

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 06. 013

不同磷添加梯度对荆条幼苗光合特性的影响^{*}

赵琛迪, 刘雅辰, 杨子, 范世献, 胡启立, 余洁, 赵勇
(河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为探究不同梯度磷添加对荆条幼苗光合特征的影响, 设置4个磷添加水平0、10、20、30 gP/(m²·a) (分别以CK、LP、MP、HP表示)的荆条幼苗盆栽试验。结果表明, 4种施磷处理下的荆条叶片在净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度和蒸腾速率上整体表现为前期低、后期高; 不同施磷处理下荆条幼苗叶片的净光合速率、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、气孔导度最低值均出现在CK处理, 净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度最高值出现在MP处理, 分别为10.5 μmol/(m²·s), 311 μmol/mol, 153.6 mmol/(m²·s), 蒸腾速率最高值出现在HP处理, 为4.4 mmol/(m²·s)。相比较CK以上4项指标分别增加108.7%、52.7%、113.4%和73.7%。说明施磷能够显著提高荆条叶片的光合水平, 对荆条的生长发育有促进作用, 且20 gPm²/a施磷量即MP处理对荆条光合作用的提升效果最显著。

关键词: 磷添加; 光合特征; 净光合速率; 相关性

中图分类号: S 714; S 792.189 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 06-0094-06

Effects of Different Gradient Phosphorus Additions on Photosynthetic Characteristics of *Vitex negundo* Seedlings

ZHAO Chen-di, LIU Ya-chen, YANG Zi, FAN Shi-xian, HU Qi-li, YU Jie, ZHAO Yong
(Forestry College of Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450002, P. R. China)

Abstract: The main purpose of this study was to investigate the effect of different gradients of phosphorus addition on the photosynthetic characteristics of *Vitex negundo* seedlings. The purpose is to investigate whether phosphorus application has a significant effect on improving the photosynthetic capacity of the wattle, and analyzes the effect of different gradients of phosphorus addition on the photosynthetic characteristics of wattle seedlings, so as to analyze the amount of phosphorus application that has the most obvious effect on the growth and development of the wattle. The ecological restoration in the southern foot area provides a theoretical basis. This experiment is a pot experiment in the field. The four phosphorus addition levels in this study were 0, 10, 20, and 30 g P/(m²·a), expressed as CK, LP, MP, and HP. Phosphorus treatment uses inorganic phosphorus (NaH₂PO₄). The frequency is once a month and a total of 4 times are added. The results showed that the net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, stomatal conductance and transpiration rate of the leaves of the wattle under the four phosphorus treatments were generally low in the early stage and high in the latter stage; The lowest values of intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, and stomatal conductance all appeared in CK treatment, and the highest values of net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, stomatal conductance appeared in MP treatment, which were 10.5 μmol/(m²·s), 311 μmol/mol, 153.6 mmol/(m²·s), the highest value of transpiration rate appeared in HP treatment, which was 4.4 mmol/(m²·s), Compared with CK, the four indicators increased by up to 108.7%, 52.7%,

* 收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270750); 国家自然科学基金项目 (30601458)。

第一作者简介: 赵琛迪 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: 672311264@qq.com

通信作者简介: 赵勇 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事植被恢复研究。zhaoyonghnd@163.com

113.4% and 73.7% respectively. Phosphorus application can significantly improve the photosynthesis level of the wattles, and promote the growth and development of the wattles. The phosphorus application amount of $20 \text{ gP}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, that is, the MP treatment has the most significant effect on the improvement of wattles photosynthesis.

