

# 深圳市不同建成区密度和植被类型下绿地土壤 碳、氮、磷含量和细根生物量

孟令涵<sup>1</sup> 曾辉<sup>1</sup> 熊燕梅<sup>2</sup> 郭大立<sup>2,†</sup>

1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;  
† 通信作者, E-mail: guodl@igsnr.ac.cn

**摘要** 在深圳市按建成区密度(体现人类活动干扰程度)递增梯度选取 3 个公园为采样地点, 每个采样地点选取草坪、乔木林和荔枝林 3 种植被类型采集土壤样品, 同时以远郊的梧桐山人工林为对照, 研究不同深度土壤碳、氮、磷含量和细根生物量。结果表明城区各植被类型土壤容重和 pH 值都显著高于远郊人工林, 并高出适合植物生长的范围。城区各植被类型土壤碳、氮含量及细根生物量都低于远郊人工林。城区土壤磷含量高于远郊人工林, 呈现明显的富磷化特征, 特别是荔枝林土壤的富磷化现象最严重。土壤碳、氮浓度与细根生物量三者之间显著正相关, 表明城市植物的生长受到土壤氮含量的限制。与此同时, 城市植物的细根周转和输入能够有效维持土壤有机质含量。研究表明, 城市绿地土壤碳、氮、磷含量和细根生物量受现有植被类型和建成区密度(人为干扰)的共同影响。在城市绿地建设中, 种植草坪可以较快地积累土壤表层碳和氮, 而荔枝林更有利于土壤深层碳和氮的积累, 同时, 对于城区乔木林应该减少枯枝落叶的清理以利于土壤碳、氮的积累。

**关键词** 城市绿地; 土壤碳氮磷含量; 细根生物量; 植被类型; 建成区密度

中图分类号 S718

## Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Contents and Fine Root Biomass under Different Vegetation Types and Building Densities in Shenzhen City

MENG Linghan<sup>1</sup>, ZENG Hui<sup>1</sup>, XIONG Yanmei<sup>2</sup>, GUO Dali<sup>2,†</sup>

1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; † Corresponding author, E-mail: guodl@igsnr.ac.cn

**Abstract** Three urban parks along a building density gradient (indicating a gradient of human disturbance) in Shenzhen were chosen as the sampling sites, and in each park, three vegetation types (lawn, high forest and Lichi forest) were selected to sample soils, with a rural forest of Wutongshan as the reference. The results showed that soil bulk density and pH value in the urban sampling sites were higher than those of the rural forest, exceeding the optimal range of plant growth. Soil carbon and nitrogen concentrations and fine root biomass in urban sampling sites were lower than those of rural forest. However, soil phosphorus concentration in urban sampling sites was higher than those of rural forest, particularly indicated by phosphorus eutrophication in Lichi forests. Soil carbon concentration, nitrogen concentration and fine root biomass were positively related to each other, indicating that urban plant growth may be constrained by soil nitrogen, and that fine root inputs may have contributed substantially to soil organic matter. The results suggest that soil carbon, nitrogen, phosphorus and root biomass in urban green lands were affected by vegetation type and building density. The results may have important implications for green land construction and management: lawns are able to accumulate soil carbon and nitrogen rapidly in the shallow soil layer, and Lichi forests are better to accumulate soil carbon and nitrogen concentration in deeper soil layer. In

国家自然科学基金(30870418)资助

收稿日期: 2013-03-02; 修回日期: 2013-03-27; 网络出版日期: 2013-05-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20130528.1326.005.html>

addition, aboveground litter should not be removed in urban high forests in order to increase soil carbon and nitrogen concentrations.

**Key words** urban green land; soil carbon, nitrogen, and phosphorus storage; root biomass; plantation type; building density

城市土壤是城市生态系统的重要组成部分,是城市植物生长的介质和养分来源,是微生物和土壤动物的食物来源和生活场所,同时是城市环境污染物的缓冲器和净化器<sup>[1-3]</sup>。城市植被不仅是城市景观的重要组成部分,还由于其对环境污染物的净化作用,被称为城市的“肺”,而土壤的质量直接影响城市植物生长和城市生态环境质量,进而对城市社会经济生活产生影响<sup>[4]</sup>。土壤碳、氮、磷含量作为反映土壤质量和绿地健康的重要指标,直接影响着土壤肥力和地上植物的生长状况<sup>[5]</sup>。

在城市化进程中,土地利用方式发生改变将改变土壤中营养元素的贮存情况<sup>[6]</sup>。当原生森林被其他植被类型替代后,植被净初级生产率、植被根的分布和有机物分解率会发生改变<sup>[7-8]</sup>,土壤碳、氮、磷的垂直分布也将随之改变<sup>[9-10]</sup>。随着城市建成区面积和密度的增加,原有绿地不断破碎化,面积不断减少,原生植被逐渐被果园和观赏性景观乔木林和草坪替代<sup>[11]</sup>。植被类型改变后,一方面由于土壤受机械压实和人为压实严重,城市土壤的容重显著高于自然土壤,另一方面由于地上-地下生物量减少,有机物输入量减少,碳、氮元素进入土壤的量减少,城市残留绿地土壤板结、贫瘠化严重<sup>[12-13]</sup>。城市热岛效应、城市氮沉降、翻耕以及氮和磷肥料添加等,可能导致土壤碳、氮、磷元素含量增加,其增加幅度与城市化水平有关,但前人的研究结果很不一致。同时,用建成区密度作为城市化水平的量化评价指标开展的研究比较少见<sup>[5,14]</sup>,探究亚热带气候环境下快速城市化地区城市绿地土壤碳、氮、磷含量变化及其与根系生物量关系的研究也不多<sup>[15]</sup>。

