

外源柠檬酸对黄土高原塬土土壤养分的影响

张根柱, 张社奇*, 邵 丽, 王 菲, 章兰芬

(西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:为研究黄土高原植被恢复、退耕还林过程中根际分泌的柠檬酸对土壤养分、pH 的影响, 通过对石灰性土壤塬土施用外源柠檬酸, 模拟根际柠檬酸环境。结果表明, 施用外源柠檬酸后: (1) 土壤全氮含量随柠檬酸施用天数的增加大体上有升高的趋势, 土壤水解性氮含量随时间、外源柠檬酸浓度的增加而递减; (2) 土壤全磷含量变化不大; (3) 有效磷含量变化以 40 d 左右为过渡, 前期土样随外源柠檬酸浓度的升高而减少, 后期随柠檬酸升高而增加; (4) 土壤 pH 与有效磷含量的变化规律呈极显著负相关; (5) 有机质含量变化规律复杂。柠檬酸对土壤养分各指标的影响不同, 但相互联系。

关键词: 黄土高原; 植被恢复; 退耕还林; 塬土; 外源柠檬酸; 根际; 土壤养分

中图分类号: S714.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2011)02-0047-05

Effects of Exogenous Citric on Nutrients of Old Manured Loessal Soil

ZHANG Gen-zhu, ZHANG She-qi*, SHAO Li, WANG Fei, ZHANG Lan-fen

(College of Science , Northwest A&F University , Yangling , Shaanxi 712100 , China)

Abstract: In order to study the effect of citric acid excreted by plant roots in the rhizosphere on soil nutrients of Loess Plateau during the processes of plant restoration, and returning farmland to forests or grassland, a simulated experiment was designed by applying citric acid on calcareous old manured loessal soil. The results showed : (1) the contents of total nitrogen generally increased with the application time, the contents of hydrolysable nitrogen decreased both with the time and citric acid concentration; (2) total phosphorus changed slightly; (3) the content of available phosphorus exhibited a 40-day transition period, at the early stage, it decreased with the increase of citric acid concentration, and increased with the increased of citric acid concentration in the late stage; (4) there was a highly significant negative correlation between soil pH and the content of available phosphorus; (5) variations of soil organic matters were complicated. The effects of citric acid on soil nutrients were different but interactive.

Key words: Loess Plateau; plant restoration; conversion of farmland to forest land; old manured loessal soil; exogenous citric acid; rhizosphere; soil nutrient

黄土高原地区植被恢复、退耕还林过程中, 植物根系在改善土壤质量中发挥了重要作用^[1-4], 根系对土壤的改良作用如养分有效性的提高主要是靠根系分泌的低分子量有机酸的作用^[5-6]。目前, 对黄土高

原植被恢复过程中及恢复后的土壤质量演变已有较多研究^[7-8], 针对单一因素柠檬酸对土壤养分影响的研究报道相对较少。本研究通过控制试验条件, 对黄土高原典型的石灰性土壤塬土施用不同浓度不同

收稿日期: 2010-03-02 修回日期: 2010-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(40771109); 陕西省科技攻关项目(2007K01-15-1)。

作者简介: 张根柱, 男, 在读硕士, 主要从事土壤生态与环境生物物理方面研究工作。E-mail: zhanggenzhu043@qq.com

* 通讯作者: 张社奇, 男, 教授, 博士, 主要从事土壤生态与环境生物物理方面的教学与研究。E-mail: zhangsheqi@nwsuaf.edu.cn

天数的外源柠檬酸,模拟植物根系分泌的柠檬酸对土壤养分、pH 的影响,为揭示柠檬酸作用下土壤养分转化,评价柠檬酸对土壤影响效果提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

2009 年 7 月野外采样,采样地点位于黄土高原南部杨陵,在撂荒山坡上用蛇形取样法采集具有代表性的壤土。每个样点采取 20~40 cm 土层土样。土样取回后风干,挑去植物根茎及其他侵入体,研磨、过 2 mm 筛、混匀,装盆,每盆装土样约 1.5 kg,每个土样设 3 个重复。