Key words: phosphorus addition; light and characteristics; net photosynthetic rate; correlation

荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*) 是马鞭草科 (Verbenaceae) 牡荆属 (*Vitex*) 的落叶灌木植物^[1], 是黄荆 (*Vitex negundo*) 的一个变种, 主要分布在中国的河南、河北、陕西、甘肃等地。因其具有生命力顽强, 抗旱性、耐寒性高的特点, 在干旱半干旱地区的生态恢复过程中能够起到积极作用。太行山南麓地区受限于地理、气候因素, 水资源匮乏, 生态环境脆弱, 荆条作为优势物种在此广泛分布, 在该地区的生态恢复中具有重要地位。以往的研究中大多以荆条对土壤养分的吸收^[2]、养分变化下荆条的适应对策^[3]以及荆条的根系结构与生物量^[4]等方面作为研究对象, 而关于荆条的光合特征研究甚少。

光合作用指的是自然界中的植物吸收光能, 将水和 CO_2 合成有机物的过程^[5], 对实现自然界中能量转化以及维持大气碳—氧平衡具有重要意义^[6]。光合作用是植物生长发育的基础^[7], 而植物的各光合指标 (净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、蒸腾速率) 则能够直接反映植物的生长特征^[8-9]。磷元素作为植物生长发育所必需的大量营养元素之一^[10], 对植物的生长生理发育、化学机制、植物体内各种酶的含量以及光合、呼吸等重要生理过程都能够产生显著影响。它不仅仅是植物体内核酸、ATP、NADPH、膜脂等重要的化合物组成部分, 而且在植物体内的多种代谢过程中起着至关重要的作用^[11], 包括糖代谢、碳水化合物的运输、植物的光合调节、信息传导等, 对植物的生长发育过程和植物的可逆性具有重要意义和影响^[12]。合理利用磷素资源对干旱半干旱地区的生态恢复具有重要意义。前人研究表明, 缺磷会导致植物叶片的叶绿素含量降低, 从而降低植物的光合速率^[13-14], 而额外施加磷素营养能够提高植物的叶绿素和可溶性蛋白的含量, 提高植物的光合水平^[15-16]。

因此, 本研究以太行山南麓地区的优势灌木物种荆条为研究对象, 分析不同梯度的磷添加对荆条幼苗的光合特征有何影响, 进而得出对荆条生长发育促进作用最明显的磷施加量, 探究施加磷对提高荆条的光合能力有无显著作用, 为太行山南麓地区的生态恢复提供理论依据。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究地概况

本研究所用的荆条, 选自国有济源市大沟河林场附近的山区, 海拔为 320 ~ 400 m, 隶属太行山南麓。

试验地点为河南省郑州市金水区东风路街道河南农业大学第3生活区, 生活区内气候类型为温带大陆性季风气候, 年平均无霜期为 209 d, 平均气温 $14.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 研究方法

2018年9月上旬在大沟河林场采集成熟饱满的荆条种子, 贮藏在河南农业大学实验室的冰箱中 (温度设置为 $4 \text{ }^\circ\text{C}$), 2019年4月取出进行试验。将贮藏在冰箱中的荆条种子用自来水清洗后筛选, 去除虫蛀、发霉的种子后晾干; 播种前催芽, 温水浸泡 24 h, 酒精浸泡消毒, 然后用蒸馏水冲洗干净, 放在垫有湿润纱布的培养皿中, 置于恒温培养箱中培养 (设置温度 $28 \text{ }^\circ\text{C}$); 待幼苗长出, 移栽于上部直径 21 cm、底部直径 16 cm、高 26 cm 装有土的塑料花盆中, 花盆底部有 4 个直径 1 cm 的排水孔; 将花盆放置于河南农业大学第3生活区通风大棚内。花盆中的土取自第3生活区内的样地, 将样地土带回实验室测定, 其基本养分含量为有机质 23.48 g/kg 、速效磷 6.42 mg/kg 、碱解氮 12.24 mg/kg 。

施磷水平主要参考习金根等^[17]和李美蓉等^[18]的不同供磷水平试验, 4个施磷处理水平设置为 0、10、20、30 $\text{g P}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 分别表示为 CK、LP、MP、HP, 每个处理 25 个重复, 其中 CK 为对照。在河南农业大学第3生活区的通风大棚中设置试验样地, 周围无树木遮挡, 将样地划分为 4 个长 2 m \times 3 m 的区域, 各区域之间间隔 1 m, 每个区域为 1 个处理。荆条生长期间, 2 d 进行 1 次浇水、除草等管护工作, 每次浇水 400 mL。

