

城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 化学计量特征

何俊杰 陈小梅* 冯思红 姚庭玉 梁倩文 符家铭

(广州大学地理科学学院, 广州 510006)

摘要 随着城市化进程加剧,人们越来越关注城市森林生态系统的结构与功能。森林土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量变化对于理解森林生态系统结构和功能的稳定性具有重要意义。本文以高度城市化的珠江三角洲城-郊梯度上亚热带常绿阔叶林为研究对象,分析城区、郊区梯度上土壤 C、N、P 的化学计量特征。结果表明:郊区森林表层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)土壤 C、N 含量均显著高于城区($P<0.001$);城区森林表层土壤 P 含量与郊区差异不显著($P=0.226$),而郊区森林 10~20 cm 土层土壤 P 含量显著高于城区($P=0.001$)。城区森林土壤 N:P 和 C:P 均高于郊区,而城区森林土壤 C:N 与郊区差异不显著。快速的城市化使南亚热带森林土壤营养元素循环发生改变,降低了城市森林生态系统结构与功能的稳定性。

关键词 城郊梯度; C:N:P; 生态化学计量; 南亚热带森林

Stoichiometric characteristics of soil C, N and P in subtropical forests along an urban-to-suburb gradient. HE Jun-jie, CHEN Xiao-mei*, FENG Si-hong, YAO Ting-yu, LIANG Qian-wen, FU Jia-ming (School of Geography Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China).

Abstract: With increasing urbanization, more and more attention has been paid on the structure and functions of urban forests. The changes in ecosystem structure and function can be reflected by those in stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P). In order to explore potential influences of urbanization on the stoichiometric characteristics of C, N and P, soil samples (0–10 and 10–20 cm) were collected from six subtropical forests along an urban-to-suburb gradient in the Pearl River Delta that has been experiencing an unprecedented level of urbanization. The results showed that soil C and N concentrations in layers 0–10 cm and 10–20 cm were significantly higher in the suburb forests than in the urban forests. There was no significant difference in soil P concentrations in 0–10 cm layer between the urban and suburb forests ($P=0.226$). However, soil P concentrations in 10–20 cm were significantly greater in the suburb forests than in the urban forests ($P=0.001$). Both soil N:P and C:P were significantly higher in the urban forests than in the suburb forests but soil C:N was not significantly different. Our results suggested that rapid urbanization changed nutrient cycling in subtropical forests, which would reduce the stability of structure and function of urban forests.

Key words: urban-to-suburb gradient; C:N:P; stoichiometric characteristics; subtropical forest of southern China.

生态系统中碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素的循

环过程是相互耦合的(Lai, 2004; Schipper *et al.*, 2004), C、N、P 化学计量比具有较强的内稳性,对维持生态系统结构和功能具有重要意义(赵航等, 2014)。森林土壤 C 是气候变化的一种敏感性指示物,能够用来表示森林对气候变化的响应(肖辉林,

广州市属高校科技计划项目(1201430746)、广东省普通高校青年创新人才项目(2014KQNCX110)和国家级大学生创新训练项目(201511078016)资助。

收稿日期: 2015-07-14 接受日期: 2015-12-11

* 通讯作者 E-mail: xmchen@scib.ac.cn

1999);而N和P是植物生长所必需的矿物质营养元素和生态系统中最常见的限制性养分(Elser *et al.*, 2007;王绍强等, 2008)。因此,生态系统中的C、N、P等元素循环一直以来是全球气候变化研究的基本内容。

人类活动对生态系统C、N、P的循环有着重要影响。世界上超过50%的人口生活在城市,预计2050年全球城市人口将接近66%(UNDESA/PD, 2014)。城市化进程使得温度、湿度等生态因子在城区-郊区的生态界面上形成了相应的递减梯度(McDonnell *et al.*, 1997;George *et al.*, 2007),影响着城市森林C、N、P的转化过程,从而改变了城市森林生态系统的养分循环。Chen等(2014)对南昌市4种植被类型土壤的研究发现,沿城-郊-乡梯度土壤全P含量下降,C:P、N:P呈增加趋势,而土壤有机C、全N、C:N城郊乡差异不显著。但Cusack(2013)在波多黎各的热带森林研究发现,城区森林土壤C:N低于乡村,城市化强烈改变了森林土壤N质量,将会改变土壤有机质循环过程。关于城市化对森林土壤C、N、P影响尚未有统一结论,而城市土壤作为陆地生态系统的重要组成部分(张甘霖, 2005),必然存在着其特有的C、N、P的生态化学计量特征。因此,阐明城市化背景下森林土壤营养元素的变化趋势对于揭示城市森林生态系统的结构和功能具有重要意义。