1.2 方法

模拟试验中配制浓度分别为 0.2、0.5、5.0、10.0、20.0 mmol·L 的柠檬酸溶液^[9],以蒸馏水做为对照溶液,分别对土样进行浇灌培养。试验过程中通过空调来控制环境温度在 25℃,利用湿度计监测环境湿度变化,并通过开窗通风、加湿等方式保持空气湿度在 65 % 基本不变。浇灌时用 75 mm 规格的玻璃三角漏斗,漏斗下端插入土样中部,柠檬酸溶液或对照溶液从漏斗上部缓缓加入,使溶液缓慢渗入土壤。每 2 d 浇土样 1 次,每次浇灌溶液 30 mL,

并于 10、20、30、40、50 d 后测定土样的全氮、水解性氮、全磷、有效磷、有机质含量、土壤 pH。

土壤全氮的测定采用半微量凯氏法—扩散法;土壤水解性氮的测定采用碱解——扩散法;土壤全磷测定采用酸溶——钼锑抗比色法,土壤有效磷的测定采用 NaHCO₃ 浸提——钼锑抗比色法;土壤 pH 测定采用电位测定法;土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾——外加热法^[10]。

试验数据采用 Microsoft Excel 和 SAS 8.0 软件进行统计分析处理。

2 结果与分析

2.1 土壤养分、pH 值之间的相关性分析

表 1 所示,全氮含量与柠檬酸施用时间呈极显著正相关,相关性系数 0.820 98;水解氮、全磷、有效磷含量与柠檬酸施用时间呈极显著负相关,相关性系数分别为-0.717 31、-0.592 50,说明土壤水解氮、全磷、有效磷随时间的变化规律与全氮相反。

全氮与水解氮、全磷之间呈极显著负相关,与有效磷呈显著负相关,相关性系数分别为-0.595 20、-0.523 98、-0.440 41。pH 与有效磷之间呈极显著负相关,相关性系数为-0.619 00。

表 1 不同浓度外源柠檬酸处理 10~50 d 后土壤养分、pH 值之间的相关性系数

Table 1 The correlative coefficient among soil nutrients in four land use patterns

	时间	柠檬酸浓度	全氮	水解氮	全磷	有效磷	有机质	pH
时间	1.000 00							
柠檬酸浓度	0.000 00	1.000 00						
全氮	0.820 98**	0.049 95	1.000 00					
水解氮	-0.717 31**	-0.41 083	-0.595 20**	1.000 00				
全磷	-0.592 50**	0.320 13	-0.523 98**	0.269 26	1.000 00			
有效磷	-0.497 81**	0.011 70	-0.440 41*	0.337 59	0.224 14	1.000 00		
有机质	0.397 47	-0.156 94	0.306 12	-0.147 55	-0.215 94	-0.081 32	1.000 00	
pH	0.280 92	0.217 65	0.235 19	-0.418 01	-0.325 90	-0.619 00**	0.115 26	1.000 00

注: ** 表示 $P<0.01$; * 表示 $P<0.05$ 。

2.2 外源柠檬酸对土壤全氮、水解性氮的影响

从图 1、图 2 可以看出,土壤全氮含量随柠檬酸施用天数的增加大体上有升高的趋势,而土壤水解性氮含量则明显随外源柠檬酸浓度和柠檬酸施用时间的增加而递减。

试验进行至第 8 天时,由于土壤中水分累积,开始有少量土壤浸出液从盆底浸出,受水分淋洗作用,水解性氮淋失显著,对照组水解性氮含量明显减少,表明土壤中可溶性的水解性氮易随水分淋失。