试验中施磷处理使用无机磷, 通过施加 NaH_2PO_4 的方式, 将每一盆处理所需要的 NaH_2PO_4 完全溶解于 200 mL 蒸馏水中, 空白处理用 200 mL 蒸馏

水代替,以每个月一次的频率对土壤进行外源磷添加,共添加4次。

每15 d测量一次光合指标,挑选天气晴朗阳光充足的上午,使用CIRAS3便携光合仪,选取荆条植株上部健康叶片的叶室部位,避开叶脉,在9:00—12:00测定其光合特性。测定过程中将光合仪的各参数设置为:光强 $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,相对湿度80%,叶室温度 $25\pm 1\ ^\circ\text{C}$, CO_2 浓度为大气中的 CO_2 浓度约为 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$,测定荆条叶片光合指标,每个处理测3个重复。测定过程中记录所有指标的变化。

1.3 数据处理

使用EXCEL软件对数据进行统计并制作图表,使用SPSS 19软件进行单因素方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同梯度磷添加对荆条叶片净光合速率的影响

由图1可以看出,在荆条幼苗培养15 d时,HP处理的叶片净光合速率最高,为 $5.23\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,显著高于LP和CK,MP和HP均显著高于CK,LP高于CK但不明显;在30 d时,MP高于CK,LP和HP高于MP,显著高于CK处理;45 d时,4种处理的荆条叶片净光合速率继续增加,其中MP处理最高,为 $6.93\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,显著高于其他3种处理,3种施加磷处理的荆条叶片净光合速率均显著高于CK处理;60 d时,各处理荆条叶片的净光合速率保持增长势头,其中LP高于HP高于CK,但都不显著,只有MP处理显著高于其他3种处理,为 $6.9\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;75 d时,与60 d时基本一致,MP处理显著高于其他3种处理,达到 $7.53\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,LP处理高于HP处理,显著高于CK处理;90 d时,CK处理最低为 $5.03\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,3种施磷处理表现由高到低为MP、HP、LP,均显著高于CK处理,相比较CK处理分别增加108.7%、88.3%、71.3%。在整个荆条培养期内,叶片净光合速率整体表现为在荆条幼苗培养初期(培养15 d和30 d时),HP处理高于其他3种处理,中后期(30 d后)一直都是MP处理净光合速率最大,整个培养期内3种施磷处理均高于CK处理。最高值出现在MP处理,为 $10.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

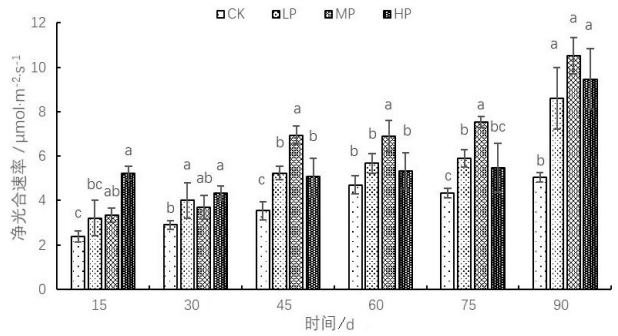


图1 不同梯度磷添加对荆条叶片净光合速率的影响
注:误差值类型为标准误差;不同字母表示不同处理间差异具有显著性($P<0.05$)。下同。

Fig. 1 Phosphorus addition in different gradients on net photosynthetic rate of *Vitex negundo* leaves