我国正处在快速城市化进程中,大面积的森林和农用地被更替为城市用地,2000—2010年中国城市面积增长率达78.52%<sup>[16-17]</sup>。深圳是中国城市化进程最快的城市之一,土地利用的急剧改变必然对深圳城市土壤碳、氮和磷储量产生极大的影响,从而影响地上植物的生长,进一步影响着城市生态系统的服务功能。同时,由于植被类型改变导致的土壤碳、氮含量变化可能要在较长时间(10年)后才能表

现出来<sup>[18]</sup>,而深圳所处地区本底较为清晰,城市绿地公园建成时间均在最近30年以内,人为管理措施较相似且管理强度大,选取深圳作为研究区具有典型性和可操作性。本文旨在研究:1)不同植被类型和建成区密度下的土壤碳、氮、磷含量和根系生物量的变化和相关关系;2)在快速城市化地区,探究可以有效地维持或增加土壤营养元素含量的人工绿化方式,进而促进植被生长,提高城市可宜居度,实现城市可持续发展。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省深圳市原经济特区(113°52'—114°21'E, 22°27'—22°39'N),属亚热带海洋性季风气候,降水丰富,气候温和,年均气温22.5℃,年均降雨量1924.3 mm,无霜期355天。面积327.5 km<sup>2</sup>,人口密度7785人/km<sup>2</sup>。成土母岩主要是花岗岩和砂页岩,主要地带性土壤是赤红壤,有机质含量低,土壤贫瘠,土层厚度约45 cm。原生地带性植被类型为热带季雨林和南亚热带季风常绿阔叶林,城市开发导致原生植被破坏殆尽,转化为郊区人工林、城市果园、城市公园绿地(乔木林或草坪)和建设用地。郊区人工林主要以相思(*Acaciaconfusa*)、桉树(*Eucalyptus*)、马尾松(*Pinusmassoniana*)植物为主,土层结构未被破坏;城市果园以荔枝林(*Litchichinensis* Sonn)为主。公园绿地中,草坪主要是台湾草(*Zoysiatenuifolia*)和假俭草(*Eremochloaophiuroides*);乔木林以小叶榕(*Ficusmicrocarpa*)、凤凰木(*Delonixregia*)、柏树(*Cupressaceae*)为主。

### 1.2 研究方法

1) 试验设置:本研究按照城市建成区密度(反映人口密度和人类活动强度,见图1)递增梯度,选取大学城、梅林公园和中心公园3个地点,每个地点选择草坪、乔木林和荔枝林3种植被类型为研究对象。另外,以远郊梧桐山人工林为参照。其中,梧桐山人工林种植时间约30年,各个地点的荔枝林种植时间都在20年左右,各公园的草坪和乔木林建成时间为10年左右。



黑三角为采样地点, 建成区密度=辖区实际建设用地面积/该辖区总面积

图 1 采样点位置及所处辖区建成区密度图

Fig. 1 Locations and building densities of the sampling sites

2) 土样采集: 土壤样品采集于降水量少的冬季(2011年11—12月)。采样深度根据土层厚度(碎石层约在40~50 cm深度出现)定为50 cm。在各采样地点按不同植被类型随机选取3个10 m×10 m的样方。

采用梅花布点法在每个样方内选取4个1 m×1 m小样方, 在小样方顶点用内径5 cm的土钻采集深度为0~5, 5~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm的土壤, 将其混合均匀, 取1 kg土作为一个土样。每个混合土样经自然风干、研磨后, 分别过2.00 mm筛将土壤和石块分开, 过0.15 mm筛将土壤和根分开, 以便进行室内分析工作。同时在每个采样点挖50 cm深的土壤剖面, 用体积为50 cm<sup>3</sup>的环刀取土, 放入封口袋内, 用于测定土壤容重。采集过程中, 将土层明显受到干扰(建筑物碎片填埋、土层结构错乱)的土壤标记出来。

### 1.3 测定方法

土壤物理性质: 土壤容重采用环刀法测定<sup>[19]</sup>。

土壤化学性质: pH值采用水土比为2.5:1.0, 酸度计测定<sup>[19]</sup>; 全碳、全氮含量采用全元素分析仪(Vario Microcube; Elementar, Hanau, 德国)测定; 全磷含量用高锰酸-浓硫酸消解后采用ICP-MS (Elan DRC-e, PerkinElmer, 美国)全元素分析仪测定。

根系生物量: 将过筛挑出的细根于60℃条件下烘48小时, 测定干重(精度0.0001 g)。

### 1.4 数据分析

单位面积0~50 cm剖面土壤碳、氮、磷密度分别为各土层碳、氮、磷含量(浓度与土壤容重的乘积)之和。用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别比较不同样地土壤容重、pH值以及土壤碳、氮、磷密度的差异, 用Duncan法进行多重比较。用双因子方差分析(two-way ANOVAs)比较不同植被类型和建成区密度下土壤碳、氮、磷浓度及细根生物量的差异。用Pearson相关分析法对土壤碳、氮、磷浓度及根生物量之间进行两两相关分析。采用SPSS 17.0 for Windows 统计软件作统计分析。