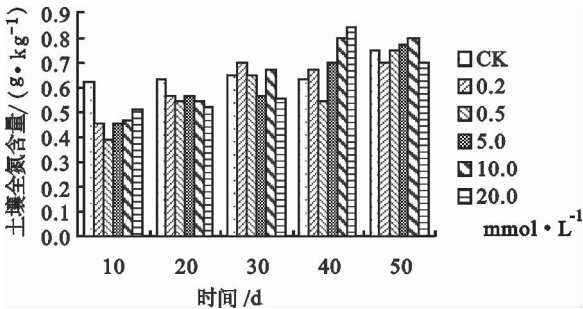


图 1 土壤全氮含量随时间的变化

Fig. 1 Total soil nitrogen contents changes with time

由于土壤中有有机氮(微生物体氮等)占全氮很大比例^[11],有机氮含量的变化显著影响全氮含量。柠檬酸做为碳源加入后,促使土壤中以水解性氮为氮源的微生物活动代谢旺盛,水解氮含量下降,合成的难溶有机态氮增多^[12];也可能柠檬酸对参与有机氮矿化的微生物产生了抑制作用^[13],造成土壤中全氮的增加,水解性氮的减少。

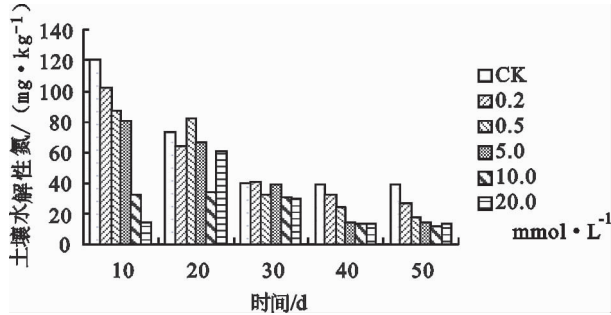


图 2 土壤水解性氮含量随时间的变化

Fig. 2 Soil hydrolyzable nitrogen contents changes with time

2.3 外源柠檬酸对土壤全磷、有效磷、pH 的影响

由图 3 看出,施用柠檬酸后土壤全磷含量变化不大,可能是由于土壤中大量难溶性磷酸盐的存在缓冲了柠檬酸的溶解作用。

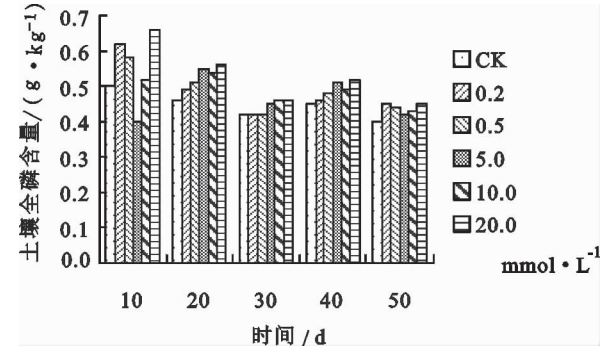


图 3 土壤全磷含量随时间的变化

Fig. 3 Soil total phosphorus contents changes with time

由图 4 可见,以处理 40 d 左右为转折,前期(30 d 前)土样有效磷含量随外源柠檬酸浓度的升高而减少,后期(50 d 后)转变为随柠檬酸升高而增加,土壤中磷的有效性提高。表明外源柠檬酸对土壤磷有效性的提高是长时间作用的结果,因此对于植被恢复这一长期过程,根系不断向根际分泌柠檬酸应该可以提高土壤磷素的有效性^[14],促进植被恢复过程中土壤磷素有效性转化。有研究也表明黄土高原植被恢复过程中有效磷的含量的确有所增加^[15]。

