

# 城市化对珠江三角洲存留常绿阔叶林土壤 有机碳组分及其碳库管理指数的影响

张雪莹<sup>1</sup>, 陈小梅<sup>1</sup>, 危晖<sup>2</sup>, 林媚珍<sup>1</sup>

(1. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510483)

**摘要:** 通过对珠江三角洲城区(植物园、白云山、帽峰山)和郊区(鹤山、从化石门、鼎湖山)存留的6个常绿阔叶林进行调查, 分析城市化对存留森林土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响。在选择的样地按0—10, 10—20 cm 分层采集土壤样品, 并测定土壤总有机碳(TOC)、易氧化有机碳(ROC)和不易氧化有机碳(NROC)。结果表明: (1) 城区森林土壤的 TOC、ROC 和 NROC 含量显著低于郊区( $P < 0.05$ )。 (2) 在0—10 cm 层次, 城区森林土壤碳库的活度和活度指数显著高于郊区( $P < 0.05$ ); 在10—20 cm, 城区森林土壤碳库的活度和活度指数也高于郊区, 但差异不显著。 (3) 在0—10, 10—20 cm, 郊区森林土壤的碳库指数和碳库管理指数显著高于城市森林( $P < 0.05$ )。城市化导致存留常绿阔叶林土壤有机碳活性增加, 但不利于土壤总有机碳积累。

**关键词:** 常绿阔叶林; 土壤有机碳; 土壤有机碳组分; 碳库管理指数; 城市化

中图分类号: S714; X144

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0184-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.04.030

## Effect of Urbanization on Soil Organic Carbon Fractions and Carbon Pool Management Index in Remnant Evergreen Broad-leaved Forests of the Pearl River Delta

ZHANG Xueying<sup>1</sup>, CHEN Xiaomei<sup>1</sup>, WEI Hui<sup>2</sup>, LIN Meizhen<sup>1</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006;

2. College of Natural Sources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510483)

**Abstract:** In order to reveal effect of urbanization on soil organic carbon fractions and carbon pool management index, soil samples collected from six remnant evergreen broad-leaved forests in the Pearl River Delta were analyzed. The six sampling areas included three urban forests (botanical garden, Baiyunshan and Maofengshan) and three suburb ones (Heshan, Conghuashimen and Dinghushan). Soil samples were collected from 0—10 cm and 10—20 cm soil layers, respectively, and total organic carbon (TOC), readily oxidizable organic carbon (ROC) and non-readily oxidizable organic carbon (NROC) of the samples were determined. Results were as follows: (1) TOC, ROC and NROC content of urban forests soil was significantly lower than that of the suburban forests soil ( $P < 0.05$ ). (2) In the surface soil (0—10 cm layer), soil carbon pool activity and carbon pool activity index of the urban forests were both significantly higher than those of the suburban forests ( $P < 0.05$ ), and in the sub-surface soil (10—20 cm layer), the above pattern was also observed but there was no significant difference in both indices between these two kinds of forests ( $P > 0.05$ ). (3) In both two soil layers, soil carbon pool index and carbon pool management index of suburban forests were both significantly higher than those of urban forests ( $P < 0.05$ ). This study suggests that urbanization increased soil organic carbon activity of the remnant evergreen broad-leaved forests, but urbanization was detrimental to the accumulation of total organic carbon in soil.

**Keywords:** evergreen broad-leaved forests; soil organic carbon; soil organic carbon fractions; carbon pool management index; urbanization

收稿日期: 2017-03-11

资助项目: 广州市属高校科技计划项目(1201430746); 国家自然科学基金项目(31400415); 广东省普通高校青年创新人才项目(2014KQNCX110)

第一作者: 张雪莹(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳稳定性研究。E-mail: 591210177@qq.com

通信作者: 陈小梅(1985—), 女, 福建南安, 博士, 副教授, 主要从事全球变化与森林生态系统过程研究。E-mail: chxm-009@163.com

随着城市化进程加剧,森林呈现破碎化与退化现象<sup>[1]</sup>,城市中存留的森林在维持城市生态系统稳定、保护城市生态安全中发挥着关键作用。城市小气候的形成以及人类干扰、环境污染等因素改变了城市及其周边存留森林的植被土壤特征。土壤有机碳作为土壤质量评价的一个重要指标,其含量和组分变化可以反映城市化对存留森林土壤质量的影响程度。

