

不同磷水平对红壤溶液中锰、铝、镁和钙浓度变化 以及小麦生长的影响^①

邵继锋^{1,2}, 陈荣府¹, 董晓英¹, 沈仁芳^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了探明不同磷水平对红壤中土壤溶液主要金属离子变化的影响以及小麦对磷的响应, 确定红壤中小麦适宜的施磷水平, 采用原位提取土壤溶液和比较生物量的方法, 监测了短期内红壤溶液中主要金属离子浓度变化及小麦生物量的变化。结果表明: 碳酸钙的加入可以显著升高酸性红壤的 pH, 土壤溶液中铝、锰和镁浓度显著低于未加碳酸钙处理; 800 mg/kg 磷处理后铝、锰、镁和钙的浓度要比未加磷处理分别至少降低 47%、44%、37% 和 33%。随着施磷量的增加, 小麦在 200 mg/kg 磷处理时积累的生物量最大, 随后磷增加, 小麦生物量反而降低。而加碳酸钙处理小麦地下部生物量随着施磷量增加则降低。结果表明碳酸钙不仅可以有效升高土壤 pH, 降低土壤溶液铝浓度, 还降低土壤溶液中锰的浓度。磷的加入同样可以降低锰和铝的浓度, 缓解铝和锰毒害。红壤中生长小麦的适宜施磷量为 200 mg/kg。

关键词: 磷; 红壤; 小麦

中图分类号: S512.1

全世界酸性土壤有 39.5 亿 hm^2 , 其中可耕种面积为 1.79 亿 hm^2 , 主要分布在热带、亚热带及温带地区^[1]。我国酸性土壤遍及南方 15 个省区, 总面积为 2 030 万 hm^2 , 约占全国土地面积的 21%^[2]。研究表明, 中国南方红壤及砖红壤养分退化明显, 以磷素退化最为严重^[3]。由于酸性土壤中铁、铝活性高, 与磷形成难溶性的铁磷和铝磷, 甚至有效性更低的闭蓄态磷, 使土壤磷和施入土壤中的肥料磷绝大部分转化为固定态磷, 致使绝大多数的酸性土壤都严重缺磷, 严重影响植物生长期间对磷的吸收利用^[4]。

许多研究表明酸性土壤中, 施磷肥能够改善土壤供磷水平从而增产^[5]。文石林等^[6]发现在红壤中施磷可以显著增加墨西哥玉米的产量。孙清斌等^[7]报道在红壤上施用磷肥可以有效增加胡枝子地上部生物量积累。在油茶中发现施磷不仅可以缓解铝毒害, 增加生物量, 同时对油茶光合作用影响很大^[8]。

由于酸性土壤溶液中铝、锰等离子浓度较高, 植物生长在受到铝毒害等抑制因子影响的同时, 土壤中离子间相互作用也强烈地影响着植物的生长。如通过影响土壤中化学平衡影响离子的活度, 影响土壤中离

子的扩散速率以及通过对根膜吸附位点的竞争影响离子的吸收与解析等^[9]。那么磷施入对红壤土壤溶液中主要金属离子(锰、铝、镁、钙)的影响如何? 植物对磷的施入有何响应? 这些研究有助于我们判断红壤中适宜的施磷水平。小麦是对酸铝相对较敏感的植物, 在酸性土壤区有一定的种植面积^[10]。本文以小麦为试验材料, 通过红壤的盆栽试验, 研究不同施磷水平对红壤土壤溶液中锰、铝、镁、钙浓度的变化以及植物对磷、铝的响应, 为在红壤中施磷提供相应的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤: 采自江西鹰潭的第四纪红黏土发育的红壤, 所取土壤经风干并全部过 2 mm 筛后混匀, 待用。其基础理化性质: 体积质量 1.34 g/cm^3 , pH 4.40, EC 值 $33.73 \mu\text{S/cm}$, 有机质 11.38 g/kg , 全氮 0.98 g/kg , 碱解氮 67.09 mg/kg , 有效磷 0.21 mg/kg , 速效钾 32.49 mg/kg , 交换性铝 320.78 mg/kg , 交换性锰 5.56 mg/kg , 交换性钙 125.63 mg/kg , 交换性镁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB441002)和国家杰出青年科学基金项目(41025005)资助。