珠江三角洲的地带性植被为季风常绿阔叶林。改革开放以来,广东省经历了快速城市化和环境变化,城市中心城区、郊区以及远郊区的季风常绿阔叶林破坏严重(张金屯等, 1999;李伟等, 2013)。城市化压力下亚热带森林土壤主要营养元素的变化趋势如何?本文选择广东典型地带性森林——季风常绿阔叶林为研究样地,以高度城市化的珠江三角洲为研究中心,以城-郊梯度上亚热带季风常绿阔叶林为研究对象,分析城郊梯度上森林土壤的C、N、P化学计量特征,探讨在快速城市化背景下亚热带森林土壤营养元素的动态变化及其关系,以期为评判城市森林生态系统的稳定性提供数据支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

珠江三角洲地区(21°31'N—23°10'N, 112°45'E—113°50'E)属亚热带海洋性季风气候区,雨量充沛,热量充足,年均降水量为1600~2300

mm,汛期4—9月,降水占全年81%~85%,地带性植被是亚热带季风常绿阔叶林,土壤主要发育于砂岩、页岩和花岗岩母质上的赤红壤和红壤(杨昆等, 2007)。

根据Chen等(2013)的研究,本文以珠江三角洲城区为核心区,利用多源遥感影像,根据大气氮沉降、CO₂排放量、气温、年平均降水量数据和前期土壤污染监测,实地调查后将珠江三角洲森林划分为两个梯度:1)城市0~65 km,珠江三角洲核心区延伸至65 km;2)近郊65~130 km。在每个等级区域内,将其平均划分为12个面积相同的斑块,依据斑块不重合的原则,随机选取3个斑块内的常绿阔叶林作为研究样地。本项目共选取6个样地,城区的植物园(ZWY)、帽峰山(MFS)、白云山(BYS);郊区的鹤山(HS)、鼎湖山(DHS)、从化石门森林公园(CHSM)(图1)。

1.2 样品采集与处理

2015年1月,在上述的6个样地中,选取坡向、坡度、海拔等条件基本相似的位置,分别建立5个5 m×5 m的样方,共建立30个样方,在每个样方内选1个60 cm×60 cm的采样点。用内径2.5 cm的土钻按0~10、10~20 cm两个分层随机钻取土壤样品,并装入已消毒的塑料袋,带回实验室,共计58个样品。将土样放至通风干燥处,自然风干。剔除石粒、草根等杂物,过2 mm筛的土壤以备测土壤含水量和pH值,过100目筛(径级为149 μm)以备测土壤C、N、P含量。

1.3 样品处理及测定

土壤pH值用电极电位法测定,测定时水土比为1:2.5;土壤C用重铬酸钾-外加热法测定;土壤

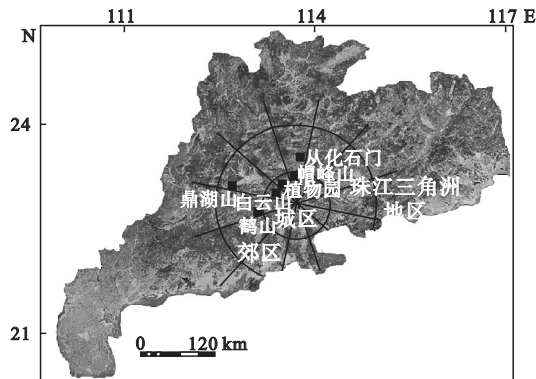


图1 样地的分布示意图

Fig.1 Location of plots

ZWY:华南植物园;BYS:白云山;MFS:帽峰山;HS:鹤山;DHS:鼎湖山;CHSM:从化石门森林公园。

全 N 用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定;土壤全 P 用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 统计分析软件对数据进行整理。城区数据为城区 3 个样地的数值平均值,郊区数据为郊区 3 个样地的数值平均值。采用独立样本 *T* 检验判断城郊梯度上土壤 C、N、P 及 C : N、C : P、N : P 的差异;利用单因素方差分析法 (LSD 法)判断不同样地土壤 C、N、P 及其比值含量之间的差异;利用 Pearson 相关系数对土壤 pH 值、C、N、P 含量及其比值之间进行相关分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值

