加效应。

许多研究表明,在水分亏缺时,植物体内源ABA含量增加,ABA的一个重要生理功能就是促进离子流出保卫细胞和降低保卫细胞膨压,诱导气孔关闭,从而降低水分损耗,增加植株在干旱条件下的保水能力<sup>[32]</sup>。同样,在缺磷时,棉花和小麦的脱落酸含量升高,气孔导度降低<sup>[19,20]</sup>。本研究发现,尽管干旱胁迫下导致大豆叶片的气孔导度显著降低,但水分利用效率却显著增大。方差分析表明,土壤磷含量和含水量对WUE具有显著的交互效应。可见,气孔限制是植物适应干旱的一种重要机制,而缺磷则有利于提高干旱条件下植物的水分利用效率。

叶绿素是作物光合作用的物质基础,其含量高决定作物光合作用水平,叶绿素破坏与降解可直接导致光合作用效率的降低。因此,植物叶片叶绿素含量不仅是直接反映植物光合能力的一个重要指标,而且也是衡量植物抗逆性的重要生理指标之一。本文研究结果表明,缺磷和干旱均导致Chl a、Chl b和Chl a+b下降,其变化趋势与*P<sub>n</sub>*相一致。此外,缺磷还导致大豆叶片Chl a/b显著升高,说明其对叶绿素b的抑制显著大于叶绿素a,这种影响在干旱条件下更为明显。可见,叶绿素含量的下降及其比值的变化可能是缺磷和干旱胁迫下大豆光合速率下降的重要原因之一。

*F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>*作为反映PS II活性中心光能转换效率的参数,在非环境胁迫条件下极少变化,但当受到胁迫时则会发生显著降低<sup>[33]</sup>。*ΦPS II*表示PS II反应

中心受到环境胁迫时,在反应中心部分关闭情况下的实际光化学效率,反映植物叶片在光下用于电子传递的能量占吸收光能的比例<sup>[34]</sup>。在本试验中,缺磷和干旱胁迫下大豆叶片的*F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>*和*ΦPS II*均显著降低,表明缺磷和干旱胁迫使大豆PS II受到伤害,降低了PS II原初光能转化效率和光合电子传递速率,PS II潜在活性中心受损,光合作用原初反应过程受到抑制,光合电子由PS II反应中心向Q<sub>A</sub>、Q<sub>B</sub>及PQ库传递过程受到影响,从而降低了光反应能力。

综上所述,磷营养对植物抗旱能力的影响可能存在多种不同的机制。一方面,缺磷能提高大豆的根冠比,降低气孔导度和蒸腾速率,从而增加了植株对水和磷的吸收和利用效率,以弥补水和磷的不足。另一方面,缺磷可能通过降低根质膜的导水能力而减少水分的吸收。缺磷和干旱引起的气孔限制、叶绿素含量降低以及PS II原初反应过程的抑制,是光合速率下降的重要原因。

#### 参考文献:

- [1] 李树华,许兴,何军,等.水分胁迫对牛心朴子光合生理特性影响的研究[J].西北植物学报,2004,24:100—104.
- [2] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants[J]. Plant Cell Environ. 2002,25:275—294.
- [3] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等.紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J].生态学报,2007,27:5229—5237.
- [4] 彭正萍,李春俭,门明新.缺磷对不同穗型小麦光合生理特性和产量的影响[J].作物学报,2004,30:826—830.
- [5] Terry N, Ulrich A. Effects of Phosphorus Deficiency on the Photosynthesis and Respiration of Leaves of Sugar Beet[J]. Plant Physiol, 1973,51:43—47.
- [6] Rao I, Terry N. Leaf Phosphate Status, Photosynthesis, and Carbon Partitioning in Sugar Beet I. Changes in Growth, Gas Exchange, and Calvin Cycle Enzymes[J]. Plant Physiol, 1989,90:814—819.
- [7] Mikulska M, Bomsel J L, Rychter A M. The influence of phosphate deficiency on photosynthesis, respiration and adenine nucleotide pool in bean leaves[J]. Photosynthetica, 1998,35:79—88.
- [8] 周建朝,范晶,王孝纯,等.磷胁迫下不同基因型甜菜的光合特征[J].植物营养与肥料学报,2009,15:910—916.
- [9] Pathan M S, Lee J D, Shannon J G, et al. Recent advances in breeding for drought and salt stress tolerance in soybean[A]. Jenks M A, Hasegawa P M, Jain S M. Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops[C]. Springer Netherlands, 2007: 739—773.
- [10] 张岁岐,山仑.磷营养对春小麦抗旱性的影响[J].应用与环境生物学报,1998,(4):115—119.
- [11] 沈玉芳,曲东,王保莉,等.干旱胁迫下磷营养对不同作物苗期根系导水率的影响[J].作物学报,2005,31:214—218.
- [12] 钟鹏,朱占林,李志刚,等.干旱和低磷胁迫对大豆叶保护酶活性的影响[J].中国农学通报,2005,21:153—154.

