

磷肥对结缕草生长及生理特性的影响

陈忠林, 何月, 李悦, 徐苏男, 张利红

辽宁大学环境学院, 沈阳 110036

摘要 追肥是草坪管理的一个重要环节,为探讨草坪草生长期间是否需要追施磷肥及合理施肥量,采用盆栽生长期追施磷肥的方法,研究不同磷肥用量(0、30和60kg/hm² P₂O₅)对结缕草生长及生理特性的影响。结果表明,30和60kg/hm²的磷肥均能使结缕草地上及地下生物量增加;30kg/hm²的磷肥提高了结缕草叶片可溶性蛋白质、可溶性糖及脯氨酸含量,而施用60kg/hm²磷肥则降低了可溶性蛋白质、可溶性糖及脯氨酸的含量;施用30和60kg/hm²的磷肥均使结缕草叶片叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、最大光量子效率及表观光电子传递效率提高,但降低了水分利用率。生长期施用磷肥能促进结缕草的生长发育,提高草坪质量。其中施肥量为30kg/hm²时结缕草各项指标均优于60kg/hm²处理的。

关键词 结缕草;磷肥;生理特性;光合作用;叶绿素荧光

中图分类号 Q945.16

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.18.011

Effects of Different Dosage Phosphatic Fertilizer on Growth and Physiological Characteristics of Zoysiagrass (*Zoysia japonica*)

CHEN Zhonglin, HE Yue, LI Yue, XU Sunan, ZHANG Lihong

College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China

Abstract Topdressing is an important link in the turfgrass management. The method of pot culture is used in order to investigate whether or not phosphatic fertilizer is necessary and the proper application rate of the fertilizer during the period of plant growth. The study is carried out to examine the effects of different dosages phosphatic fertilizer (0, 30kg/hm², and 60kg/hm² P₂O₅) on the growth and photosynthetic attributes of zoysiagrass (*Zoysia japonica*). The results show that treatments of 30g/hm² and 60g/hm² P₂O₅ significantly increase the above and under ground biomass of zoysiagrass compared with controls. 30kg/hm² P₂O₅ treatment increases the contents of soluble protein, soluble sugar, and praline of zoysiagrass leaves, while 60kg/hm² P₂O₅ treatment decreases the content. Treatments of 30 kg/hm² and 60kg/hm² P₂O₅ enhance chlorophyll contents, net photosynthetic rate, stomatal conduction, transpiration rate, maximum photo quantum efficiency, and the electron transfer rate compared with controls, however decrease water use efficiency. During growth period, phosphatic fertilizer promotes the growth and development of zoysiagrass, improving the turfgrass quality of zoysiagrass. Every indicator of 30kg/hm² dosage phosphatic fertilizer is better than that of 60kg/hm² dosage phosphatic fertilizer.

Keywords zoysiagrass; phosphatic fertilizer; physiology; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

0 引言

磷是草坪草生长发育需要量最多的元素之一^[1],其在草坪的新陈代谢中起能量储存和传递作用,可以促进草坪草根生长,同时能够提高草坪草的抗寒、抗旱及抗病能力^[2]。磷能促进草坪草分蘖并提高叶绿素含量,磷素缺乏草坪草生长滞缓^[3],可见磷元素对草坪草生长具有十分重要的作用。

目前,草坪管理存在误区,认为磷肥一般作为基肥,只在草坪建植前施入土壤,后期不施肥或只需施用氮肥。由于多数草坪草是多年生植物,在后期生长过程中,草坪需要经常进行修剪和灌溉,导致土壤肥力不断地流失,加之土壤对磷的强烈化学固定作用,造成土壤中磷缺乏而不能满足草坪草的生长需求^[4]。合理施肥可为草坪草持续提供所需的营养成

收稿日期:2013-01-22;修回日期:2013-03-13

基金资助:国家自然科学基金面上项目(31070285,31270369);辽宁大学环境科学重点学科、辽宁省高校污染控制与环境修复重点实验室及辽宁省水环境生物监测与水生态安全重点实验室联合基金项目

作者简介:陈忠林,高级实验师,研究方向为生物技术及污染生态,电子信箱:chenzhonglin1969@163.com;张利红(通信作者),教授,研究方向为生物技术及污染生态,电子信箱:lihongzhang132@163.com