6 个样地表层土壤 (0~10 cm) pH 值差异显著 ($P = 0.001$),而在城郊上差异不显著 ($P = 0.185$) (表 1),呈现城区土壤 pH 值高于郊区的趋势 (图 2A),城区样地植物园 pH 值 (4.52 ± 0.69) 最高,与其他样地差异显著,郊区样地鼎湖山 (3.53 ± 0.08) 最低。6 个样地 10~20 cm 土层的分布 ($P = 0.004$) 与表层土壤一致,植物园土壤 pH 值 (4.47 ± 0.63) 高于其他样

地 (图 2A)。在两个梯度下,城区森林土壤 pH 值均略高于郊区 (表 1),表明城区森林土壤碱化趋势明显。

2.2 土壤 C、N、P 含量

6 个样地表层土壤 (0~10 cm) C 含量差异显著 ($P < 0.001$) (图 2B),距离城区最远的从化石门森林公园 ($47.68 \pm 9.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和鼎湖山 ($39.44 \pm 9.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤 C 含量最高,其次是位于城郊交界的鹤山 ($24.33 \pm 4.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),位于城区中心的植物园 C 含量 ($13.19 \pm 2.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低,郊区森林表层土壤 C 含量显著高于城区 ($P < 0.001$) (表 1)。6 个样地 10~20 cm 土壤 C 含量 ($P < 0.001$) 与 0~10 cm 土层分布一致,郊区从化石门森林公园 (22.20 ± 7.29

表 1 城郊梯度上土壤 C、N、P 含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 1 Soil C, N, and P contents along the urban-suburb gradient

土层 (cm)	梯度	pH	C	N	P
0~10	城区	4.09±0.34 a	17.13±3.04 a	1.11±0.30 a	0.15±0.04 a
	郊区	3.67±0.05 a	37.15±7.99 b	2.31±0.41 b	0.21±0.06 a
10~20	城区	4.14±0.32 a	8.51±1.72 a	0.52±0.14 a	0.12±0.01 a
	郊区	3.82±0.02 a	17.15±5.75 b	1.25±0.29 b	0.16±0.02 b