2.2 不同梯度磷添加对荆条叶片胞间 CO_2 浓度的影响

不同梯度磷添加对荆条叶片胞间 CO_2 浓度的影响结果见图2。

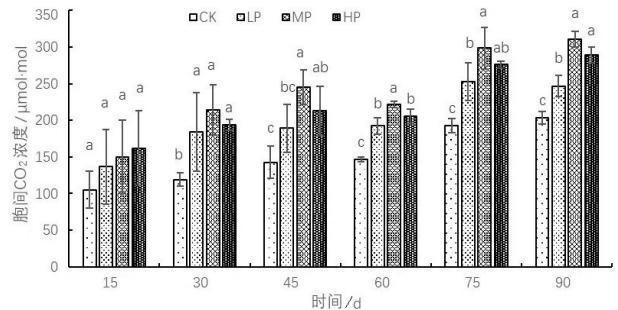


图2 不同梯度磷添加对荆条叶片胞间 CO_2 浓度的影响

Fig. 2 Phosphorus addition in different gradients on intercellular CO_2 concentration in *Vitex negundo* leaves

由图2可以看出,在荆条幼苗培养15 d时,各处理之间无显著差异,3种施磷处理高于CK处理,由高到低为HP、MP、LP;30 d时,3种施磷处理都显著高于CK处理,MP处理最高,为 $214.3\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$,这与培养15 d时不同,但3种施磷处理之间无显著差异;45 d时,4种处理整体表现与30 d时类似,LP处理高于CK处理,MP处理为 $245.7\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$,显著高于LP处理和CK处理;60 d时,3种施磷处理显著高于CK处理,MP处理显著高于其他3种处理,为 $221.3\ \mu\text{mol}/\text{m}^2$;75 d时,各处理均比之前明显增加,但总体趋势相同,3种施磷处理显著高于CK;90 d时,MP高于HP,2种处理显著高于LP和CK,3种施磷处理均显著高于CK,相比CK分别增加21.2%、52.7%、

41.9%。在整个培养期内，3种施磷处理的荆条叶片胞间CO₂浓度均高于CK处理，在荆条幼苗培养15d时表现尚不明显，但荆条幼苗培养30d后这一现象比较显著，在荆条幼苗生长初期（荆条幼苗培养15d时）胞间CO₂浓度HP处理最大，但在荆条幼苗培养30d后都是MP处理最大。最高值出现在MP处理，为311 μmol/m²。

2.3 不同梯度磷添加对荆条叶片气孔导度的影响

由图3可以看出，荆条幼苗培养15d时，CK、LP、MP处理之间无显著差异，HP处理最高为36.3 mmol/(m²·s)，显著高于其他3种处理；30d时，MP处理相比之前显著增加，HP高于MP，MP、HP显著高于LP和CK；45d时，MP和HP显著高于CK，HP处理高于MP处理；60d时，MP处理反超HP处理成为最高，为134.3 mmol/(m²·s)，但差异不显著，MP处理和HP处理显著高于CK处理，LP处理高于CK处理；75d时，MP大于HP，又大于LP，但3种处理之间无显著差异，均大于CK处理；90d时，LP处理超过HP处理，3种处理相比CK分别增加89.9%、113.4%、45.4%。在整个培养期内，除了培养初期（荆条幼苗培养15d时），CK、LP、MP处理间无显著差异外，3种施磷处理的荆条叶片气孔导度均高于CK处理，在荆条培养前期（0~45d内），HP处理的气孔导度最大，荆条培养后期（45~90d），MP处理成为最高，LP处理和HP处理互有高低，整体表现3种施磷处理均高于CK处理。最高值出现在MP处理，为153.6 mmol/(m²·s)。

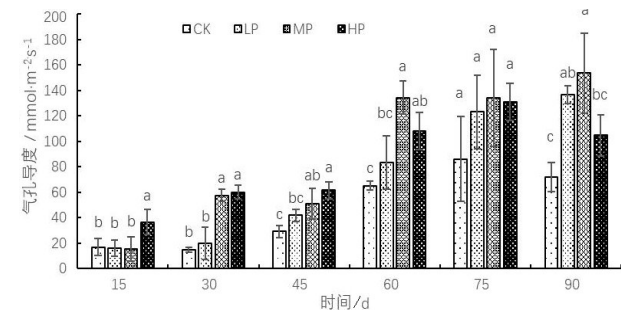


图3 不同梯度磷添加对荆条叶片气孔导度的影响

Fig. 3 Phosphorus addition in different gradients on stomatal conductance Of *Vitex negundo* leaves