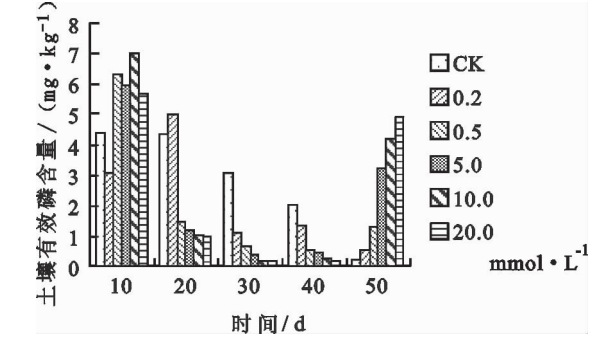


图 4 土壤有效磷含量随时间的变化

Fig. 4 Soil available phosphorus contents changes with time

根据表 1 中 pH 与有效磷之间的极显著负相关关系,由图 5 可以得出,pH 变化规律与有效磷含量变化规律相反。

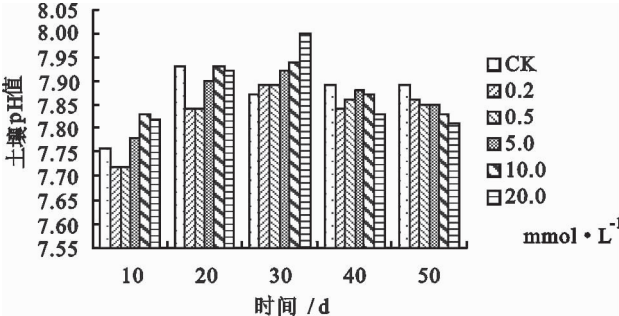


图 5 土壤 pH 值随时间的变化

Fig. 5 Soil pH value changes with time

前期土壤 pH 随时间的增加和柠檬酸浓度的升高而升高,同时有效磷含量下降。后期土壤 pH 下降,同时有效磷含量上升,土壤磷的有效性提高。pH 与有效磷之间具有极显著负相关关系的结果与穆晓慧^[16]等人的研究结果一致。

对于石灰性土壤,P 与 Ca^{2+} 易形成难溶的盐基性磷酸盐,当土壤模拟根际环境施用外源柠檬酸后,柠檬酸解离出的 H^+ 与石灰性土壤中的碳酸钙、磷酸盐等反应, H^+ 浓度减少, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 大量增加^[17-18], Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与可溶性磷酸盐结合形成难溶性钙镁磷酸盐,降低了磷的有效性,有效磷减少,加之土壤的缓冲性能,因此前期 pH 值并未因柠檬酸的加入而下降。试验 50 d 后由于土样中 H^+ 的持续加入,土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 淋溶、减少,难溶的 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 变为可溶性的 $\text{Ca}_2\text{-P}$,有效磷增加, H^+ 浓度升高,pH 下降。吕家珑^[19]等人研究石灰性土壤小麦根际 pH 及磷动态变化时也得出相同结论。

有研究表明植物正是通过调节根系有机酸的分泌、土壤 pH 从而促进对磷、氮的吸收^[20]。

2.4 外源柠檬酸对土壤有机质含量的影响

试验中外源柠檬酸加入后,土壤中的营养环境

发生巨大变动,扰动了原有的微生物活动,有机质含量受到微生物活动碳代谢变动的影响。由图 6 所示,外源柠檬酸处理过程中土壤有机质含量变化规律复杂。另外,受客观试验条件限制,模拟试验周期较短,相当于植被恢复的初期,没有自然环境下植物凋落物的引入,尚未达到土壤有机质的动态平衡,得出的结论与植被恢复过程中随着演替进程的推移土壤有机质含量逐渐增加^[21]这一结论有所不同。

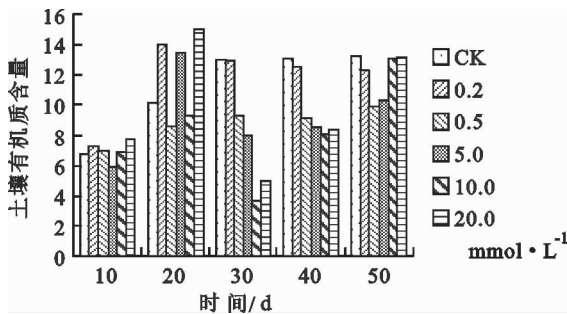


图 6 土壤有机质含量随时间的变化

Fig. 6 Soil organic matter contents changes with time

3 结论与讨论

植被恢复、退耕还林对土壤养分的影响,目前已开展了较多的研究工作,大多数研究所得出的结论一致,即植被恢复能改善土壤肥力状况,植物根系对土壤养分的影响显著。针对石灰性土壤施用外源柠檬酸后土壤养分变化的不同,可以尝试在植被恢复初期,适当地施入速效态氮,以满足初期土壤微生物活跃对速效态氮的需求。同时,由于石灰性土壤中原本存在大量不可直接利用的难溶性磷,而根际有机酸能促进难溶性磷的释放,提高磷的有效性,因此,对一些根系产有机酸能力不强的植物可尝试施加少量有机酸,在不引起土壤 pH 巨大变动的基础上使植物直接从土壤中获得磷源。