同列不同层次不同小写字母表示城郊间差异显著 ($P < 0.05$)。

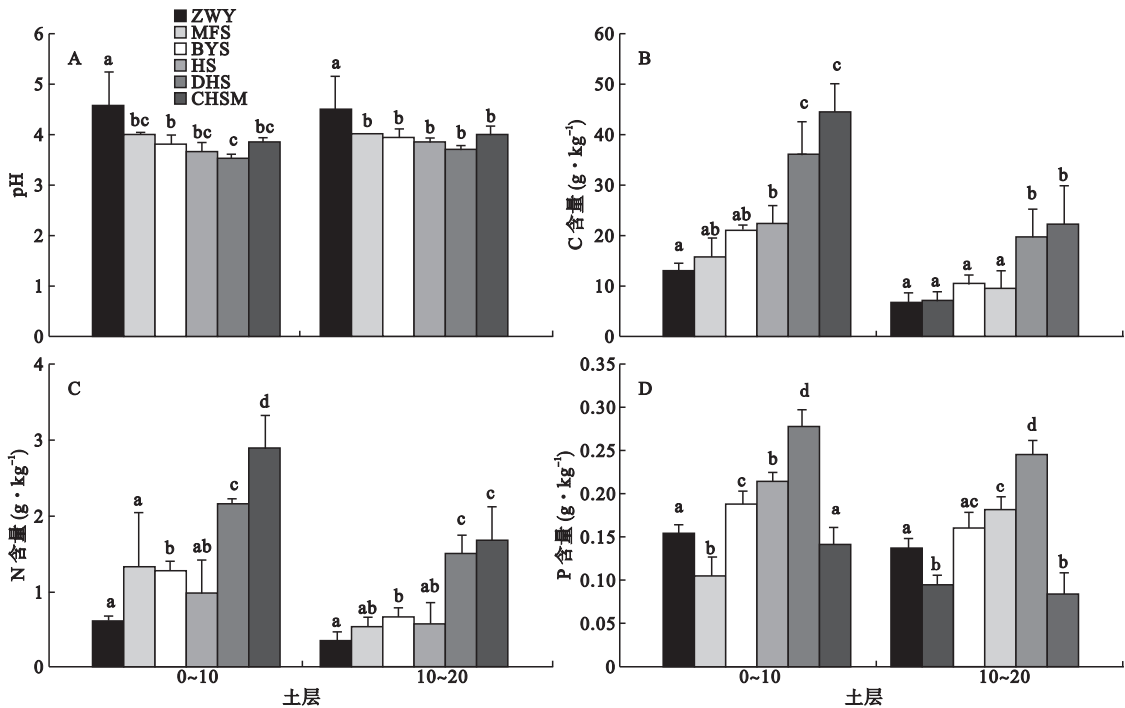


图 2 不同森林土壤层次 pH 值、C、N、P 含量

Fig.2 pH values and C, N, P contents of different soil depths in forest

ZWY: 华南植物园; BYS: 白云山; MFS: 帽峰山; HS: 鹤山; DHS: 鼎湖山; CHSM: 从化石门森林公园。

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和鼎湖山($19.52 \pm 5.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与其余 4 个样地差异显著,而鹤山土壤与城区样地差异不显著。郊区森林土壤 C 含量均显著高于城市森林土壤(表 1)。

6 个样地表层土壤(0~10 cm) N 含量差异显著($P<0.001$)(图 2C)。郊区样地鹤山($1.16 \pm 0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与城区样地白云山($1.33 \pm 0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、帽峰山($1.34 \pm 0.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)差异不显著,与从化石门森林公园($2.92 \pm 0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和鼎湖山($2.31 \pm 0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)N 含量差异显著,郊区森林土壤 N 含量高于城区。10~20 cm 土壤 N 含量城郊差异显著($P=0.01$)(表 1),N 含量最大值是郊区从化石门森林公园($1.68 \pm 0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),城区最大值是白云山($0.69 \pm 0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),在均值上城区($0.52 \pm 0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)<郊区($1.25 \pm 0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。郊区森林土壤 N 含量均显著高于城市森林土壤(表 1)。

6 个样地表层土壤(0~10 cm)P 含量差异显著($P<0.001$)(图 2D),在城郊梯度上差异不显著($P=0.266$),郊区表层土壤(0~10 cm)P 含量($0.21 \pm 0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)略高于城区($0.15 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),呈现郊区高于城区的趋势(表 1)。而 6 个样地间 10~20 cm 土层差异显著($P<0.001$),郊区样地鼎湖山($0.24 \pm 0.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高,而从化石门($0.10 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)最低。郊区森林土壤 P 含量均高于城区(表 1)。

2.3 土壤 C : N、C : P、N : P

6 个样地表层土壤(0~10 cm)C : N 差异显著($P=0.004$)(图 3A),10~20 cm 土层分布($P<0.001$)与 0~10 cm 土层一致,而两个土层在城郊上差异均不显著($P=0.210, P=0.947$),表层土壤 C : N 郊区略高于城区,10~20 cm 土层却呈现城区略高于郊区格局(表 2)。6 个样地土壤 C : P 在表层土壤(0~10 cm)中呈显著差异($P<0.001$)(图 3B),郊区从化石门(314.30 ± 66.23)显著高于其余 5 个样地,10~20 cm 土层分布($P<0.001$)与表层土

表 2 城郊梯度上土壤 C、N、P 比值
Table 2 Soil C, N, and P ratios along the urban-suburb gradient

土层(cm)	梯度	C : N	C : P	N : P
0~10	城区	16.91±3.54 a	106.83±33.47 a	7.73±4.00 a
	郊区	16.97±2.33 a	188.26±40.80 b	10.33±5.58 a
10~20	城区	16.63±2.80 a	67.35±12.90 a	4.05±1.75 a
	郊区	14.06±2.67 a	137.09±42.24 b	9.19±7.04 b