2.4 不同梯度磷添加对荆条叶片蒸腾速率的影响

由图4可知，荆条幼苗培养15d时，HP处理最高为1.86 mmol/(m²·s)，显著高于CK处理和LP处理；30d时，整体趋势与荆条幼苗培养15d时基本一致，HP处理显著高于CK处理，其余处

理间无显著差异，由高到低为HP、MP、LP、CK；45d时，除了CK处理略有下降，其余3种施磷处理的荆条叶片蒸腾速率均明显提高，其中HP处理和MP处理显著高于CK处理和LP处理，HP处理最高为3.43 mmol/(m²·s)；60d时，CK处理和LP处理有升高，但MP处理和HP处理出现了不同程度的下降，此时LP处理超过了MP处理和HP处理，3种施磷处理均高于CK处理，总体表现从高到低为LP、MP、HP、CK；75d时，MP处理最高，显著高于HP处理和CK处理，CK处理仍最低为2.67 mmol/(m²·s)；90d时，CK处理显著低于其他3种施磷处理，为2.53 mmol/(m²·s)，HP最高，其次为MP，3种施磷处理中LP最低，MP和HP显著高于LP，3种处理相比CK分别增加了33%、64.5%、73.7%。在整个荆条培养期内，除了60d时LP处理最高，75d时MP处理最高，其余时期均为HP处理最高，整体表现为3种施磷处理均高于CK处理，最高值出现在HP处理，为4.4 mmol/(m²·s)。

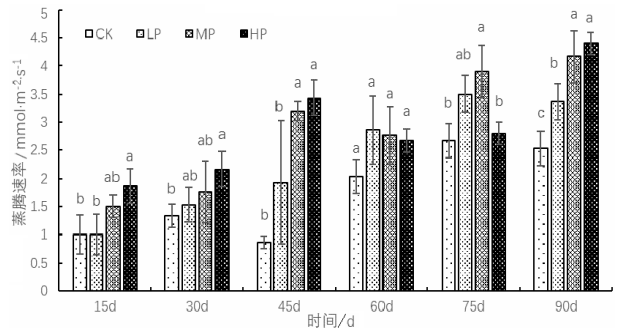


图4 不同梯度磷添加对荆条叶片蒸腾速率的影响

Fig. 4 Phosphorus addition in different gradients on transpiration rate of *Vitex negundo* leaves

2.5 不同梯度磷添加荆条各光合指标相关性分析

叶片的净光合速率是各种生理生态因子综合作用的结果。由表1可知，在4种不同施磷处理下的荆条幼苗叶片净光合速率与胞间CO₂浓度呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$)；与气孔导度、蒸腾速率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)；胞间CO₂浓度与蒸腾速率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)，蒸腾速率与气孔导度呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$)。表明荆条幼苗的各个光合指标之间存在相关关系，互相影响。净光合速率受气孔导度和蒸腾速率的影响大于胞间CO₂浓度的影响，蒸腾速率受胞间CO₂浓度的影响大于受气孔导度影响。

表1 不同梯度磷添加下荆条各光合指标相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of various photosynthetic indexes of wattle under different gradient phosphorus addition

	净光合速率	胞间 CO ₂ 浓度	气孔导度	蒸腾速率
净光合速率	1.000			
胞间 CO ₂ 浓度	0.961 *	1.000		
气孔导度	0.853 **	0.737	1.000	
蒸腾速率	0.926 **	0.954 **	0.593 *	1.000