## 2 结果和讨论

### 2.1 0~50 cm 土层土壤容重和 pH

总体看来, 3个采样点的土壤容重在0~50 cm各个土层都高于梧桐山采样点, 其中最高的是大学城草坪采样点(表1)。随着土层加深, 土壤容重升高, 不同采样点之间容重差异逐渐减小。自然植被下浅层土壤的容重在1.3 g/m<sup>3</sup>左右, 当土壤容重大于1.6 g/m<sup>3</sup>时, 严重阻碍植物根系生长<sup>[20]</sup>。城市土壤由于经受频繁的机械压实或人为踩踏, 容重一般较高<sup>[3]</sup>。在本研究中, 梧桐山人工林的土壤容重接近自然植被的土壤容重, 而其他地点的土壤容重都显著更高( $P<0.05$ ; 表1)。这可能是由于在建成区密度高的地点, 人口密度高, 绿地土壤机械压实现象严重, 踩踏活动也比较强烈。此外, 梧桐山人工林和荔枝林

表 1 土壤容重和 pH 值  
Table 1 Soil bulk density and pH

变量	土层深度/cm	梧桐山	大学城			梅林公园			中心公园		
		远郊人工林	草坪	乔木林	荔枝林	草坪	乔木林	荔枝林	草坪	乔木林	荔枝林
土壤容重 (g·cm <sup>-3</sup> )	0~5	1.11 <sup>a</sup>	1.62 <sup>d</sup>	1.51 <sup>c</sup>	1.37 <sup>b</sup>	1.43 <sup>bc</sup>	-	-	1.36 <sup>b</sup>	-	-
	5~10	1.23 <sup>a</sup>	1.71 <sup>c</sup>	1.59 <sup>bc</sup>	1.60 <sup>bc</sup>	1.55 <sup>bc</sup>	-	-	1.47 <sup>b</sup>	-	-
	10~20	1.3 <sup>a</sup>	1.83 <sup>c</sup>	1.58 <sup>bc</sup>	1.51 <sup>b</sup>	1.62 <sup>bc</sup>	-	-	1.65 <sup>bc</sup>	-	-
	20~40	1.35 <sup>a</sup>	1.74 <sup>c</sup>	1.65 <sup>c</sup>	1.47 <sup>b</sup>	1.64 <sup>c</sup>	-	-	1.71 <sup>c</sup>	-	-
	40~50	1.54 <sup>a</sup>	1.71 <sup>b</sup>	1.68 <sup>b</sup>	1.60 <sup>ab</sup>	1.67 <sup>b</sup>	-	-	1.73 <sup>b</sup>	-	-
pH	0~5	4.80 <sup>a</sup>	6.30 <sup>e</sup>	6.29 <sup>e</sup>	4.55 <sup>a</sup>	6.95 <sup>f</sup>	6.84 <sup>e</sup>	5.96 <sup>b</sup>	6.98 <sup>f</sup>	6.98 <sup>f</sup>	6.52 <sup>d</sup>
	5~10	4.90 <sup>a</sup>	6.41 <sup>c</sup>	6.40 <sup>c</sup>	4.60 <sup>a</sup>	6.83 <sup>d</sup>	6.72 <sup>cd</sup>	6.08 <sup>b</sup>	7.15 <sup>f</sup>	6.97 <sup>e</sup>	6.56 <sup>cd</sup>
	10~20	4.98 <sup>b</sup>	6.64 <sup>de</sup>	6.44 <sup>d</sup>	4.57 <sup>a</sup>	6.75 <sup>e</sup>	6.63 <sup>de</sup>	6.19 <sup>c</sup>	7.27 <sup>g</sup>	7.12 <sup>f</sup>	6.63 <sup>de</sup>
	20~30	5.08 <sup>b</sup>	6.67 <sup>d</sup>	6.51 <sup>cd</sup>	4.61 <sup>a</sup>	6.72 <sup>d</sup>	6.55 <sup>cd</sup>	6.30 <sup>c</sup>	7.34 <sup>e</sup>	7.26 <sup>e</sup>	6.73 <sup>d</sup>
	30~40	4.70 <sup>a</sup>	6.10 <sup>c</sup>	6.12 <sup>c</sup>	4.59 <sup>a</sup>	6.97 <sup>f</sup>	6.93 <sup>f</sup>	5.84 <sup>b</sup>	6.75 <sup>e</sup>	6.78 <sup>ef</sup>	6.52 <sup>d</sup>
	40~50	5.18 <sup>b</sup>	6.86 <sup>e</sup>	6.56 <sup>cd</sup>	4.64 <sup>a</sup>	6.63 <sup>d</sup>	6.56 <sup>cd</sup>	6.42 <sup>c</sup>	7.44 <sup>f</sup>	7.38 <sup>f</sup>	6.52 <sup>cd</sup>

说明：“-”表示由于公园管理原因未能采集测定土壤容重。同一行上不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

地表土层的容重较小,可能还由于其地表有枯落物层,枯落物分解转化过程中形成的腐殖质使表层土壤形成团粒结构,使其疏松多孔。

大学城荔枝林的土壤 pH 值接近梧桐山人工林土壤,而城区其他土壤的 pH 值都显著高于梧桐山人工林土壤( $P < 0.001$ ; 表 1)。华南地区土壤一般呈酸性,自然植被下表层土壤 pH 值在 4~5.5 之间<sup>[21]</sup>。建成区密度低的梧桐山人工林和大学城荔枝林的土壤 pH 值接近自然植被下的土壤,而在建成区密度高的梅林公园和中心公园,土壤 pH 值显著更高,变化范围为 6.28~7.44,接近中性或呈弱碱性。许多研究也表明城市土壤的 pH 值较同地带的自然土壤偏高,这是由于城市土壤中常混有建筑废弃物(如水泥、砖块和其他钙质基础的材料)导致土壤碱化<sup>[1,3]</sup>。梧桐山人工林和大学城荔枝林由于没有建设活动,土壤是自然土壤,而梅林公园和中心公园的土壤是在公园建设过程中人为堆积的,因此土壤中可能混合了许多导致土壤碱化性的建筑材料。