同列不同层次不同小写字母表示城郊间差异显著($P<0.05$)。

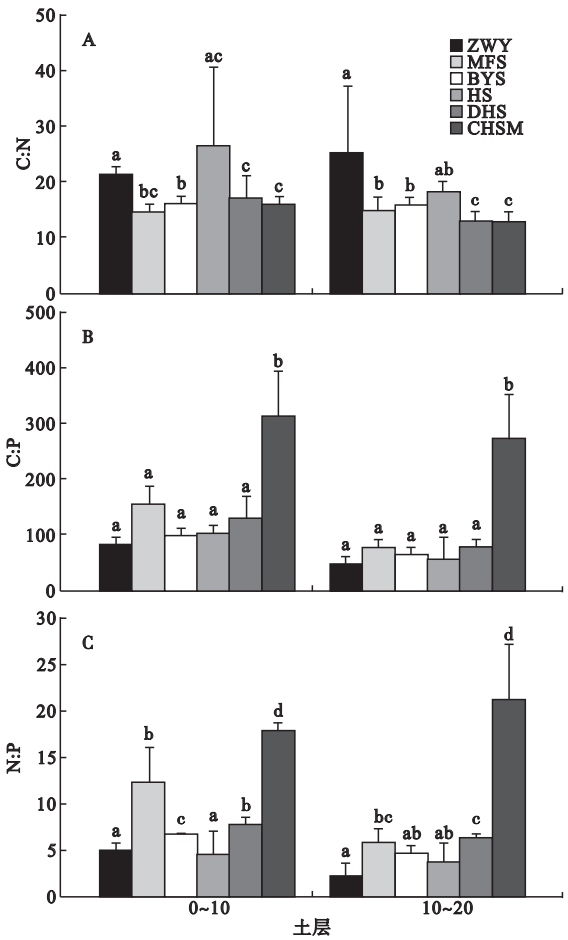


图 3 不同森林土壤 C : N、C : P、N : P
Fig.3 Ratios of C : N, C : P, and N : P in different forest soil
ZWY: 华南植物园; BYS: 白云山; MFS: 帽峰山; HS: 鹤山; DHS: 鼎湖山; CHSM: 从化石门森林公园。

壤一致,在两个土层上郊区森林土壤 C : P 均远高于城区(表 2)。6 个样地土壤 N : P 在两个土层均呈显著差异(图 3C)($P<0.001, P<0.001$),但表层土壤在城郊上差异不显著($P=0.084$),而 10~20 cm 土层差异显著($P<0.001$),郊区森林土壤 N : P 高于城区(表 2)。

3 讨论

3.1 城郊梯度上亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 含量

郊区森林土壤 C 含量高于城区(图 2B,表 1),表明城市化使亚热带季风常绿阔叶林土壤 C 积累能力下降。这与 Chen 等(2013)关于广东省城郊梯度上森林土壤有机碳的研究结果一致。城区森林土壤 C 流失增强是 C 含量下降的可能原因(Chen et al., 2014)。城市化导致城区温度显著高于郊区,

提高土壤微生物活性,促进森林土壤 C 的分解,不利于土壤 C 的积累。另外,土壤 C 输入量减少也是城市森林 C 含量下降的可能原因。土壤有机碳主要来源于凋落物和细根,城市化导致细根含量下降 (Chen *et al.*, 2013),减少了土壤 C 的供给。虽然较高的城区温度和 CO₂ 浓度促进地上植被生长,然而其凋落物分解的速率也相应提高,甚至抵消了其对土壤有机碳输入的贡献率 (Pouyat *et al.*, 2002)。

郊区森林土壤 N 含量高于城区 (图 2C, 表 1), 这与赵哲霞等 (2010) 对南昌市城乡梯度上的森林土壤研究一致,表明城市化使城区森林土壤 N 输出增强。城区森林土壤微生物的反硝化作用增强是土壤 N 输出增强的可能原因。相对高温的城区使土壤微生物活性增加,异养型细菌的反硝化作用增强,加快了土壤含 N 产物离开内部生物循环的过程 (陈伏生等, 2004)。另外,土壤 N 流失增强也是城区森林土壤 N 含量低于郊区的可能原因, pH 值相对较高和湿润的城区森林土壤 N 的硝化速率高于郊区森林土壤 (余明泉等, 2009; 张威等, 2010), 使硝态铵更容易从林地中流失 (孟盈等, 2001)。

城郊之间森林土壤 P 含量偏低且差异不显著, 这主要是因为低纬度的南亚热带森林是土壤 P 含量缺乏的区域 (Houlton *et al.*, 2008), 但呈现郊区森林土壤高于城区的趋势 (图 2D, 表 1), 表明城市化使城区森林土壤 P 流失增强。淋溶强烈是城区森林土壤 P 流失的可能原因。城市化较强的降雨和较高的温度使地表地下径流携带的可溶性磷增多 (赵琼等, 2005), 也加快了土壤的风化速率和磷元素的淋溶, 导致土壤全 P 含量的降低。微生物磷含量活性增强可能是城区森林土壤 P 流失的原因。城市化使土壤环境因子改变, 土壤微生物磷活性增强, 使其更容易矿化为植物有效磷 (谢林花等, 2004), 从而直接被植物吸收。