土壤有机碳是由活性有机碳和惰性有机碳等不同形态碳组成的复合体<sup>[2-3]</sup>。其中活性有机碳主要由动植物残体分解物、微生物菌丝、微生物及其产物组成,易被分解氧化<sup>[4]</sup>,例如易氧化有机碳、轻组有机碳和可溶性有机碳等。由于活性有机碳对环境响应灵敏,能指示土壤有机碳的早期变化,因此在表征土壤碳库变化方面,常基于活性有机碳来计算土壤碳库活度指数、碳库管理指数。碳库活度指数可以反映土壤有机碳的组分的变化情况和稳定性<sup>[5]</sup>。碳库管理指数则结合了土壤碳库指标和土壤碳库活度指标,即不仅能反映土壤有机碳组分的变化情况,还能反映外界环境变化对土壤有机碳总量的影响,能较全面反映外界环境变化对土壤有机碳性质的影响<sup>[6]</sup>。

目前土壤碳库活度指数和碳库管理指数主要应用于农田管理、土地利用变化、植被恢复等领域<sup>[5-7]</sup>,在森林生态系统方面主要应用于研究森林植被恢复、人工林和经济林管理等对土壤有机碳的质量影响<sup>[8-10]</sup>。龚伟等<sup>[8]</sup>对川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库研究发现,天然常绿阔叶林人工更新后土壤总有机碳、活性有机碳、碳库管理指数等均下降,土壤碳库管理指数的变化能够较好地表征土壤肥力变化;王谢等<sup>[10]</sup>通过分析土壤有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳、碳库活度、碳库管理指数等指标变化来探索人工开窗对川中丘陵区柏木低效林土壤有机碳稳定性的影响。以往的研究表明土壤碳库活度指数和碳库管理指数能够较好地指示环境变化背景下森林土壤有机碳质量变化趋势。而目前关于城市化对森林土壤有机碳的影响研究主要集中于分析其土壤微生物、总有机碳及其组分<sup>[11-12]</sup>。陈帅等<sup>[11]</sup>通过对比北京城区与郊区的森林发现,郊区森林土壤微生物碳含量显著高于城区;Chen等<sup>[12]</sup>关于广东省城郊梯度上的马尾松林研究发现城区松林土壤总有机碳、重组有机碳含量显著低于近郊区和远郊区,但轻组有机碳差异不显著。因此,关于城市化背景下存留森林土壤有机碳质量等方面的研究仍有待进一步深入。

综上所述,本文以高度城市化的珠江三角洲地区为研究中心,以城—郊梯度上存留的地带性森林——常绿阔叶林为研究对象,通过测定其土壤总有机碳及其组分,研究存留常绿阔叶林土壤有机碳对城市化的

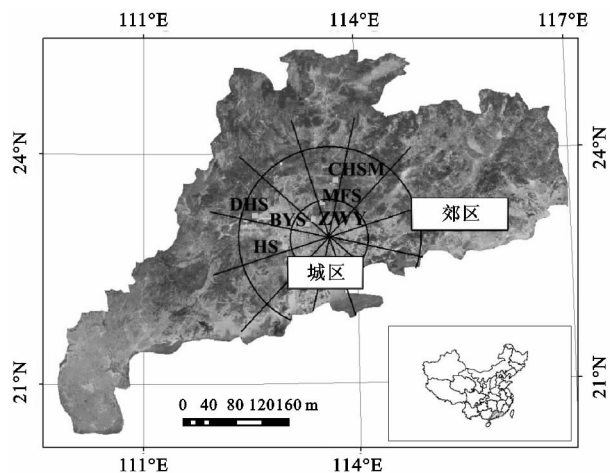
响应规律,并结合分析碳库活度指数和碳库管理指数在城郊梯度上的变化,旨为城市存留森林的经营与管理提供量化评价的指标和方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样地选取

1.1.1 研究区概况 珠江三角洲位于广东省中南部(21°17.6′—23°55.9′N,111°59.7′—115°25.3′E),属亚热带海洋性季风气候。该区域多年平均降雨量达1 800 mm,多年平均气温为22℃,雨热同季。地带性土壤主要为发育于砂岩、页岩和花岗岩母质上的红壤,地带性植被为亚热带季风常绿阔叶林。