- [13] Gutierrez-Boem F H, Thomas C W. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit[J]. *Agron J*, 1998, 90:166—171.
- [14] Rodriguez D, Goudriaan J, Oyarzabal M, et al. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants[J]. *J Plant Nutr*, 1996, 19:29—39.
- [15] Singh D K, Sale P W G. Growth and potential conductivity of white clover roots in dry soil with increasing phosphorus supply and defoliation frequency[J]. *Agron J*, 2000, 92:868—874.
- [16] Jin J, Wang G, Liu X, et al. Interaction between phosphorus nutrition and drought on grain yield, and assimilation of phosphorus and nitrogen in two soybean cultivars differing in protein concentration in grains[J]. *J Plant Nutr*, 2006, 29:1433—1449.
- [17] Jones C A, Jacobsen J S, Wraith J M. The effects of P fertilization on drought tolerance of malt barley[A]. *Western Nutrient Management Conference*[C]. Salt Lake City, UT, 2003:6—7.
- [18] Kramer P. *Plant and soil water relationships; a modern synthesis* [M]. New York: McGraw - Hill, 1969.
- [19] Radin J. Stomatal responses to water stress and to abscisic acid in phosphorus - deficient cotton plants[J]. *Plant Physiol*, 1984, 76:392—394.
- [20] Rodriguez D, Goudriaan J. Effects of phosphorus and drought stresses on dry matter and phosphorus allocation in wheat[J]. *J Plant Nutr*, 1995, 18:2501—2517.
- [21] 王西瑶,朱涛,邹雪,等. 缺磷胁迫增强了马铃薯植株的耐旱能力[J]. *作物学报*, 2009, 35:875—883.
- [22] 张宪政. *作物生理研究法* [M]. 北京:农业出版社, 1992:142.
- [23] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes[J]. *Methods Enzymol*, 1987, 148:350—382.
- [24] Garnier E, Shipley B, Roumet C, et al. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content[J]. *Funct Ecol*, 2001, 15:688—695.
- [25] 王聪,刘玉平,李秀辉,等. 磷胁迫下不同基因型大豆苗期根系形态及生物量的差异[J]. *中国农学通报*, 2005, 21:155—159.
- [26] 庞欣,李春俭. 部分根系供磷对小麦幼苗生长及同化物分配的影响[J]. *作物学报*, 2000, 26:719—724.
- [27] Qiu J, Israel D. Diurnal starch accumulation and utilization in phosphorus - deficient soybean plants[J]. *Plant Physiol*, 1992, 98:316—323.
- [28] Carvajal M, Cooke D T, Clarkson D T. Responses of wheat plants to nutrient deprivation may involve the regulation of water - channel function[J]. *Planta*, 1996, 199:372—381.
- [29] Mediavilla S, Santiago H, Escudero A. Stomatal and mesophyll limitations to photosynthesis in one evergreen and one deciduous Mediterranean oak species[J]. *Photosynthetica*, 2002, 40:553—559.
- [30] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1982, 33:317—345.
- [31] Chartzoulakis K, Patakas A, Kofidis G, et al. Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars[J]. *Sci Hortic*, 2002, 95:39—50.
- [32] 匡逢春,萧浪涛,夏石头. 脱落酸对植物气孔运动的调控作用[J]. *植物生理学通讯*, 2003, 39:262—266.
- [33] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1991, 42:313—349.
- [34] 孙宪芝,郑成淑,王秀峰. 高温胁迫对切花菊‘神马’光合作用与叶绿素荧光的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19:2149—2154.

## Interaction of phosphorus concentration and soil moisture on photosynthetic traits in soybean plants

WANG Xu-ming, ZHANG Zheng, SHI Gang-rong

(The Provincial Key Laboratory of the Resource Plant Biology in College of Life Sciences, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China)

**Abstract:** The effects of phosphorus (P) nutrition and soil water availability (W) on the photosynthetic traits of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) plants were studied in pot experiments. Four levels of P supply (0.05, 0.5, 1.0 mmol/L and 2.0 mmol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) were applied by nutrition solution. Before seedling establishment, the pots were kept near 100% of holding water capacity (HWC). Afterwards, the pots were maintained at 20%, 40%, 60%, and 80% HWC, respectively. The results were showed as follows: (1) Both the low P and drought stress resulted in a reduction of the leaf water content and shoot biomass, and an increase of the leaf water saturation deficit (WSD) and root/shoot ratio in soybean plants. There was a significant  $P \times W$  interaction on WSD, root/shoot ratio, leaf water content, specific leaf area, and shoot biomass. (2) The chlorophyll contents (Chl a, Chl b and Chl a + b) were significantly decreased in seedlings under low P and/or drought stress, while chlorophyll a/b ratio was enhanced in P deficient plants, and it showed significant  $P \times W$  interaction. (3) Drought stress and P deficient significantly reduced  $F_v/F_m$  and  $\Phi_{PSII}$ , and a significant  $P \times W$  interaction was observed on  $F_v/F_m$ . (4) Both the low P and drought stress caused a decrease in the net photosynthetic rate, intercellular  $\text{CO}_2$  concentration, stomatal conductance, and transpiration rate, but an increase in the stomatal limitation ( $L_s$ ) in soybean plants. A significant  $P \times W$  interaction was observed on the water use efficiency and  $L_s$ .

**Keywords:** soybean; P nutrition; drought stress; photosynthesis