* 通讯作者(rfshen@issas.ac.cn)

作者简介: 邵继锋(1983—), 男, 浙江建德人, 博士研究生, 主要从事植物营养与逆境生理研究。E-mail: brianshao888@gmail.com

36.23 mg/kg。

小麦品种：铝耐受型 Atlas66。

1.2 试验设计和测定方法

1.2.1 试验设计 设置不同磷素 (KH_2PO_4) 水平：0 (P_0)、100 (P_{100})、200 (P_{200})、400 (P_{400})、800 (P_{800}) mg/kg 红壤，加入钾用 KCl 补齐。其中添加或不添加 1.5 g/kg CaCO_3 ，加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.74 g/kg 作为基肥，混匀后装在 1.5 L 盆中。8 粒催芽后的小麦种子直接播于土壤表面，重复 3 盆。在第 4 天剔苗，每盆保留 4 棵苗。小麦在人工气候室内生长。白天 28℃/14 h，夜间 25℃/10 h；光强 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，相对湿度 65%。

1.2.2 原位土壤溶液的收集与元素测定 为更好地检测土壤溶液的变化，将一种非破坏性土壤溶液采集器预先埋置于土壤中^[11]。每隔 4 天用注射器抽取土壤溶液一次，抽出的土壤溶液立即用 pH 计(868, Thermo Orion, USA)测定溶液 pH。土壤溶液中的主要元素包括铝、锰、镁、钙等用 ICP-AES(IRIS-Advantage, Thermo Elemental, MA, USA)测定含量。

1.2.3 生物量测定 试验结束后(32 天)，将植株分为地上部和地下部两部分，先用自来水冲洗然后用蒸馏水冲洗，过 3 遍后，于 105℃ 杀青 30 min，然后 70℃ 烘干后称重。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平对 pH 变化的影响

从图 1 可知，整个试验期间，在前 8 天时间里，土壤溶液 pH 急剧升高，之后 pH 变化趋于稳定。加 CaCO_3 处理 pH 要显著高于未加 CaCO_3 处理。图 1A 可知在没有加 CaCO_3 情况下，不同磷水平处理之间土壤溶液 pH 差异较大，当土壤中加入 800 mg/kg 磷时，pH 最高，并且 pH 有随着施磷量增加而增加的趋势。在加入 CaCO_3 后，不同磷素水平之间土壤溶液 pH 差异不显著。

2.2 不同磷水平对锰变化的影响

锰毒害是酸性土壤中作物生长的限制因子之一^[12]。从图 2 可知，无论土壤是否施 CaCO_3 ，土壤溶液中锰的浓度随着种植时间增加逐渐降低，随着磷素的增加，原位提取的土壤溶液中锰的浓度逐渐降低，说明磷的加入可以降低土壤溶液中锰的活性。图 2A 可知，在没有加 CaCO_3 的情况下，磷素水平 0 mg/kg 时，前 8 天土壤溶液中锰的浓度迅速降低，随种植时间的增加，锰浓度趋于稳定。施磷后，整个生育期锰浓度变化较小，在施磷 800 mg/kg 时，锰浓度显著低于其他施磷处理，而且在整个生育期保持一致。