1.1.2 样地选取 利用多源遥感影像,根据大气氮沉降、气温和前期土壤污染监测等数据,实地调查后选择以珠江三角洲城区为核心区,将珠江三角洲森林划分为2个梯度(图1):(1)城区0~65 km,珠江三角洲核心区延伸至65 km;(2)郊区65~130 km<sup>[12-13]</sup>。在每个等级区域内,将其平均划分为12个面积相同的斑块,随机选取3个斑块内的常绿阔叶林作为研究样地<sup>[12-13]</sup>。本项目共选取6个样地,具体为城区的植物园、帽峰山、白云山,郊区的鹤山、鼎湖山和从化石门森林公园。



注:DHS为鼎湖山;HS为鹤山;BYS为白云山;ZWY为植物园;MFS为帽峰山;CHSM为从化石门森林公园。

图1 森林样地分布

选取的6个样地的群落特征见表1。

2015年1月,在上述6个样地,分别选取坡度(20°~30°)、坡向(东南向)、海拔(200~400 m)类似的区域,每个区域内建立5个5 m×5 m样方,共建立30个样方。样方选取标准:森林群落为典型常绿阔叶林;面积不小于1 hm<sup>2</sup>,距离主干道不小于1 km;在近30年内未受直接、严重的自然或人为干扰<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集 2015年1月,在上述6个样地的每个样方内选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两个分层钻取土

壤样品,每层 5 钻,并装入已消毒的塑料袋,带回实验  
室,共计 58 个样品。将土样放至通风处干燥,待自然

风干后,剔除石块、根系等杂物,过 100 目筛(径级为  
149  $\mu\text{m}$ )以备测土壤有机碳、易氧化有机碳。

表 1 森林样地群落特征

	样地	林龄/a	郁闭度	优势物种(乔木)
城区	植物园	约 30	68%	荷木( <i>Schima superba</i> )
	帽峰山	大于 50	80%~85%	荷木( <i>Schima superba</i> )
	白云山	大于 60	90%	荷木( <i>Schima superba</i> )
郊区	鼎湖山	约 400	90%以上	荷木( <i>Schima superba</i> ); 锥栗( <i>Castanopsis chinensis</i> ); 厚壳桂( <i>Cryptocaryachinesis</i> )等
	鹤山	30	90%	荷木( <i>Schima superba</i> )
	从化石门森林公园	大于 70	90%以上	华润楠( <i>Machilus chinensis</i> ); 锥栗( <i>Castanopsis chinensis</i> ); 荷木( <i>Schima superba</i> )等

1.2.2 样品测定 土壤 C 采用重铬酸钾—外加热法测定;土壤全 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。具体方法参考《土壤农化分析》<sup>[14]</sup>。易氧化有机碳为能被 333 mmol/L 高锰酸钾氧化的有机碳。具体测定方法为:取过 100 目筛,约含有 15~30 mg 有机碳的风干土样,装入 100 mL 离心管中,加 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液 25 mL,密封瓶口,以 250 r/min 振荡 1 h,空白和土壤样品一样。振荡后的样品以 2 500 r/min 离心 5 min,然后取上清液用去离子水按 1 : 250 稀释,在 565 nm 的分光光度计上比色,根据高锰酸钾的消耗量,可求出土壤样品易氧化有机碳含量。不易氧化有机碳的含量即为土壤总有机碳扣除易氧化有机碳含量<sup>[15]</sup>。

1.3 土壤碳库管理指数计算<sup>[5]</sup>

碳库活度(A)=土壤易氧化有机碳含量(g/kg)/土壤不易氧化有机碳含量(g/kg)

碳库活度指数(AI)=样品碳库活度(A)/参考土壤碳库活度

碳库指数(CPI)=样品总有机碳含量(g/kg)/参考土壤总碳含量(g/kg)

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100

以鼎湖山的土壤样品为参考土壤。本研究选取的鼎湖山样地位于鼎湖山自然保护区核心区域,是有着近 400 年保护历史的南亚热带地带性植被,该群落处于由阳性植物占优势的森林向中生性和耐阴性植物占优势的演替顶极群落类型演变的最后阶段<sup>[16]</sup>。

1.4 统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行整理和制图。采用独立样本 T 检验判断城郊梯度上土壤总有机碳、易氧化有机碳、不易氧化有机碳和碳库管理指数的差异;利用单因素方差分析法(LSD 法)判断 6 个不同样地土壤总有机碳、易氧化有机碳、不易氧化有机碳和碳库管理指数之间的差异