## 2.2 土壤碳、氮、磷浓度,密度和根系生物量

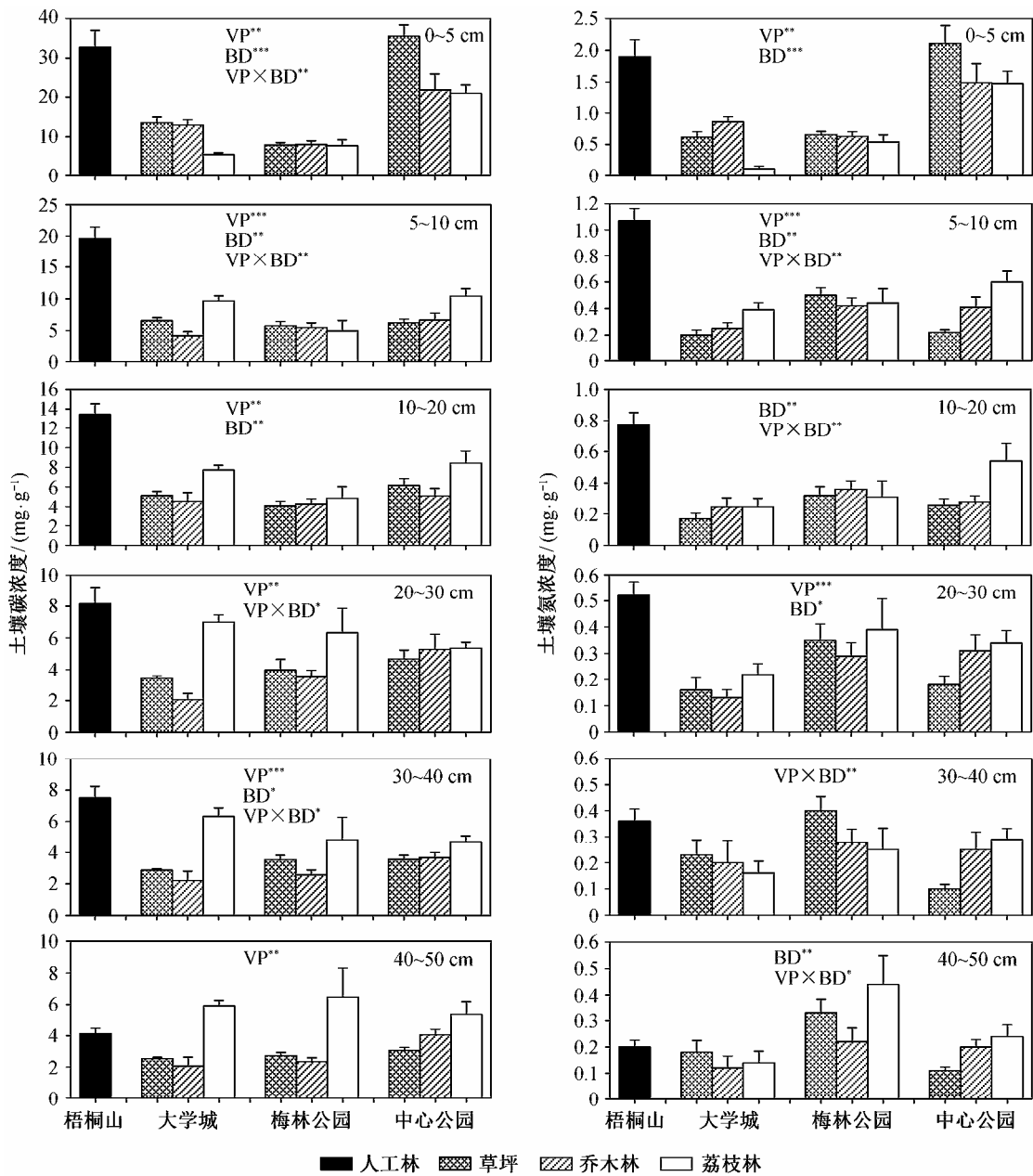
梧桐山远郊人工林的土壤碳浓度和氮浓度在 0~40 cm 的各土层都高于其他土壤,或与其他土壤的最高值持平(图 2)。不同植被类型下,土壤碳浓度和氮浓度有显著差异( $P < 0.001$ )。在 0~5 cm 土层,草坪的土壤碳浓度和氮浓度都显著高于荔枝林,而在 5~30 cm 土层,荔枝林的土壤碳浓度和氮浓度显著高于草坪和乔木林( $P < 0.01$  或  $P < 0.001$ )。0~20 cm 和

30~40 cm 土层的土壤碳浓度在不同建成区密度下有显著差异( $P < 0.05$  或  $P < 0.001$ )。建成区密度最高的中心公园的土壤碳浓度和氮浓度显著更高,该趋势在 0~5 cm 土层最明显。植被类型和建成区密度之间的交互效应对碳浓度在 0~10 cm 和 20~40 cm 显著( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ),对氮浓度在 0~10 cm 和 40~50 cm 显著( $P < 0.05$  或  $P < 0.001$ )。