3.2 城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、

N、P 比值特征

土壤 C : N 与有机质分解速度成反比关系 (王绍强等, 2008)。城郊之间两个土层的 C : N 差异均不显著 (表 2), 而 6 个样地之间 C : N 在两个土层中差异显著。在两个土壤层次中, 郊区样地鹤山与城区样地植物园土壤 C : N 均高于其余 4 个样地, 表明植物园和鹤山的有机质矿化速率下降。土壤 N 含量不足可能是植物园和鹤山土壤 C : N 偏高的可能原因。有机质的矿化速率与土壤微生物呼吸强度有关, 而微生物在呼吸的过程中需要大量消耗土壤中的碳和氮 (周焱等, 2009)。本研究中, 植物园和鹤山的 N 含量均低于其余 4 个样地, 土壤 N 含量相对不足, 使微生物的矿化作用下降, 导致其有机质矿化速率下降。本研究发现, 土壤 C : N 与土壤 pH 值呈显著正相关 (表 3), 较高的土壤 pH 是城区样地植物园土壤矿化速率下降的可能原因。在 6 个样地中, 植物园 pH 值最高。城市化使大量碱性污染物侵入以及大量的人类活动导致植物园土壤偏碱化, 不利于土壤活性碳氮的积累 (陶晓等, 2011), 减缓了土壤有机质的矿化速率。

土壤 C : P 是碳素与磷素总质量的比值, 能够显示土壤有机质组成和质量程度, 也是表示磷有效性高低的一个重要指标, 而磷有效性主要受土壤有机质的分解速率影响 (王绍强等, 2008)。土壤 C : P 与 C 呈极显著正相关, 与 P 呈显著负相关 (表 3), 城区森林土壤 C : P 低于郊区, 表明城市化使城区森林土壤有机质质量下降, 磷的有效性升高。本研究发现, 城区森林土壤 C 含量远低于郊区, P 含量城郊差异不大, 故城区 C : P 值低于郊区, 城区森林土壤人为干扰强度高于郊区, 使其有机质质量下降。磷素固定作用减弱是城区森林土壤磷有效性升高的可能原因。城市化进程使大量碱性灰尘进入到土壤, 土壤酸度降低, 减少磷素固定作用的同时, 增加 Fe-P、Al-P 的溶解, 从而提高磷的有效性 (孙桂芳

表 3 土壤 pH 值、C、N、P 含量及化学计量比之间的相关系数
Table 3 Correlation coefficients among soil pH C, N, P contents and stoichiometric ratios

	C	N	P	C : N	C : P	N : P
pH	-0.411 **	-0.430 **	-0.185	0.293 **	-0.187	-0.496
C		0.947 **	0.206	-0.137	0.696 **	0.580 **
N			0.204	-0.337 **	0.724 **	0.685 **
P				-0.034	-0.248 *	-0.273 *
C : N					-0.226 *	-0.357 **
C : P						0.962 **

* P≤0.05; ** P≤0.01。

等, 2011)。

土壤 N、P 含量的大小在一定程度上调节着植物 N : P 的大小 (Hogan *et al.*, 2010), 所以 N : P 用来表征植物受 N、P 养分的限制格局 (He *et al.*, 2008)。Jensen 等 (1965) 指出, 土壤氮磷比低, 土壤磷活性高。郊区森林土壤 N : P 高于城区 (图 3C, 表 2), 城区土壤 P 含量低于郊区, 表明城市化加剧了南亚热带森林土壤缺磷的状况, 使土壤磷活性升高。本研究中, 土壤 C : P 与 N : P 呈显著正相关 (表 3), 而土壤 C : P 城区高于郊区, 表明城市化加强了南亚热带的森林土壤磷的活性和有效性, 使生态系统内部磷的输入和输出受到影响。

4 结 论

珠江三角洲南亚热带森林表层土壤 (0~10 cm) 和 10~20 cm 土层 C、N 含量差异显著且城区均低于郊区, 但表层土壤 P 含量城郊差异不显著, 10~20 cm 土层差异显著, 呈现郊区高于城区趋势; 在化学计量比方面, 两个土层 C : N 城郊差异不显著, 而 C : P 差异显著且城区低于郊区, 表层土壤 N : P 城郊差异不显著而 10~20 cm 差异显著, 呈现郊区高于城区趋势。总体来看, 城市化进程使南亚热带森林土壤营养元素循环发生显著改变, 降低了城市森林生态系统结构与功能的稳定性。而城市化对森林生态系统营养元素循环的影响还需进一步结合凋落物和微生物进行深入研究。

参考文献

陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 2004. 森林土壤氮素的转化与循环. 生态学杂志, **23**(5): 126-133.