分,不当的施肥不仅对草坪草生长效果不明显,还会造成资源浪费及环境污染等问题^[5]。因此,科学施肥已成为草坪管理中急需解决的重大课题。已有研究表明,在草坪草后期生长过程中,施用磷肥对其生长及草坪质量有显著的影响^[6,7],这些研究主要集中于草坪生长指标的变化,且研究结果也存在一定的差异。李小坤等^[8]报道了施用磷肥能够明显提高黑麦草的产量;赵玉靖^[9]的研究表明施用磷肥对野牛草的生长没有显著影响。可见磷肥对草坪草的作用还不够清晰,有待加强研究力度。本文通过研究施加不同量磷肥对结缕草生长、生理指标、荧光特性的影响,探索追施磷肥在草坪草后期生长过程中的作用及合理的磷肥施用量,为结缕草草坪的科学管理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤及草种

供试土壤类型为沙壤土,采自辽宁大学生态试验园。理化性质: pH6.75, 有机质 19.98g/kg, 阳离子交换容量(CEC) 17.24cmol/kg, 全氮 1.03g/kg, 全磷 0.4g/kg, 全钾 13.3g/kg, 碱解氮 60.2mg/kg, 有效磷 7.1mg/kg, 有效钾 68.34mg/kg。

供试结缕草(*Zoysia japonica*)种子由辽宁省岫岩县草原站提供,于2000年在辽宁大学院内播种,建植了近1hm²的结缕草草坪。

1.2 试验方法

试验用土过2mm筛后装入塑料花盆(直径13cm、高度10cm),每盆装土1kg,压实后距盆沿2cm左右。2011年6月从结缕草草坪(2000年播种建植)中选取一块密度及盖度均匀一致的草坪作草皮,分别截取面积为5cm×5cm的草皮块移植到花盆中(每盆栽1块),将盆栽的结缕草置于辽宁大学生态试验园内(123°24'E,41°31'N)。常规养护管理,使草坪当年正常生长并顺利越冬。2012年5月20日草坪返青(第二片叶展开)后进行施肥处理,磷肥采用Ca(H₂PO₄)₂,按纯P₂O₅计,设3个施肥处理(0、30和60kg/hm²),以0处理为对照(CK),各处理重复5次。

1.3 测定方法

1.3.1 生长及生理指标测定

施肥后10d开始测定各个项目。地上生物量的获取是紧贴地表剪下草坪草的地上部分;地下生物量的获取是将花盆毁坏,用大量清水冲洗掉泥土再用去离子水冲洗2遍,并用滤纸吸干根系表面水分。烘干称重法测定鲜重和干重,茚三酮比色法测定脯氨酸含量^[10],考马斯亮蓝G250染色法测定可溶性蛋白质含量^[11],蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[11],乙醇丙酮混合液法测定叶绿素含量^[12]。

1.3.2 光合指标测定

采用LI-6400光合测定仪测定净光合速率、气孔导度及蒸腾速率。光合测定仪的流速均设定为500μmol/s,光强800μmol/(m²·s)。

1.3.3 叶绿素荧光诱导动力学参数测定

采用LI-6400光合测定仪测定,叶片暗处理30min后,测量初始荧光、最大荧光以及最大光量子效率;叶片在自然光下活化30min,测定表观光电子传递效率。

1.4 数据统计分析

试验数据统计分析采用SPSS 17.0软件,用ANOVA(analysis of variance,LSD检验法)进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 磷肥用量对结缕草生长的影响

施用磷肥可以显著提高结缕草地上及地下部的鲜重及干重(表1)。30和60kg/hm²磷肥处理的结缕草地上干重分别比CK增加38%和17%,地下干重分别增加49%和38%,说明施用磷肥对结缕草生长具有显著的促进作用,且这种促进作用对根系的影响大于对地上部分的影响。60kg/hm²磷肥处理的结缕草生物量虽然高于CK,但低于30kg/hm²磷肥处理且达到显著水平($P<0.05$)。说明结缕草对磷肥的用量有一定的限度,过量磷肥可对草坪生长产生抑制作用。