梧桐山远郊人工林的土壤磷浓度在 0~50 cm 各土层都低于其他地点,或接近其他土壤磷浓度的最低值(图 3)。不同植被类型下,土壤磷浓度差异显著( $P < 0.001$ )。总体上,荔枝林土壤磷浓度在 0~50 cm 各土层最高,显著地高于草坪和乔木林。在不同建成区密度下,各土层土壤磷浓度在梅林公园显著地更高( $P < 0.001$ )。植被类型和建成区密度之间的交互效应在 5~10 cm 显著( $P < 0.05$ )。

梧桐山远郊人工林的细根含量在 0~20 cm 高于其他地点或者与其他地点的根含量的最高值持平,而在 20~50 cm 土层,梧桐山远郊人工林的细根含量低于其他地点(图 3)。在不同植被类型下,仅 20~40 cm 土层的细根含量差异显著( $P < 0.05$ )。在 0~5 cm 土层,草坪的根含量最高,是乔木林和荔枝林根含量的 2 倍左右。而在 5 cm 以下的土层,乔木林和荔枝林的根含量是草坪根含量的 7.67 和 6.00 倍。在不同建成区密度下,5~10 cm 和 30~40 cm 土层根含量显著差异( $P < 0.05$  或  $P < 0.001$ )。建成区密度最低的大学城园区的根含量显著更高。

梧桐山人工林的土壤碳和氮密度在所有采集了



VP: 植被类型, BD: 建成区密度; \*\*\*  $P < 0.001$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$

图 2 不同植被类型和建成区密度下的土壤碳、氮浓度

Fig. 2 Soil carbon and nitrogen concentrations under different vegetation types and building densities

土壤容重样品的采样点中最高,但是土壤磷密度最低( $P < 0.05$ ; 图 4)。大学城荔枝林的土壤氮密度最低,但是磷密度和根系生物量都最高( $P < 0.05$ )。

相关研究表明,在不同的植被类型和城市化梯度(即建成区密度)下,土壤碳、氮、磷含量存在很大差异<sup>[22-23]</sup>。植被类型通过影响进入土壤的植物残体(地上凋落物和地下根系周转)数量和性质,从而影响土壤碳和养分含量<sup>[24-26]</sup>。高度城市化的区域,局部气候环境、大气氮沉降水平和人工管理养护方式

等人工干扰会发生变化,从而使土壤元素含量发生变化<sup>[27-28]</sup>。Craul<sup>[20]</sup>和 Clemens 等<sup>[29]</sup>认为城市化会导致土壤变贫瘠,Pouyat 等<sup>[5]</sup>的研究表明,美国纽约市森林的土壤碳、氮含量比郊野森林高,这一现象在美国菲尼克斯和我国杭州等市也存在<sup>[30-31]</sup>。有研究显示,城市地区氮沉降比远郊明显更高<sup>[27]</sup>,但是本研究中土壤氮浓度并不随着建成区密度升高而增加,相反地,城区土壤的氮浓度和碳浓度都低于远郊人工林(图 2)。同时,尽管梧桐山人工林的土壤容