石灰性土壤瘠土中施用外源柠檬酸后,土壤全氮有所增加,而水解性氮始终减少。短期内土壤养分状况未得到改善,土壤全磷含量变化较小,有效磷含量在早期减少,后期明显提高,并且有效磷含量的变化规律与土壤 pH 与呈极显著负相关。有机质含量变化规律复杂。

在研究黄土高原退耕还林、植被恢复时,应考虑柠檬酸等低分子量有机酸对土壤的显著影响以及对不同养分影响的差异,有针对性的研究植被恢复过程中土壤养分的影响因素、变化特征及其相互关系。

参考文献:

[1] 马博虎,刘毅,李世清,等. 黄土高原生态环境建设与土壤质量演变[J]. 生态经济, 2007(3):39-46.
MA B H, LIU Y, LI S Q, *et al.* Effect of eco-system environment rebuild in the Loess Plateau on soil quality [J]. Ecological Economy, 2007 (3): 39-46. (in Chinese)

[2] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (2): 50-55.
HAN F P, ZHENG J Y, ZHANG X C. Plant root system distribution and its effect on soil nutrient on slope land converted from farmland in the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 50-55. (in Chinese)

[3] LANDI L, VALOTI F, ASCHER J, *et al.* Root exudate effects on the bacterial communities, CO₂ evolution, nitrogen transformations and ATP content of rhizosphere and bulk soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38 (3): 509-516.

[4] 李鹏,赵忠,李占斌,等. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J]. 西北林学院学报, 2002, 17 (2): 26-32.
LI P, ZHAO Z, LI Z B, *et al.* Advances on the interactional mechanism between root system and eco-environment[J]. Journal of Northwest Forestry University College, 2002, 17 (2): 26-32. (in Chinese)

[5] 丁永祯,李志安,邹碧. 土壤低分子量有机酸及其生态功能[J]. 土壤, 2005, 37 (3): 243-250.
DING Y Z, LI Z A, ZOU B. Low-molecular-weight organic acids and their ecological roles in soil[J]. Soils, 2005, 37 (3): 243-250. (in Chinese)

[6] OBURGERA E, KIRKB G J D, WENZEL W W, *et al.* Interactive effects of organic acids in the rhizosphere[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(3): 449-457.

[7] 温仲明,焦峰,赫晓慧,等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 16-22.
WEN Z M, JIAO F, HE X H, *et al.* Spontaneous succession and its impact on soil nutrient on abandoned farmland in the northern edge of the forest zone on the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16 (1): 16-22. (in Chinese)

[8] 董丽娜,罗文林,韩凤鹏,等. 植被恢复过程中土壤养分的变化[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (15): 6407-6409 .
DONG L N, LUO W L, HAN F P, *et al.* Influence of the vegetation restoration process on nutrient [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36 (15): 6407-6409. (in Chinese)

[9] JONES D L, DENNIS P G, OWEN A G, *et al.* Organic acids behavior in soils-misconceptions and knowledge gaps [J]. Plant Soil, 2003, 248: 31-41.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002. (in Chinese)

[11] 王瑞军,李世清,张兴昌,等. 西北地区不同生态系统几种土壤有机氮组分和微生物体氮的差异[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22 (4): 21-27.

WANG R J, LI S Q, ZHANG X C, *et al.* Difference of soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen under different ecosystem in northwestern China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22 (4): 21-27. (in Chinese)

[12] KHALIDA M, SOLEMAN N, L JONES D L. Grass land plants affect dissolved organic carbon and nitrogen dynamics [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 : 378-381.

[13] 李紫燕, 李世清, 李生秀. 黄土高原典型土壤有机氮矿化过程[J]. *生态学报*, 2008 (10): 4940-4950.