表1 磷肥用量对结缕草生长的影响

Table 1 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the growth of zoysiagrass

施肥量/ (kg·hm ⁻²)	地上生物		地下生物	
	鲜重/ (g·plant ⁻¹)	干重/ (g·plant ⁻¹)	鲜重/ (g·plant ⁻¹)	干重/ (g·plant ⁻¹)
CK	3.36 ^c	1.21 ^c	6.95 ^c	2.67 ^c
30	4.09 ^a	1.67 ^a	9.34 ^a	3.99 ^a
60	3.58 ^b	1.41 ^b	8.35 ^b	3.69 ^b

注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences at level of 0.05, the same below.

2.2 磷肥用量对结缕草叶绿素含量的影响

施用磷肥10d后,结缕草叶片叶绿素含量均增加,与60kg/hm²磷肥处理相比,30kg/hm²磷肥处理较CK增加明显(图1)。30kg/hm²磷肥处理的叶绿素a及a+b含量与60kg/hm²

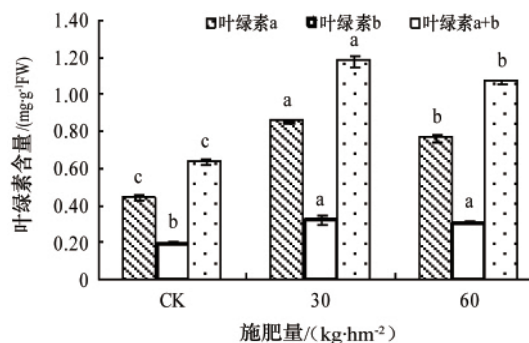


图1 磷肥用量对结缕草叶片叶绿素含量的影响
Fig. 1 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the chlorophyll content of zoysiagrass

磷肥处理的差异达到显著水平。说明过多的磷肥对叶绿素的合成产生一定的抑制作用。

2.3 磷肥用量对结缕草叶片可溶性蛋白质含量的影响

由图 2 可知,与 CK 相比,30kg/hm² 磷肥处理的叶片可溶性蛋白质含量升高,60kg/hm² 磷肥处理的含量降低。30 和 60kg/hm² 磷肥处理的结缕草叶片可溶性蛋白质含量分别为 CK 的 114%和 86%,表明在一定施磷量范围内,施用磷肥有利于结缕草可溶性蛋白质的积累。

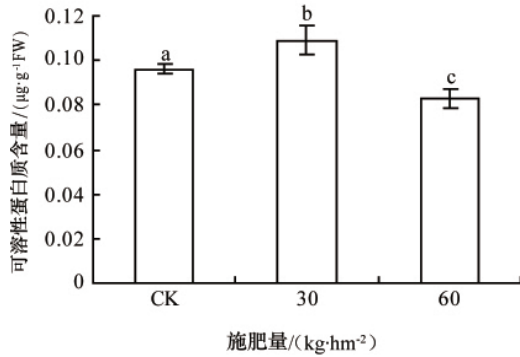


图 2 磷肥用量对结缕草叶片可溶性蛋白质含量的影响
Fig. 2 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the soluble protein content of zoysiagrass

2.4 磷肥用量对结缕草叶片可溶性糖含量的影响

不同磷肥施用量对结缕草叶片中可溶性糖含量的影响效果不同(图 3),与 CK 相比,30kg/hm² 磷肥处理增加了可溶性糖含量,60kg/hm² 磷肥处理降低了可溶性糖含量。30 和 60kg/hm² 磷肥处理可溶性糖量分别为 CK 的 284%和 56%,说明磷肥对结缕草叶片可溶性糖的积累具有显著影响。

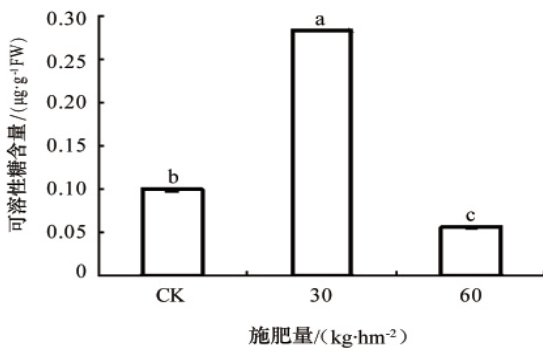


图 3 磷肥用量对结缕草叶片可溶性糖含量的影响
Fig. 3 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the soluble sugar content of zoysiagrass