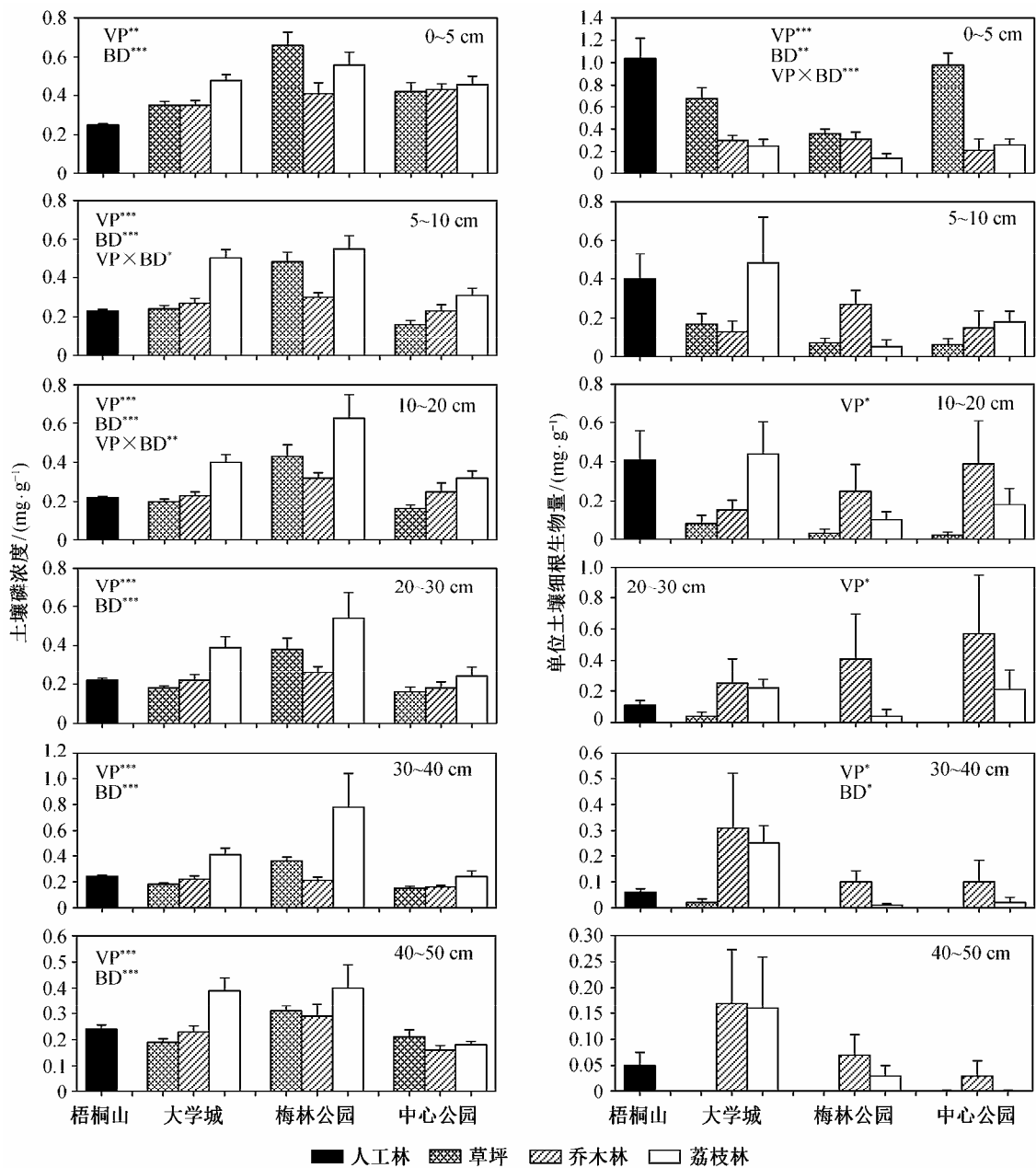


图3 不同植被类型和建成区密度下的土壤磷浓度和单位重量的土壤根系生物量

Fig. 3 Soil phosphorus concentration and root biomass under different vegetation types and building densities

重显著低于其他地点，但是该林下的土壤碳、氮密度却比其他地点更高(图2和4)，表明远郊人工林贮存碳、氮的能力高于城区的各类土地利用类型。究其原因，可能是在城市建设的过程中，人为的开发活动(如削山、毁林、栽种单一人工林树种等)加速了土壤的碳、氮矿化和流失。城区各植被类型中，乔木林土壤碳、氮浓度显著低于其他植被类型，可能是因为城市公园人工管理每日清理树木的枯枝落叶，地上生物量输入几乎为零。

富磷化是城市土壤的一个常见特征。由于周期性人工施肥以及城市建设用地的增加造成下垫面性质改变，土壤磷素的下渗能力下降，累积能力增加，城市绿地土壤全磷含量因此高于远郊梧桐山人工林，这一现象在较为发达的城市，如纽约、上海、合肥等都存在<sup>[14,32-33]</sup>，但在原生植被保护较好的香港、重庆等地富磷化不明显<sup>[34-35]</sup>。本研究表明，深圳城市土壤也存在明显的富磷化现象。远郊梧桐山人工林的土壤磷浓度在0~5 cm远远低于城区个各

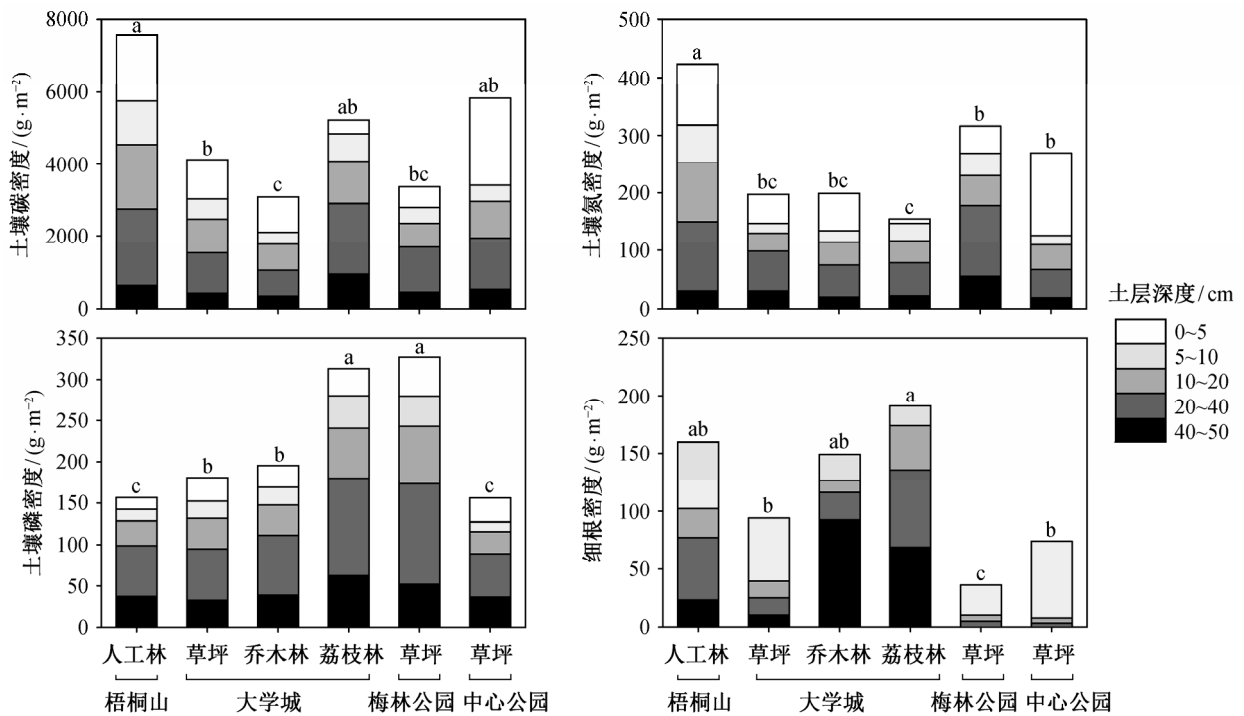
植被类型下的土壤，尤其显著的是荔枝林土壤磷含量在所有土层中都是最高的，这可能是果园管理过程中人工施磷肥量过多导致的。