( $P<0.05$ );利用 Pearson 相关系数对土壤有机碳及其组分、全氮、全磷、碳库活度、碳库活度指数、碳库指数、碳库管理指数之间进行相关分析( $P<0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 城郊梯度上森林土壤总有机碳、易氧化有机碳、不易氧化有机碳变化趋势

从图 2A、图 3A 可以看出,郊区森林土壤的总有机碳(TOC)含量显著高于城区( $P<0.05$ )。距离珠江三角洲中心较远的鼎湖山和从化石门森林公园的土壤总有机碳含量显著高于位于城市中心的植物园、帽峰山和白云山;近郊区的鹤山的表层土壤(0—10 cm)总有机碳含量显著高于植物园,但与帽峰山和白云山差异不显著( $P>0.05$ )。这可能是由于鹤山位于城郊交界处附近,林龄较小,土壤理化性质介于远郊与城区之间。

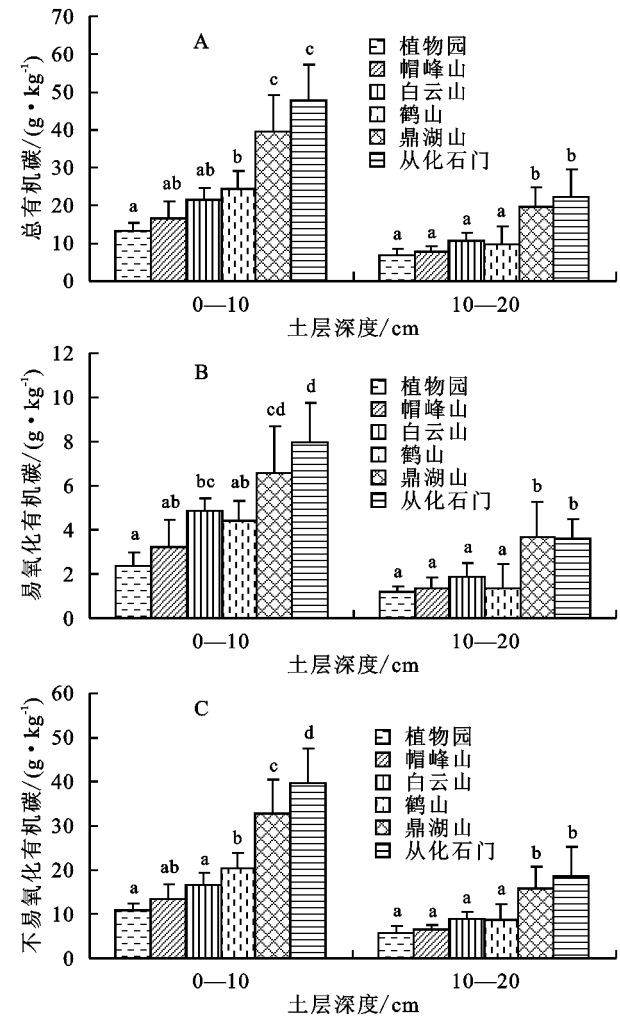
森林土壤易氧化有机碳(ROC)的分布趋势与土壤总有机碳一致:郊区森林土壤的 ROC 含量显著高于城区( $P>0.05$ ,图 3B)。郊区从化石门森林表层土壤(0—10 cm)ROC 含量最高,显著高于城区的植物园、帽峰山和白云山;郊区鼎湖山的 ROC 含量显著高于植物园和白云山(图 2B)。在土壤 10—20 cm,从化石门和鼎湖山森林土壤的 ROC 含量均显著高于植物园、帽峰山和白云山。

森林土壤不易氧化有机碳(NROC)含量的分布趋势与 TOC、ROC 类似:郊区森林土壤的 NROC 含量显著高于城区(图 2C,图 3C)。对于 0—10 cm 土壤,远郊区的鼎湖山和从化石门的土壤 NROC 含量显著高于城区的植物园、帽峰山和白云山;近郊区的鹤山土壤 NROC 含量明显高于城区的 3 个森林。在 10—20 cm 层次,鼎湖山和从化石门的 NROC 含量显著高于其他森林。