注: ** 为在 0.01 水平上显著相关; * 为在 0.05 水平上显著相关。

3 结论与讨论

植物的净光合速率能够反应植物对碳的代谢能力,可以反映光合运转机制的运转情况^[19]。本研究表明3种施磷处理的荆条叶片净光合速率均高于空白对照处理,这一结果符合试验预期,也与李进等^[20]关于不同供磷水平对甘蔗(*Saccharum officinarum*)的光合作用影响结果一致。随着施磷量的增加,HP处理的荆条叶片净光合速率相比MP处理有所降低,这与陈屏昭等^[21]关于蜜柑(*Citrus unshiu*)叶片的研究结果一致,说明添加磷对提高植物光合能力具有促进作用,但有一个临界值,超过这一临界值促进作用会下降,本研究表明MP处理对提高荆条幼苗的光合作用效果最显著。李进等^[20]的研究结果显示,随着施磷量的提高,甘蔗的叶绿素总量、净光合速率和胞间CO₂浓度都得到显著增加,这说明适量供磷能够增加植物叶片内的叶绿素含量,增强对光的吸收,提高净光合速率。但如果供磷量继续提高,高磷和低磷处理的甘蔗蒸腾速率和气孔导度并没有显著增加,反而是施磷处理和空白对照的差别巨大,这一研究结果也进一步佐证了本研究的观点。

胞间CO₂浓度指叶片细胞间的CO₂含量^[22],其大小与气孔导度有关,气孔导度越大,进入植物叶片细胞之间的CO₂越多,CO₂高说明光合作用所消耗的C变少,因此净光合速率应该与胞间CO₂浓度呈负相关关系,但本试验结果表明两者指标呈正相关关系,这可能是因为试验过程中荆条叶片的气孔闭合不均匀。蒸腾速率是在单位时间内单位面积的叶片上通过蒸腾作用所损失掉的水分含量^[23],植物的主要蒸腾方式为气孔蒸腾^[24]。气孔蒸腾的速率和气孔导度有直接关系,植物通过气孔的开关来控制叶片的蒸腾速率,进而影响叶片的净光合速率^[25]。本研究结果表明不同施磷处理的荆条叶片

净光合速率与气孔导度、蒸腾速率之间呈极显著正相关关系,这与王晶等^[26]关于西伯利亚银白杨(*Populus bahofenii*×*P. pyramida*)的研究结果一致。而气孔导度与光合速率受施磷影响表现为施磷处理的荆条显著高于空白对照处理,这一结果也与Hirohumi等^[27]对棉花(*Anemone vitifolia*)的研究结果一致。本研究表明,荆条叶片的各光合指标整体表现为前期低、后期高,随着培育时间各指标逐渐增长,这说明荆条幼苗的光合能力在随着荆条的生长提高,施磷能够促进荆条幼苗光合能力提高效率,这与胡启立关于荆条的野外试验和盆栽试验中所得到的结果均保持一致^[28]。

综上所述,不同施磷处理下荆条幼苗叶片的净光合速率、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、气孔导度最低值均出现在空白对照组,净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度最高值出现在MP处理,分别为10.5 μmol/(m²·s), 311 μmol/mol, 153.6 mmol/(m²·s), 蒸腾速率最高值出现在HP处理,为4.4 mmol/(m²·s)。MP处理下的荆条叶片净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度、蒸腾速率均显著高于CK处理(P<0.05)。3种不同施磷水平的荆条相比空白处理叶片的净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度和蒸腾速率都有显著提升,最多分别增加108.7%、52.7%、113.4%和73.7%,这表明施磷能够显著提高荆条叶片的光合水平,对于荆条的生长发育具有显著的促进作用,施磷量为20 gP/(m²·a)对荆条光合作用的提升效果最显著。

参考文献:

- [1] 曲波,张谨华,陈永强,等. 山西荆条分布现状及其群落结构研究[J]. 中国野生植物资源,2017,36(6):65-67,74.
- [2] Zhao H, Li X, Zhang Z, et al. Species diversity and drivers of arbuscular mycorrhizal fungal communities in a semi-arid mountain in China[J]. PeerJ,2017,5(12),1-17.
- [3] 赵河,张志明,赵勇,等. 模拟氮沉降对荆条灌木“肥岛”土壤养分的影响[J]. 生态学报,2017,37(18):6014-6020.
- [4] 袁晓柯,张志铭,赵勇,等. 荆条灌丛下不同林木幼苗根周土壤颗粒分形特征[J]. 西部林业科学,2017,46(2):118-123.
- [5] 刘雅辰,赵琛迪,杨子,等. 太行山南麓不同龄级荆条光合特性及光响应研究[J]. 河南农业大学学报,2020,54

(2):203-208,230.