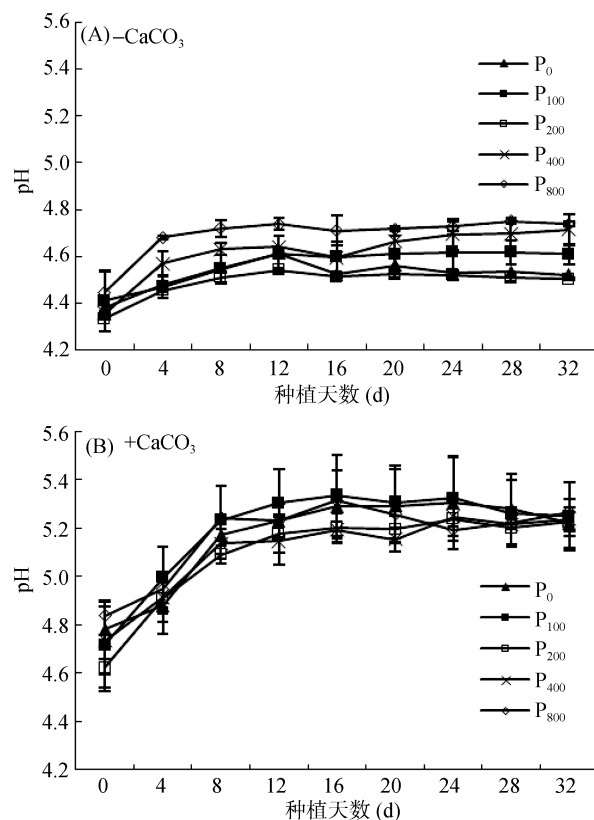


图 1 不同磷水平下种植小麦土壤 pH 变化

Fig. 1 Variations of pH value in different phosphorus rates after wheat planting

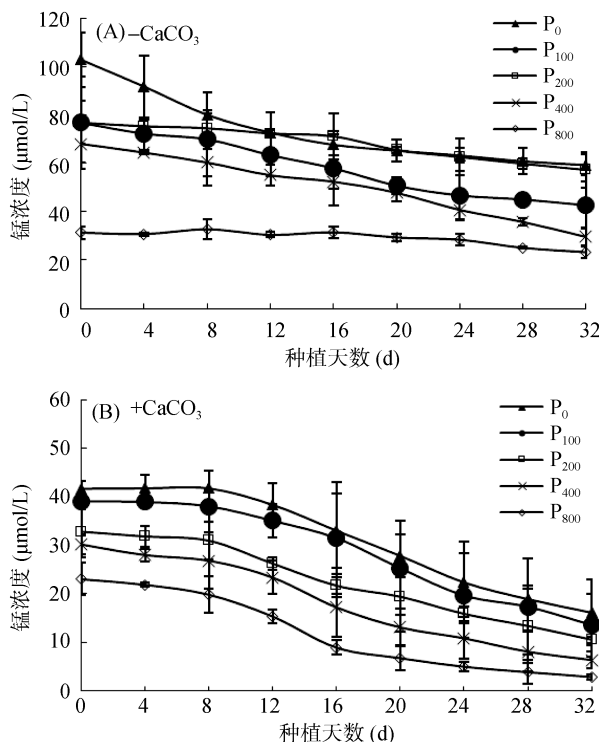


图 2 不同磷水平下种植小麦土壤溶液锰浓度变化

Fig. 2 Variations of Mn concentrations in different phosphorus rates after wheat planting

此结果表明，磷的加入降低了土壤溶液中锰的活性。

施 CaCO_3 显著降低了土壤溶液锰的浓度(图 2B),不同施磷水平间,锰的浓度都随着种植时间增加而逐渐降低。

2.3 不同磷水平对铝变化的影响

图 3 可知,铝在土壤溶液中的变化趋势和锰相似,随着磷的增加溶液中铝的浓度也逐渐降低。示施入磷时(图 3A),种植小麦后的 8 天,铝浓度先快速降低,然后趋于平稳。不同磷水平处理下,小麦种植前后土壤溶液中铝浓度变化变小,当磷水平到达 800 mg/kg 时,铝浓度变化最小。 CaCO_3 的加入可以升高土壤 pH,缓解铝的毒害,由图 3B 可知,加 CaCO_3 后溶液中的铝含量大大降低,同时在 CaCO_3 降低铝活度的前提下,磷的加入同样可以降低铝在土壤溶液中的浓度。