2.2 城郊梯度上森林土壤碳库管理指数分析

由表 2、表 3 可以看出,在表层土壤(0—10 cm)城区森林土壤的碳库活度和碳库活度指数高于郊区。尤其城区的白云山其碳库活度和碳库活度指数显著高于郊区的鹤山、鼎湖山和从化石门。在 10—20

cm,城区的森林土壤的碳库活度和碳库活度指数高于郊区,但差异不显著( $P>0.05$ )。

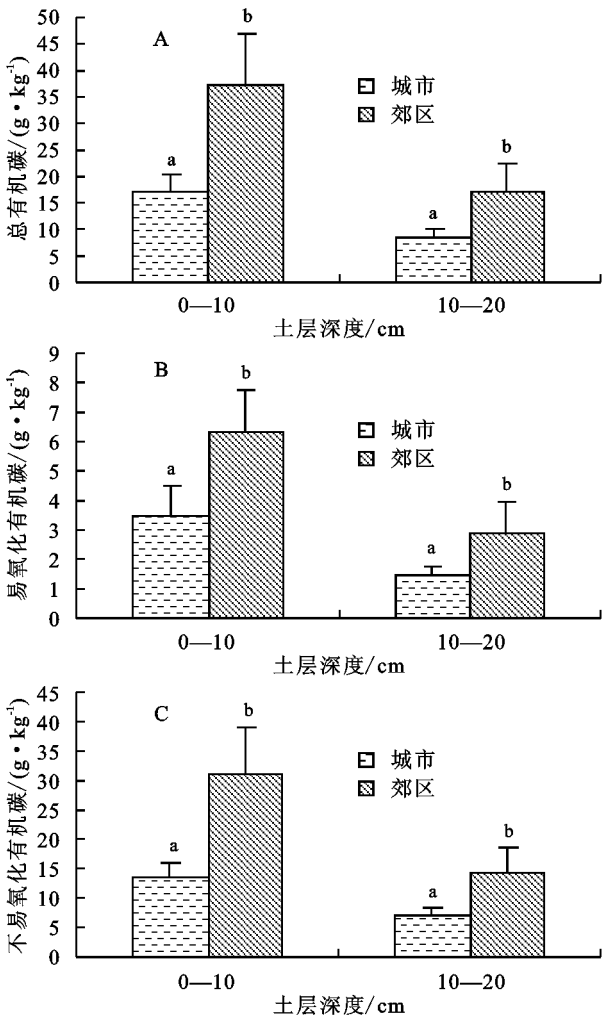


注:同土层内不同森林样地不同小写字母表示样地间差异显著( $P<0.05$ )。

图 2 城—郊梯度上 6 个不同森林样地土壤总有机碳、易氧化有机碳、不易氧化有机碳含量分布

与土壤碳库活度和碳库活度指数相反,城区森林土壤的碳库指数和碳库管理指数显著低于郊区(表 3)。在 0—10 cm,远郊区鼎湖山、从化石门的土壤碳库指数显著高于城区的植物园、帽峰山、白云山;位于近郊区的鹤

山土壤碳库指数也显著高于城区的植物园,但与城区的帽峰山和白云山差异不显著。远郊区的从化石门森林 0—10 cm 土壤碳库管理指数显著高于城区的 3 个森林;鼎湖山 0—10 cm 土壤的碳库管理指数显著高于城区的植物园和帽峰山。在 10—20 cm,远郊区鼎湖山和从化石门森林土壤的碳库指数和碳库管理指数均显著高于城区的 3 个森林,而近郊区的鹤山与城区的差异不显著。