2.5 磷肥用量对结缕草叶片脯氨酸含量的影响

与可溶性糖含量的变化相似,施用磷肥可对结缕草叶片脯氨酸含量产生显著影响(图 4)。30 和 60kg/hm² 磷肥处理的结缕草叶片脯氨酸含量分别为 CK 的 114%和 36%。

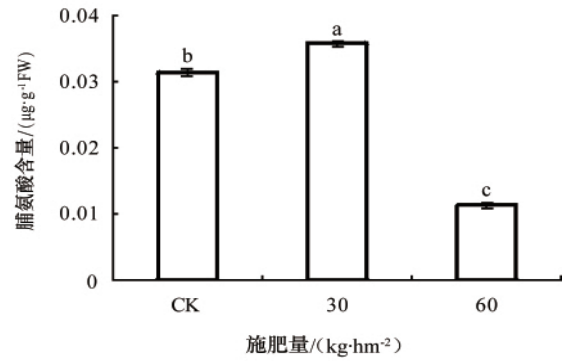


图 4 磷肥用量对结缕草叶片脯氨酸含量的影响
Fig. 4 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the proline content of zoysiagrass

2.6 磷肥用量对结缕草叶片光合指标的影响

由图 5~图 7 可知,施用 30 和 60kg/hm² 磷肥处理的叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著高于 CK,且 30kg/hm² 磷肥处理的高于 60kg/hm² 磷肥处理的,说明在一定施磷量范围内,施磷量增大,气孔导度增大,有利于植物体与外界环境的水、气交换,促进叶片光合作用;但当磷过量时,气孔导度降低,导致蒸腾速率降低,光合作用受到抑制。从图 8 可以看出,两种处理结缕草水分利用率的变化均显著低于 CK,且用 60kg/hm² 磷肥处理的较 30kg/hm² 磷肥处理的高。

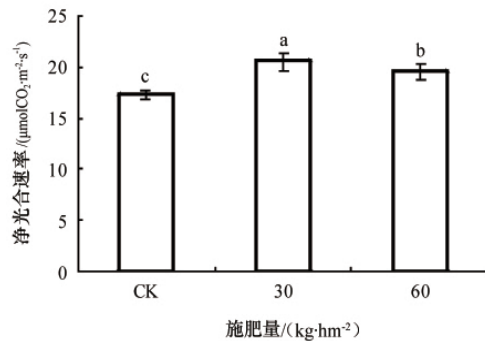


图 5 磷肥用量对结缕草净光合速率的影响
Fig. 5 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the net photosynthetic rate of zoysiagrass

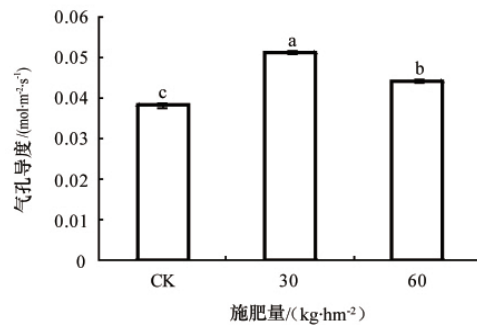


图 6 磷肥用量对结缕草气孔导度的影响
Fig. 6 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the stomatal conduction of zoysiagrass

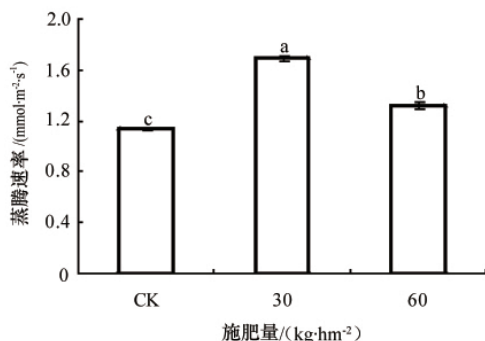


图7 磷肥用量对结缕草蒸腾速率的影响

Fig. 7 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the transpiration rate of zoysiagrass