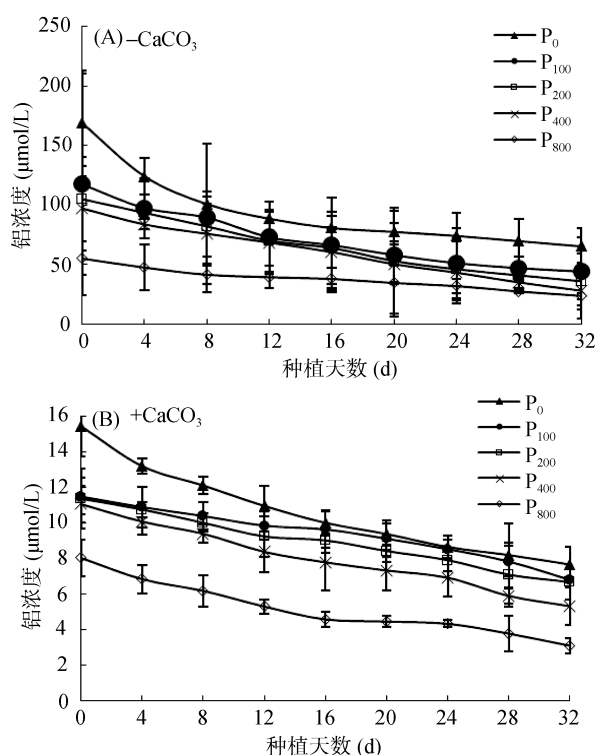


图 3 不同磷水平下种植小麦土壤溶液铝浓度变化

Fig. 3 Variations of Al concentrations in different phosphorus rates after wheat planting

2.4 不同磷水平对镁变化的影响

镁在土壤溶液中浓度的变化趋势和锰、铝相似,随着磷施入的增加溶液中镁的浓度也逐渐降低。 CaCO_3 的加入同样可以降低镁的浓度,同时随着种植时间的增加,浓度逐渐降低。

2.5 不同磷水平对钙变化的影响

在小麦种植前后,相比于铝、锰、镁,土壤溶液中钙浓度变化量最小,但同样钙浓度有随着磷水平的

增加而降低的趋势。 CaCO_3 的加入显著地增加了土壤溶液中钙的浓度(图 5B)。

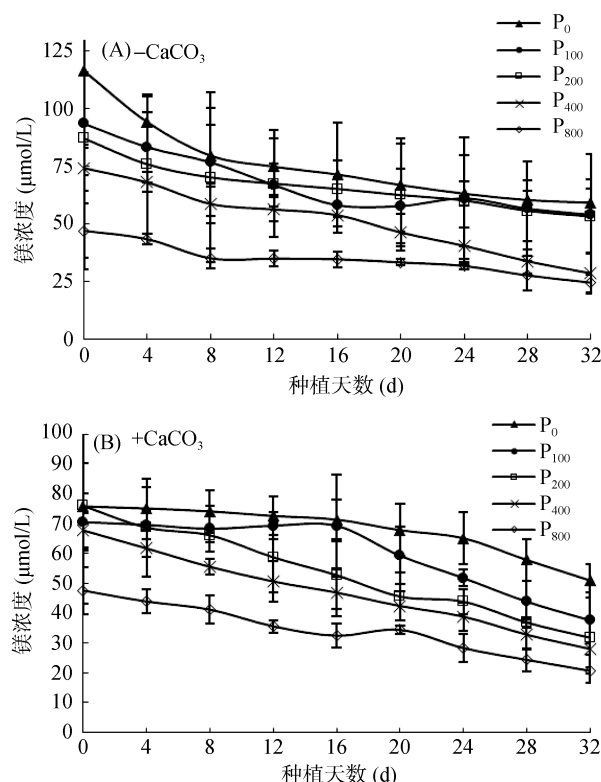


图 4 不同磷水平下种植小麦土壤溶液镁浓度变化

Fig. 4 Variations of Mg concentrations in different phosphorus rates after wheat planting