细根(直径 2 mm)在水分和养分吸收、土壤养分周转及生态系统生产力等方面发挥着重要作用,在城市绿地土壤养分过程中扮演重要角色<sup>[36]</sup>。曾文静等<sup>[37]</sup>对城市绿地的细根生物量研究显示,城市化会导致细根生物量降低,在中亚热带地区植物种类丰富度高的林分,其细根生物量也高,甚至出现细根“超产”现象<sup>[38]</sup>。本研究表明深圳城市绿地细根生

物量比远郊人工林低。这可能由于城市绿地中植被群落结构较简单,植物种类丰富度和林分密度低于原生地带性植被,同时由于种植年龄较短和种植密度较远郊人工林低,人工干扰造成土壤理化性质(如土壤孔隙度、水分和 pH 等)改变,不利于细根生长,人工移除凋落物使自然养分输入减少等导致的。

### 2.3 各土层土壤碳、氮、磷浓度和根系含量间相关关系

土壤碳浓度和氮浓度在所有土层都显著正相关,相关性随着土层加深逐渐下降( $P < 0.01$ ; 表 2)。



不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

图 4 土壤碳、氮、磷密度和根系生物量

Fig. 4 Soil carbon, nitrogen and phosphorus densities and fine root biomass

表 2 土壤碳、氮、磷浓度、细根生物量之间相关关系

Table 2 Correlations among soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and fine root biomass

变量	0~5 cm			5~10 cm			10~20 cm		
	全碳	全氮	全磷	全碳	全氮	全磷	全碳	全氮	全磷
全氮	0.92**			0.86**			0.82**		
全磷	-0.2**	-0.18**		-0.12**	<0.01		0.08*	<0.01	
根重	0.45**	0.51**	<0.01	0.35**	0.4**	<0.01	0.17**	0.2**	<0.01
变量	20~30 cm			30~40 cm			40~50 cm		
	全碳	全氮	全磷	全碳	全氮	全磷	全碳	全氮	全磷
全氮	0.75**			0.45**			0.48**		
全磷	<0.01	<0.01		<0.01	<0.01		<0.01	<0.01	
根重	0.2**	0.14**	0.09*	<0.01	-0.14**	0.1**	<0.01	<0.01	<0.01

注: \*\*  $P < 0.001$ , \*  $P > 0.01$ 。土壤碳、氮含量和根含量单位均为 mg/g。

土壤碳浓度和磷浓度在 0~20 cm 各土层显著负相关 ( $P<0.05$  或  $0.01$ )。土壤氮浓度和磷浓度在 0~5 cm 土层显著负相关 ( $P<0.01$ )。细根含量与土壤碳浓度在 0~30 cm 的各土层显著正相关 ( $P<0.01$ )，与土壤氮浓度在 0~40 cm 各土层显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关性都随着土层加深逐渐下降。细根含量与土壤磷浓度的相关性较弱，仅在 20~40 cm 土层显著正相关 ( $P<0.05$ )。

本研究中土壤碳、氮含量和根含量三者之间紧密相关(表 2)，表明城市土壤氮浓度对植物根系生长的重要作用以及根系输入对维持土壤碳、氮含量起着重要作用。氮是植物生长所需的大量元素，在土壤氮含量未达饱和的条件下，植物的地上、地下生产力往往随着土壤氮含量升高而增加<sup>[5]</sup>。本研究中，土壤氮浓度与根生物量显著相关，而且植物根系的垂直分布与土壤氮浓度的垂直分布非常一致，表明城市植物根系生长可能受土壤氮浓度的影响(表 2)。在梧桐山人工林和草坪中，土壤氮很大比例地分布在 0~20 cm 土层，而乔木林和荔枝林土壤氮比较均匀地分布在浅、深土层。相应地，梧桐山人工林和公园草坪，植物根系主要分布在浅土层 0~20 cm 的浅土层，特别是草坪，有 96.3% 分布在此土层(图 3)。植物根系在受到土壤氮影响的同时，根系输入对土壤有机质有重要贡献，因此影响土壤碳、氮含量。越来越多的研究表明，植物细根及其共生真菌由于周转快、分解缓慢，可能比地上凋落物对土壤有机质的贡献更大<sup>[39-40]</sup>。与此一致地，本研究发现细根生物量与土壤碳含量显著相关(表 2)，而且细根生物量的垂直分布与土壤碳浓度的垂直分布一致。虽然磷也是植物生长所需的大量元素，但是由于城市生产生活导致土壤富磷化，土壤磷含量已经饱和，超过植物生长所需，导致土壤磷浓度与根生物量之间几乎没有相关性，也因此导致土壤磷浓度与碳、氮浓度不相关(表 2)。