[6]吕光京,吕慧玲.“绿色植物与生物圈中的碳-氧平衡”一节的教学设计[J]. 中学教学参考,2011(11):111.

[7]邢强,胡永红,秦俊. 冬季不同光照度对室内绿墙植物光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):147-152.

[8]李诗华,解丽娜,陈威,等. 升温及淹水条件下土著与外来盐沼植物的生长和光合特征比较[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2019(1):144-155.

[9]黄川腾,林玲,陈飞飞,等. 遮阴和施肥对油丹幼苗光合作用的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学版),2019,39(6):173-177.

[10]康树文. 氮磷添加对内蒙古典型草原植物群落结构和季节动态的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2019.

[11]陈宇. 低磷胁迫下不同玉米自交系幼苗的生长、磷素分配特征及相关响应基因表达研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.

[12]于红梅,邵玉芳,樊明寿,等. 植物根际解磷细菌与植物生长发育[J]. 中国农学通报,2007,23(4):241-244.

[13]Wise R R, Frederick J R, Alm D M, et al. Investigation of the limitations to photosynthesis induced by leaf water deficit in field-grown sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. 2010,13(9):923-931.

[14]杭红涛,吴沿友,张开艳,等. 模拟喀斯特不同土壤生境胁迫对刺槐幼苗光合特性及干物质分配的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(9):2648-2654.

[15]吴楚,王政权,孙海龙,等. 氮磷供给对长白落叶松叶绿素合成、叶绿素荧光和光合速率的影响[J]. 林业科学,2005,41(4):31-36.

[16]彭艳,杨成,李婷婷. 外源磷添加对茶园土壤磷有效性和微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 西部林业科学,2019,48(1):12-17.

[17]习金根,吴浩,梁敏枝,等. 不同的磷水平对剑麻根

系和植株生长的影响[J]. 广东农业科学,2009,36(11):82-85.

[18]李美蓉,杨秀珍,庄小锋. 磷营养水平对新几内亚凤仙根系生长发育及养分吸收影响的研究[J]. 广东农业科学,2012,39(12):73-76.

[19]板野新夫,甘扬声. 转化土壤中不溶性有机磷和无机磷化合物为可溶性磷酸盐的细菌——I. 细菌的分离和鉴定[J]. 土壤学报,1955(2):91-95.

[20]李进,段婷婷,郑超,等. 不同供磷水平下2个甘蔗品种的光合作用及生长特征[J]. 热带作物学报,2019,40(6):1108-1114.

[21]郭延平,陈屏昭,张良诚,等. 不同供磷水平对温州蜜柑叶片光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):59-64.

[22]陈根云,陈娟,许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学报,2010,46(1):64-66.

[23]李常英,张金凤,丁美丽,等. 遮光强度对小麦叶片光合特性及生理代谢特征的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2019(6):1-7.

[24]任宜百,刘景巍,唐晓杰,等. 紫杉叶片结构与水分蒸腾速率初步研究[J]. 吉林林业科技,2018,47(2):7-10.

[25]罗永忠,成自勇. 水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J]. 草地学报,2011,19(2):215-221.

[26]王晶,邱尚志,杨青霄,等. 水分胁迫下新西伯利亚银白杨光合能力变化[J]. 森林工程,2014,30(2):1-5.

[27]Hirohumi S, Kounosuke F, Shoitsu O. Effect of phosphorus on drought tolerance in *Chloris gayana* K. and *Coix lacryma-jobi* L [J]. Soil Science & Plant Nutrition,1990,36(2):267-274.

[28]胡启立. 太行山南麓荆条灌木对土壤养分异质性适应特征研究[D]. 郑州:河南农业大学,2019.

(编辑:李甜江)