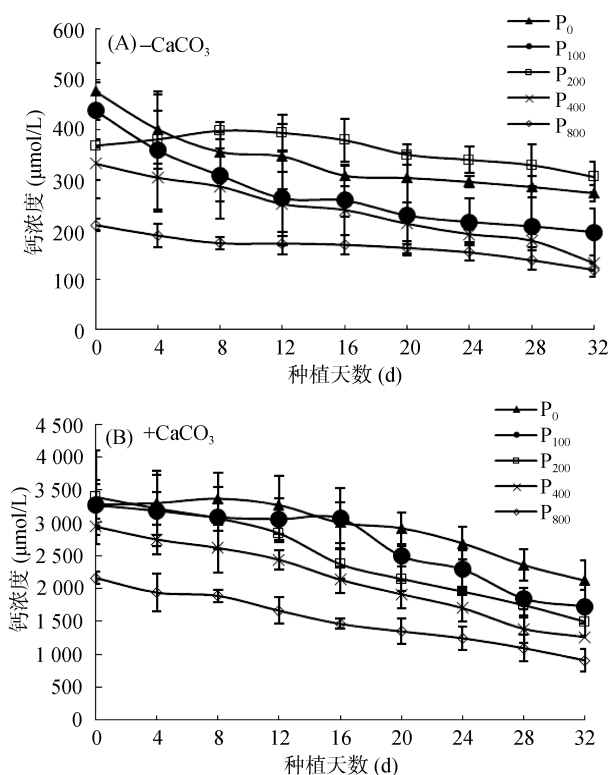


图 5 不同磷水平下种植小麦土壤溶液钙浓度变化

Fig. 5 Variations of Ca concentrations in different phosphorus rates after wheat planting

2.6 小麦生长对不同磷水平的响应

从图 6 可知,在未加 CaCO_3 的情况下(图 6A),小麦地上部生物量随着磷水平的增加而增加,当磷水平达到 400 mg/kg 时,生物量达到最大,随后磷增加小麦地上部生物量降低。小麦地下部生物量对磷的响应和地上部一致。施加 CaCO_3 后,地上部和地下部生物量都要高于未施加 CaCO_3 处理,地上部生物量增加趋势和未加 CaCO_3 处理一致,但是在磷水平 200 mg/kg 时,小麦生物量积累已达峰值,随后磷施入量增加的并未增加地上部生物量的累积(图 6B)。而地下部分生物量不同,随着磷水平的增加,地下部生物量降低(图 6B)。

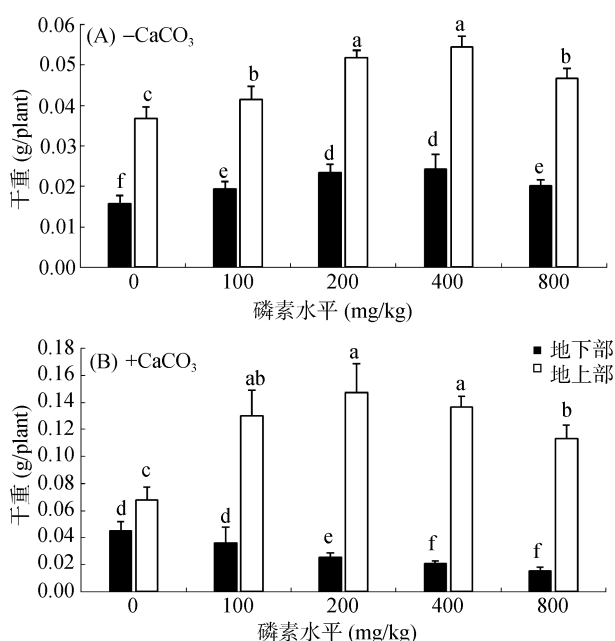


图 6 不同磷水平下小麦生物量变化

Fig. 6 Variations of biomasses in different phosphorus rates

3 结论与讨论

在土壤溶液中,磷的加入降低了锰、铝、镁、钙离子的浓度,而这种作用可能是磷离子在土壤溶液中的无机配体和土壤中其他金属阳离子形成络合物^[13],从而降低其在土壤中的活性。很多研究表明,磷可以降低铝毒害,在本试验中(图 2),随着磷水平的增加,土壤溶液中的铝浓度降低。这和 Sloan 等^[14]以及 Wright 等^[15]的研究结果一致,他们发现随着磷水平的增加,土壤中氯化钙提取的铝浓度降低。同时他们推断加入的磷和铝形成铝磷化合物从而降低了铝的活性。而钙镁等离子同样可以和磷酸根离子形成相应的化合物,从而降低其离子的活性,对于锰的影响相关报道较少。在酸性土壤中施用石灰或者石灰石粉是改良酸性土壤的传统和有效方法,使用石灰可以中和土