### 3 结论

本文研究了快速城市化地区不同植被类型覆盖和建成区密度下，城市绿地的土壤物理和化学性质，特别是土壤碳、氮、磷量和根系生物量的差异特征。城区各植被类型土壤容重和 pH 值都显著高于远郊人工林，超出自然植被正常范围。城区各植被类型土壤碳、氮含量都低于远郊人工林，但是城区土壤存在严重的富磷化现象。细根生物量与土壤氮浓度

显著正相关，可能表明城市植物的生长受到土壤氮含量的限制。与此同时，城市植物的根系输入能够有效维持土壤有机质含量，表现在根系生物量与土壤碳含量也显著正相关。我们的结果表明，在城市公园建设过程中草坪可以在较短的时间内实现表层土壤的碳、氮累积，可以在土壤侵蚀严重的地区先种植草坪固碳，然后通过在下层种植草坪，上层种植乔木林的方式，增加植被覆盖的密度和层级，同时减少枯枝落叶的清理，以增加土壤有机质含量。

### 参考文献

- [1] Jim C Y. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosystems*, 1998, 2: 171-178
- [2] Bockheim J G. Nature and properties of highly-disturbed urban soils // *Soil Genesis, Morphology and Classification*. Annual Meeting of the Soil Society of America. Chicago, 1974: 53-56
- [3] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 206-209
- [4] 李锋, 王如松. 城市绿色空间生态服务功能研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 527-531
- [5] Pouyat R V, Yesilonis I D, Russell A J, et al. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 1010-1019
- [6] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen — a review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, 8(2): 105-123
- [7] Fearnside P M, Barbosa R I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 2008, 10(8): 147-166
- [8] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 414-419
- [9] Graham K, Elena M B, Zofia E T. The influence of time, soil characteristics, and land-use history on soil phosphorus legacies: a global meta-analysis. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 1904-1917
- [10] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Application*, 2000, 10(4): 423-436
- [11] 秦佩恒, 曾辉, 武剑峰, 等. 快速城市化地区经过



- 可达性及其对林地的影响: 以深圳市宝安区为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3795-3803
- [12] Pouyat R V, Yesilonis I D, Golubiewski N E. A comparison of soil organic carbon stocks between residential turfgrass and native soil. *Urban Ecosystems*, 2009, 12(1): 45-62
- [13] Jenkins J, Riemann R. What does nonforest land contribute to the global C balance? // Third Annual FIA Science Symposium. St Paul, MN, 2001: 173-186
- [14] Lovett G M, Traynor M M, Pouyat R V, et al. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient. *Environment Science Technology*, 2000, 34(9): 4294-4300
- [15] Raciti S M, Groffman P M, Fahey T J. Nitrogen retention in urban lawns and forests. *Ecological Applications*, 2008, 18(10): 1615-1626
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴 2001 [M/OL]. 北京: 中国统计出版社, 2001 [2012-11]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2001c/k1105c.htm>
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [M/OL]. 北京: 中国统计出版社, 2011 [2012-11]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2011/indexch.htm>
- [18] Cerri C E P, Easter M, Paustian K. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 122(9): 58-72
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [20] Craul P J. A description of urban soil and their desire characteristics. *Journal of Arboriculture*, 1985, 11(11): 330-339
- [21] Kaye J P, Groffman P M, Pouyat R V, et al. A distinct urban biogeochemistry?. *Trends in Ecological Evolution*, 2006, 21(4): 192-199
- [22] 戴万宏, 俞佳, 黄耀, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. *土壤学报*, 2009, 46(5): 851-860
- [23] Roxana P E, Joggaby R B. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Change Biology*, 2012: doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x
- [24] Amundson R. The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29(5): 535-562
- [25] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360
- [26] Sharma P, Rai S C, Sharma R, et al. Effect of land-use changes on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed. *Pedobiologia*, 2004, 48(3): 83-92
- [27] Klauz L, Rattan L. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, 35(1): 21-28
- [28] Pouyat R V, Groffman P M, Yesilonis I, et al. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environment Pollution*, 2002, 116(3): 107-118
- [29] Clemens J, Bradley C, Gilbert O L. Early development of vegetation on urban demolition sites in Sheffield, England. *Urban Ecology*, 1984, 8(9): 139-147
- [30] Koerner A B, Klopatek M J. Carbon fluxed and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(1): 1-21
- [31] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性. *土壤通报*, 2006, 37(1): 19-21
- [32] 刘为华, 张桂莲, 徐飞, 等. 上海城市森林土壤理化性质. *浙江林学院学报*, 2009, 26(2): 155-163
- [33] Zhang K, Xu X N, Wang Q. Characteristics of N mineralization in urban soils of Hefei, East China. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 236-244
- [34] Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. *Landscape Urban Plan*, 1998, 40(3): 235-249
- [35] 包兵, 吴丹, 胡艳燕, 等. 重庆主城区市街绿地土壤肥力质量评价及管理对策. *西南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(11): 100-105
- [36] Cronan C S. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U S A Canadian. *Journal of Forest Research*, 2003, 33(2): 339-350
- [37] 曾文静, 李凡, 李金全, 等. 城市片林与城市草坪细根生物量特征. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(3): 40-47
- [38] 刘聪, 项文化, 田大伦, 等. 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 539-550
- [39] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, 269: 341-356
- [40] Xiong Y, Fan P, Fu S, et al. Slow decomposition and limited nitrogen release by lower order roots in eight Chinese temperate and subtropical trees. *Plant and Soil*, 2013, 363: 19-31