LI Z Y, LI S Q, LI S X. Organic N mineralization in typical soils of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, (10): 4940-4950. (in Chinese)

[14] KHADEMI Z, JONES DL, MALAKOUTI MJ, *et al.* Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47 (2): 213-220.

[15] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17 (4): 38-41.

ZHANG J H, CHANG Q R, JIA K L, *et al.* Effect of plant restoration to soil fertility quality on Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (4): 38-41. (in Chinese)

[16] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (6): 1341-1347.

MU X H, LI S Q, DANG R J. Distribution of phosphorus fractionations in calcareous soils of the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (6): 1341-1347. (in Chinese)

[17] LI Z A, ZOU B X, HAN P, *et al.* Role of low-molecular-weight organic acids and their salts in regulating soil pH [J]. *Pedosphere*, 2008, 18 (2): 137-148.

[18] 陆文龙, 张福锁, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对石灰性土壤磷吸附动力学的影响[J]. *土壤通报*, 1999, 36 (2): 189-196.

LU W L, ZHANG F S, CAO Y P, *et al.* Influence of low-molecular weight organic acids on kinetics of phosphorus adsorption by soils [J]. *Acta Pedology Sinica*, 1999, 36 (2): 189-196. (in Chinese)

[19] 吕家珑, 张一平, 马爱生, 等. 石灰性土壤小麦根际 pH 及磷动态变化的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(1): 32-39.

LV J L, ZHANG Y P, MA A S, *et al.* Dynamic of pH and phosphorus of wheat rhizosphere in calcareous soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5 (1): 32-39. (in Chinese)

[20] WOLFGANG P. Contribution of organic acids to the acidification of the rhizosphere of maize seedlings [J]. *Plant and Soil*, 1991, 132: 159-163.

[21] 杨世琦, 杨正礼. 黄土高原生态系统演替进程中土壤有机质和 pH 值变化规律[J]. *水土保持研究*, 2008, 15 (2): 159-163.

YANG S Q, YANG Z L. The Changes of soil organic matter and pH in the course of ecosystem succession in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15 (2): 159-163. (in Chinese)

(上接第 46 页)

[10] 耿玉清, 余新晓, 孙向阳, 等. 北京八达岭地区油松与灌丛林土壤肥力特征的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29 (2) : 50-54.

GENG Y Q, YU X X, SUN X Y, *et al.* Characteristics of soil fertility under pure *Pinus tabulaeformis* forests and shrubs in Badaling Mountain Area of Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2): 50-54. (in Chinese)

[11] 方海兰, 陈玲, 黄懿珍, 等. 上海新建绿地的土壤质量现状和对策[J]. *林业科学*, 2007, 43(增刊): 89-94.

FANG H L, CHEN L, HUANG Y Z, *et al.* Current situation and strategy for the soil quality of newly-established green belts in Shanghai [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43 (sup.): 89-94. (in Chinese)

[12] 苏立新, 王淑琴, 肖健, 等. 北京市海淀区耕地土壤养分状况研究[J]. *北京农学院学报*, 2005, 20(1): 53-57.

SU L X, WANG S Q, XIAO J, *et al.* Study on the nutrients of arable soil in Haidian district of Beijing [J]. *Journal of Beijing Agriculture College*, 2005, 20(1): 53-57. (in Chinese)

[13] 王磊, 傅桦, 杨伶俐. 北京城区土壤 pH 分布研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2): 398-400.

WANG L, FU H, YANG L L. Distribution of soil pH in Beijing urban area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (2): 398-400. (in Chinese)

[14] JIM C Y. Physical and chemical properties of Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth [J]. *Urban Ecosystems*, 1998, (2): 171-178.

[15] 卓文珊, 唐建锋, 管东生. 城市绿地土壤特性及人类活动的影响[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46 (2): 32-35.

ZHUO W S, TANG J F, CUAN D S. A study on the soil properties of urban green space in Guangzhou and the impact of human activities on them [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyateni*, 2007, 46(2): 32-35. (in Chinese)

[16] 王金林, 郑玉龙. 城市绿地的养护管理措施[J]. *宁夏农林科技*, 2007 (5): 147.