壤的活性酸和潜性酸,生成氢氧化物沉淀,消除铝毒,迅速降低酸性土壤的酸度,增加土壤中交换性钙等的质量分数^[16]。本试验中, CaCO_3 施入的情况下,钙离子浓度显著提高,同时磷水平增加同样可以降低土壤溶液中锰、铝、镁的浓度,说明在一定的 pH 范围内,磷同样可以和铝、镁配合从而降低其在土壤中的活性。

土壤中无机磷成分复杂,大致可以分为 3 种形态:水溶态、吸附态和矿物态^[17]。而土壤 pH 直接关系到土壤中无机磷的存在形态,不同磷的存在形态和土壤中其他离子的相互作用,又影响了其他离子在土壤溶液中的有效性和活性。在酸性土壤中由于活性铁、铝对磷的吸附固定作用和沉积作用,可降低土壤无机磷的有效性,相反无机磷的加入又可以降低铁、铝在土壤中的活性。在不同 pH 下,离子的形态以及离子间相互作用不同^[18],本试验中,我们发现土壤 pH 在种植后的 8 天急剧升高,随后趋于稳定。这可能和土壤的氧化还原有关,土壤在淹水还原条件下铁、锰、铝等氧化物被还原,这一过程需要消耗 H^+ ;土壤在落干氧化条件下一些还原性物质又重新被氧化,这一过程会释放 H^+ ,但这两个相反过程并不是完全可逆的^[19]。

根系作为植物吸收矿质元素的主要器官,具有高度的形态可塑性,能够通过修饰自身的根系发育和构型以更好地适应多变的外部环境。在缺磷情况下,植物将更多的碳水化合物分配到根系,促进根系的生长,引起根冠比增大。低磷胁迫不仅增加根系的生物量,而且会引起植物根系形态结构发生显著变化,包括总根、侧根的长度和数目等,以提高根系与土壤的接触面积,提高对土壤磷素的吸收利用效率^[20-21]。本研究中(图 6B),在加入 CaCO_3 情况下,地上部生物量随着磷水平的增加先增后降,而地下部生物量则不同,随着磷水平的增加,地下部生物量降低。这可能是在 CaCO_3 缓解了铝毒害情况下,植物对磷的响应,在缺磷和低磷情况下,根系更加发达积累了更多的生物量,而随着磷水平的增加土壤有效磷含量增加,植物更容易获取磷,根系生物量积累反而降低。

从小麦生物量来看,本研究中无论施 CaCO_3 与否,200 mg/kg 磷水平下,小麦生长就可达到最佳。在不加 CaCO_3 时 200 mg/kg 磷水平下土壤溶液铝含量相对对照降低了 40%,可以有效缓解铝的毒害作用。据此,推断在酸性红壤中,小麦生长较适宜的施磷量为 200 mg/kg,折合 450 kg/hm²。