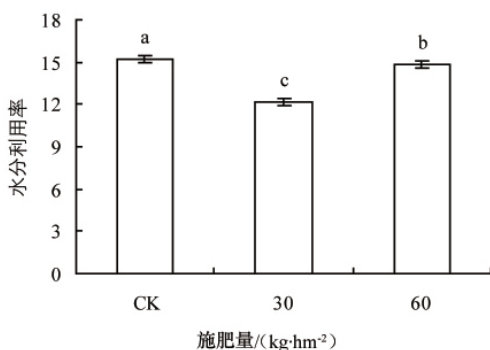


图8 磷肥用量对结缕草水分利用率的影响

Fig. 8 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the water use efficiency of zoysiagrass

2.7 磷肥用量对结缕草荧光特性的影响

用30和60kg/hm²磷肥处理的结缕草叶片的叶绿素荧光参数最大光量子效率(图9)和表观光电子传递效率(图10)与CK相比均有所升高,最大光量子效率比CK分别提高9%和6%,表观光电子传递效率比CK分别提高4%和3%,但30与60kg/hm²磷肥处理之间两参数差异均不显著。

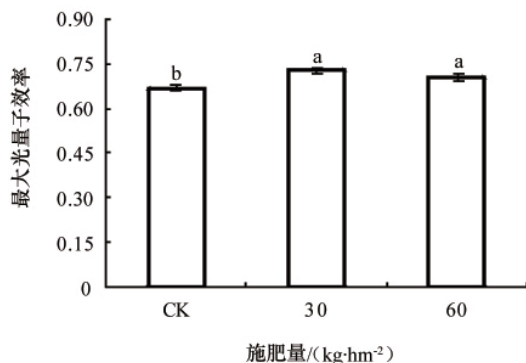


图9 磷肥用量对结缕草最大光量子效率的影响

Fig. 9 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the maximum phot quantum efficiency of zoysiagrass

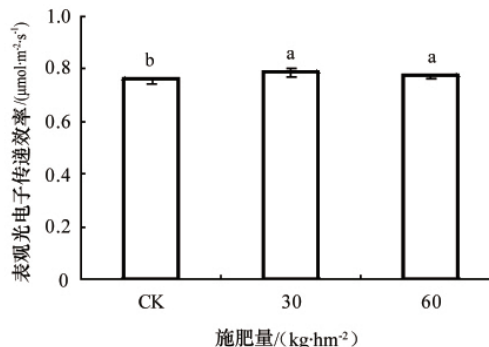


图10 磷肥用量对结缕草表观光电子传递效率的影响

Fig. 10 Effects of different dosages phosphatic fertilizer on the photo electron transfer rate of zoysiagrass

3 讨论与结论

用30和60kg/hm²磷肥处理结缕草均可提高其地上及地下干物质的积累量,但用60kg/hm²磷肥处理的结缕草生物量低于用30kg/hm²处理的,这可能是由于磷是RuBP羧化酶的一个竞争性抑制剂,使植株生长缓慢^[3]。两种处理对结缕草抗逆性产生不同的影响,30kg/hm²磷肥处理的结缕草叶片可溶性蛋白质、可溶性糖及脯氨酸含量均显著高于CK,60kg/hm²磷肥处理的却均低于CK,表明土壤中磷元素的营养水平过高或过低都会对植物的生理活动与生长发育产生影响^[3]。适量施用磷肥,能使植物叶片的磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)活性升高,提高叶片合成C₄氨基酸的能力,为促进蛋白质合成提供原料^[4];而过量的磷肥降低了蛋白质合成关键酶的活性,造成叶片可溶性蛋白质含量降低。30kg/hm²磷肥处理能够极显著提高结缕草叶片可溶性糖含量,这归结于磷元素积极参与植物体内碳水化合物代谢,且磷酸是许多大分子结构物质的桥键物,叶片中碳水化合物及可溶性糖的运输均受磷的控制^[5]。磷过量会对植物产生毒害作用,不同植物对过量磷毒害的耐性存在差异,磷毒害初期,植物会启动应答磷过量的防御机制,使可溶性糖积累增加,但随着毒害时间的延长,超过了植株的耐受程度,蔗糖磷酸合成酶(sps)等活性降低,可溶性糖的合成受到阻碍^[6]。适量的磷肥可抑制脯氨酸的氧化,加强脯氨酸合成的反馈抑制作用,保证叶片脯氨酸向植物其他器官组织的运输,但过量磷肥促进了脯氨酸的这种氧化作用^[7],导致脯氨酸含量降低。