李 伟, 张华英, 魏安世, 等. 2013. 广东省森林景观形状特征相关性分析. 中南林业科技大学学报, **33**(9): 67-71.

孟 盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 2001. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. 植物生态学报, **25**(1): 99-104.

孙桂芳, 金继运, 石元亮. 2011. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, (2): 1-9.

陶 晓, 徐小牛, 石 雷. 2011. 城市土壤活性碳、氮分布特征及影响因素. 生态学杂志, **30**(12): 2868-2874.

肖辉林. 1999. 气候变化与土壤有机质的关系. 土壤与环境, **8**(4): 300-304.

谢林花, 吕家珑, 张一平. 2004. 长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响. 生态学杂志, **23**(4): 65-68.

杨 昆, 管东生. 2007. 珠江三角洲地区森林生物量及其动态. 应用生态学报, **18**(4): 705-712.

余明泉, 杜天真, 陈伏生. 2009. 城乡梯度森林土壤原易位 N 矿化. 林业科学研究, **22**(1): 69-74.

王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, **28**(8): 3937-3943.

张 威, 张旭东, 何红波, 等. 2010. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展. 生态学杂志, **29**(4): 783-789.

张甘霖. 2005. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护. 科技导报, **23**(3): 16-19.

张金屯, Pickett STA. 1999. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响. 生态学报, **19**(5): 654-658.

赵 航, 贾彦龙, 王秋凤. 2014. 中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量学特征. **34**(4): 803-814.

赵 琼, 曾德慧. 2005. 陆地生态系统磷循环及其影响因素. 植物生态学报, **29**(1): 153-163.

赵哲霞, 郭恢财. 2010. 城市化对城乡梯度森林土壤微生物数量变化的影响. 安徽农业科学, **38**(10): 5188-5190.

周 焱, 徐宪根, 王 丰, 等. 2009. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、生物呼吸及其商值. 生态学杂志, **28**(2): 265-269.

Chen H, Zhang W, Gilliam F, *et al.* 2013. Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forests along an urban-to-rural gradient of southern China. *Biogeosciences*, **10**: 6619-6616.

Chen FS, Yavitt Joseph, Hu XF. 2014. Phosphorus enrichment helps increase soil carbon mineralization in vegetation along an urban-to-rural gradient, Nanchang, China. *Applied Soil Ecology*, **75**: 181-188.

Cusack DF. 2013. Soil nitrogen levels are linked to decomposition enzyme activities along an urban-remote tropical forest gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, **57**: 192-203.

Elser JJ, Bracken ME, Cleland EE, *et al.* 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in fresh-water, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, **10**: 1135-1142.

George K, Ziska LH, Bunce JA, *et al.* 2007. Elevated atmospheric CO₂ concentrations and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment*, **41**: 7654-7665.

He JS, Wang L, Flynn DFB, *et al.* 2008. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, **155**: 301-310.

Hogan EJ, Minnullina G, Smith RI, *et al.* 2010. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen:phosphorus relationships in *Cladonia portentosa*. *New Phytologist*, **186**: 911-925.

Houlton BZ, Wang YP, Vitousek PM, *et al.* 2008. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. *Nature*, **454**: 327-330.

Jensen H. 1965. Nonsymbiotic nitrogen fixation// Bartholomew WV, Clark FE, eds. Soil Nitrogen. Madison: American Society of Agronomy: 436-480.

Lai R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**: 1623-1627.

McDonnell MJ, Pouyat RV, Zipper WC, *et al.* 1997. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient. *Urban Ecosystems*, **1**: 21-36.

Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, *et al.* 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, **116**: 107-118.

Schipper LA, Percival HJ, Sparing GP. 2004. An approach for estimating when soils will reach maximum nitrogen storage. *Soil Use and Management*, **20**: 281-286.

UNDESA/PD. 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER. A/352). New York: United Nations Press.

作者简介 何俊杰, 男, 1993 年生, 本科生, 地理科学专业, 研究方向土壤生态学. E-mail: 2808799319@qq.com
责任编辑 张 敏