参考文献：

- [1] Kochian L V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1995, 46: 237–260
- [2] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版, 1987: 391
- [3] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施 I 退化状况评价及酸害纠正措施[J]. 土壤, 2000, 32(4): 198–200
- [4] 周希琴, 吉前华. 铝胁迫对不同玉米品种种子萌发生理生态的影响[J]. 湖北农业科学, 2005(4): 41–45
- [5] 蒋云芳, 储寅芳, 蒋定安. 湖白土水稻高产栽培磷肥施量研究[J]. 江苏农业科学, 1999(2): 46–48
- [6] 文石林, 董春华, 高菊生, 等. 酸性红壤下施磷对墨西哥玉米生长和土壤肥力的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 60–63
- [7] 孙清斌, 董晓英, 沈仁芳. 施用磷、钙对红壤上胡枝子生长和矿质元素含量的影响[J]. 土壤, 2009, 41(2): 206–211
- [8] He G H, Zhang J F, Hu X H, Wu J C. Effect of aluminum toxicity and phosphorus deficiency on the growth and photosynthesis of oil tea (*Camellia oleifera* Abel.) seedlings in acidic red soils[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33: 1 285–1 292
- [9] Ritchie G S P. The chemical behaviour of aluminum hydrogen and manganese in acid soils // Robson A D. Soil acidity and plant growth[M]. Australia: Academic Press, 1989: 1–60
- [10] 林咸永, 章永松, 陶勤南. 不同耐铝的小麦基因型在酸性铝毒土壤的适应性及其与体内养分状况的关系[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2000, 36(6): 636–639
- [11] Yanai J, Araki S, Kyuma K. Use of a looped hollow-fiber sampler as a device for nondestructive soil solution sampling from the heterogeneous root-zone[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1993, 39: 737–743
- [12] Kochian L V, Hoekenga O A, Pineros M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 459–493
- [13] Lindsay W L, Vlek P L G, Chien S H. Phosphate minerals // Dixon J B, Weed S B. Minerals in soil environment, 2 nd edn[M]. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1989: 1 089–1 130
- [14] Sloan J J, Basta N T, Westerman R L. Aluminum transformations and solution equilibria induced by banded phosphorus fertilizer in acid soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59: 357–364
- [15] Wright R.J, Baligar V C, Belesky D P, et al. The effect of phosphate rock dissolution on soil chemical properties and wheat seedling root elongation[J]. Plant and Soil, 1991, 134: 21–30
- [16] 王文军, 郭熙盛, 武际, 等. 施用白云石对酸性黄红壤作物产量及化学性质的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 723–726
- [17] Deb D L, Datya N P. Effect of associating anions on phosphorus retention in soil, under variable anion concentration[J]. Plant and Soil, 1967, 3: 432–444
- [18] 沈兵松, 张鼎华. 酸性土壤无机磷研究进展[J]. 福建林业科技, 2005, 32(1): 75–78
- [19] 朱玉祥, 马良, 朱黎明, 等. 氧化还原条件下有机物料对酸性土壤 pH、铁形态和铜吸附解吸的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 65–68
- [20] Mollier A, Pellerin S J. Maize root system and development as influenced by phosphorus deficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50: 487–497
- [21] 潘相文, 唐才贤, 王光华, 等. 作物耐低磷适应机制研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(4): 434–441

Effects of Different Phosphorus Rates on Variations of Mn, Al, Mg and Ca Concentrations in Soil Solution and Wheat Growth in Acid Red Soil

SHAO Jifeng^{1,2}, CHEN Rongfu¹, DONG Xiaoyin¹, SHEN Renfang^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the effects of different phosphorus rates on the variations of Mn, Al, Mg and Ca concentrations in soil solutions and wheat responses to phosphorus in acid red soil, a pot experiment with a non-destructive soil-solution sampler preinstalled were conducted with increasing phosphorus fertilizer levels from 0 to 800 mg/kg. The results showed that pH was increased while the concentrations of Mn, Al, Mg and Ca in soil solutions were significance lower amended with CaCO₃ than without CaCO₃. Compared to 0 mg/kg phosphorus treatment the concentrations of Al, Mn, Mg and Ca at least decreased 47%, 44%, 37% and 33% after 800 mg/kg phosphorus treatment no matter amended with CaCO₃ or not. Wheat biomass was accumulated highest in 200 mg/kg phosphorus treatment then decreased as phosphorus rates increased. However, the root biomass trended to decline as phosphorus rate increased while the soil was amended with CaCO₃. Those results indicated that CaCO₃ could increase pH and decrease Mn, Al and Mg concentrations in soil solution. At the same time, phosphorus could alleviate Mn and Al toxicities in acid red soils while decrease Mn and Al concentrations in soil solution. 200 mg/kg phosphorus fertilizer was suitable for wheat growth in acid red soil.

Key words: Phosphorus; Red soil; Wheat