叶绿素的生物合成起始由谷氨酸合成5-氨基乙酰丙酸(ALA),在胆色素原(PBG)合成酶催化下,2个分子的ALA合成PBG,4个分子的PBG构成一个protoporphyrin IX的环状结构,形成叶绿素的基本骨架^[8]。在叶绿素生物合成过程中,ALA合成速率和PBG合成酶活性对叶片叶绿素含量的影响较大^[9]。本研究表明,用30和60kg/hm²磷肥处理的结缕草叶片叶绿素含量升高,用60kg/hm²磷肥处理的叶绿素含量低于30kg/hm²。其原因是土壤中磷浓度对植物叶片中ALA合成速率具有重要影响,适量浓度能显著提高ALA合成速度,但磷浓度过高或过低其合成速率均下降,PBG合成酶活性对磷浓

度的反应也呈现相同的变化趋势^[20]。

研究表明适量增施磷肥能提高水稻剑叶净光合速率,但超过最适值,随磷素营养水平的增加,净光合速率开始降低^[21]。本研究表明,施用磷肥可以提高结缕草叶片气孔导度、蒸腾速率、最大光量子效率、表观光电子传递效率,并使结缕草净光合速率提高。从最大光量子效率及表观光电子传递效率看,30和60kg/hm²磷肥处理之间差异不显著,而60kg/hm²磷肥处理后叶片的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率均低于30kg/hm²,推测随着施磷量的增加,净光合速率下降的主要原因是气孔导度降低,使蒸腾速率降低,而不是通过降低最大光量子效率及表观光电子传递效率。Keller^[22]及Masuda等^[19]的研究也表明,在一定范围内植物的净光合速率和气孔导度随着施磷量的增加而提高,超过一定阈值后不增反降,这与本试验结果一致。磷过量造成结缕草叶片净光合速率降低,还可能与叶片中Rubisco含量有关。因为氮和磷在植物生理过程中具有协同作用,当磷胁迫或磷过量时氮的同化受到明显限制,植物叶片内可溶性蛋白含量下降,减少氮向Rubisco的分配,导致Rubisco含量不足,影响光合作用^[23]。

综上所述,结缕草对土壤磷营养水平需求有一定的限量,适量的磷肥能够促进结缕草的生长发育,磷不足或磷过量会对植株生理活动产生一定程度的负面影响。因此,在土壤磷不足的情况下,建议结缕草草坪磷肥的单次施肥量控制在20~40kg/hm²范围内。

参考文献 (References)

- [1] 钟秀娟, 张巨明. 水肥对草坪草影响的研究进展 [J]. 生态科学, 2008, 27(4): 277-282.
Zhong Xiujian, Zhang Juming. Ecological Science, 2008, 27(4): 277-282.
- [2] 徐艳丽, 鲁剑巍, 周世力, 等. 氮磷钾肥对高羊茅生长及抗寒性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1173-1177.
Xu Yanli, Lu Jianwei, Zhou Shili, et al. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1173-1177.
- [3] 周世力. 磷肥用量对高羊茅生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(14): 4247-4248.
Zhou Shili. Journal of Anhui Agriculture Science, 2007, 35(14): 4247-4248.
- [4] 马祥庆, 梁霞. 植物高效利用磷机制的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 712-716.
Ma Xiangqing, Liang Xia. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 712-716.
- [5] 陈琼贤, 吕业成, 万云巧, 等. 菜心土壤速效磷丰缺指标及合理施磷量研究 [J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(2): 5-8.
Chen Qiongqian, Lü Yecheng, Wan Yunqiao, et al. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(2): 5-8.
- [6] 边秀举, 胡林, 张福锁, 等. 不同施肥时期对草坪草生长及草坪质量的影响 [J]. 草原与草坪, 2002(1): 22-26.
Bian Xiujia, Hu Lin, Zhang Fusu, et al. Grassland and Turf, 2002(1): 22-26.
- [7] 张如莲, 黄承和, 白昌军. 施肥对杂交结缕草成坪期草坪质量综合评价 [J]. 热带作物学报, 2003(4): 74-80.
Zhang Rulian, Huang Chenghe, Bai Changjun. Chinese Journal of Tropical Crops, 2003(4): 74-80.
- [8] 李小坤, 鲁剑巍, 鲁君明, 等. 磷肥用量对黑麦草产量及经济效益的影响 [J]. 草业科学, 2006, 23(10): 18-22.
Li Xiaokun, Lu Jianwei, Lu Junming, et al. Pratacultural Science, 2006, 23(10): 18-22.
- [9] 赵玉靖, 卢凤刚, 钱稷, 等. 施肥对野牛草生长及叶片叶绿素含量的影响 [J]. 河北林果研究, 2009, 24(2): 200-202.
Zhao Yujing, Lu Fenggang, Qian Ji, et al. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2009, 24(2): 200-202.
- [10] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 155-157.
Chen Jianxun, Wang Xiaofeng. Laboratory guide for plant physiology [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 155-157.
- [11] 郝建军, 刘延吉. 植物生理学实验技术 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001: 75-77, 109.
Hao Jianjun, Liu Yanji. Experimental Techniques of Plant Physiology [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001: 75-77, 109.
- [12] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 268-270.
Zhang Zhiliang, Qu Weijing. Experimental Guide of Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 268-270.
- [13] 郭彦荣, 陈芳清, 郗光武, 等. 铺地榕对不同土壤磷营养水平的生理生态学响应 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1908-1913.
Guo Yanrong, Chen Fangqing, Qie Guangwu, et al. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1908-1913.
- [14] 唐湘如, 余铁桥. 磷钾肥对饲用稻产量和蛋白质含量的影响及其机理研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 372-377.
Tang Xiangru, Yu Tieqiao. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(4): 372-377.
- [15] 李姣红, 张崇玉, 罗光琼. 氮磷钾配施对白芨产量和多糖的影响 [J]. 中草药, 2009, 40(11): 1803-1805.
Li Jiaohong, Zhang Chongyu, Luo Guangqiong. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2009, 40(11): 1803-1805.
- [16] 康云艳, 冯新富, 杨暹. 过量磷对菜心植株生长和产量及品质的影响 [J]. 北方园艺, 2011(15): 70-72.
Kang Yunyan, Feng Xinfu, Yang Xian. Northern Horticulture, 2011(15): 70-72.
- [17] 王贺正, 陈明灿, 贺文闯, 等. 磷钾对小麦幼苗抗寒性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 141-145.
Wang Hezheng, Chen Mingcan, He Wenchuang, et al. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(1): 141-145.
- [18] Malkin R, Niyogi K. Photosynthesis [M]// Biochemistry and Molecular Biology of Plants. Hoboken America: John Wiley & Sons, 2000: 568-628.
- [19] 吴楚, 范志强, 王政权. 磷胁迫对水曲柳幼苗叶绿素合成、光合作用和生物量分配格局的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 935-940.
Wu Chu, Fan Zhiqiang, Wang Zhengquan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 935-940.
- [20] 赵海波, 林琪, 孙旭生, 等. 氮磷配施对燕麦 22 花后光合特性及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4): 663-667.
Zhao Haibo, Lin Qi, Sun Xusheng, et al. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(4): 663-667.
- [21] Keller T. Gaseous exchange of forest trees in relation to some edaphic factors [J]. Photosynthetica, 1972, 6(2): 197-206.
- [22] Masuda T, Takabe K, Ohta H, et al. Enzymatic activities for the synthesis of chlorophyll in pigment-deficient variegated leaves of *Euonymus japonicus* [J]. Plant Cell Physiology, 1996, 37(4): 481-487.
- [23] Warren C R, Adams M A. Phosphorus affects growth and partitioning of nitrogen to Rubisco in *Pinus pinaster* [J]. Tree Physiology, 2002, 22(1): 11-19.

(责任编辑 王媛媛)