注:同土层内不同小写字母表示城市和郊区差异显著( $P<0.05$ )。

图 3 城市与郊区常绿阔叶林土壤总有机碳、易氧化有机碳、不易氧化有机碳含量对比

表 2 城—郊梯度上 6 个不同森林样地土壤碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数

土层深度/cm	样地	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CPMI
0—10	植物园	0.22±0.04a	1.09±0.18a	0.33±0.05a	37.11±10.71a
	帽峰山	0.24±0.06a	1.21±0.29a	0.42±0.11ab	43.90±17.48ab
	白云山	0.30±0.04b	1.50±0.19b	0.54±0.08ab	60.96±21.07bcd
	鹤山	0.19±0.03a	0.96±0.15a	0.62±0.12b	35.11±32.25ac
	鼎湖山	0.20±0.02a	1.00±0.10a	1.00±0.25c	101.69±34.38de
	从化石门	0.20±0.02a	1.01±0.12a	1.21±0.24c	122.59±28.81e
10—20	植物园	0.21±0.06a	1.10±0.32a	0.35±0.09a	37.73±9.35a
	帽峰山	0.20±0.05a	1.06±0.23a	0.40±0.09a	43.90±17.48a
	白云山	0.21±0.04a	1.08±0.19a	0.55±0.11a	60.96±21.07a
	鹤山	0.12±0.05b	0.63±0.26b	0.50±0.24a	35.30±32.25a
	鼎湖山	0.19±0.08ab	1.00±0.42ab	1.00±0.27b	128.20±42.89b
	从化石门	0.20±0.06a	1.06±0.30a	1.14±0.37b	114.57±28.81b

注:同土层内不同森林样地不同小写字母表示样地间差异显著( $P<0.05$ )。

表 3 城市与郊区常绿阔叶林土壤碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数对比

土层深度/cm	样地	碳库活度 A	碳库活度指数 AI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CPMI
0—10	城市	0.25±0.04a	1.27±0.211a	0.43±0.11a	56.58±22.13a
	郊区	0.20±0.01b	0.99±0.03b	0.94±0.30b	94.88±31.66b
10—20	城市	0.20±0.00a	1.08±0.02a	0.44±0.10a	47.53±12.03a
	郊区	0.17±0.04a	0.90±0.23a	0.88±0.34b	92.69±50.17b

注：同土层内不同小写字母表示城市和郊区差异显著( $P<0.05$ )。

2.3 森林土壤碳库管理指数与土壤有机碳及其组分以及 N、P 含量的耦合关系

珠江三角洲地区的快速城市化使森林土壤养分、土壤理化性质发生了显著变化。黄柳青<sup>[17]</sup>关于城市化影响下存留南亚热带常绿阔叶林环境因子变化的相关研究以及何俊杰等<sup>[13]</sup>关于城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 化学计量特征的研究证实了这一趋势(表 4)。本文利用 Pearson 相关系数对森林土壤碳库管理指数与土壤有机碳及其组分以及 N、P 含量之间的耦合关系进行相关分析(表 5)，结果表明，土壤有机碳及其组分间呈现极显著正相关，与除全磷(TP)以外的其他指标均存在显著或极显著相关关系。全氮(TN)与全磷(TP)之间呈极显

著相关。碳库活度(A)、碳库活度指数(AI)虽与其余各指标之间相关性未达显著水平，但与易氧化有机碳(ROC)显著相关。碳库指数(CPI)、碳库管理指数(CPMI)除与 TN 呈显著相关、与 TP 含量相关性未达显著水平外，与其余各指标均为极显著相关。

表 4 城市与郊区土壤 C、N、P 含量对比<sup>[13]</sup>

单位:g/kg				
土层深度/cm	样地	C	N	P
0—10	城市	17.13±3.04a	1.11±0.30a	0.15±0.04a
	郊区	37.15±7.99b	2.31±0.41b	0.21±0.06a
10—20	城市	8.51±1.72a	0.52±0.14a	0.12±0.01a
	郊区	17.15±5.75b	1.25±0.29b	0.16±0.02b

注：同土层内不同小写字母表示城市和郊区差异显著( $P<0.05$ )。

表 5 森林土壤碳库管理指数与土壤有机碳及其组分以及 N、P 含量的相关分析( $n=55$ )

项目	TOC	ROC	NROC	TN	TP	A	AI	CPI	CPMI
TOC		0.953	0.998	0.397	0.154	0.033	0.013	0.811	0.693
ROC	* *		0.931	0.435	0.226	0.306	0.285	0.741	0.784
NROC	* *	* *		0.384	0.136	-0.026	-0.046	0.816	0.665
TN	* *	* *	* *		0.865	0.207	0.192	0.292	0.313
TP	ns	ns	ns	* *		0.225	0.213	0.034	0.126
A	ns	*	ns	ns	ns		0.999	-0.024	0.480
AI	ns	*	ns	ns	ns	* *		-0.023	0.483
CPI	* *	* *	* *	*	ns	ns	ns		0.843
CPMI	* *	* *	* *	*	ns	* *	* *	* *	

注：上三角为相关性系数，下三角为 P 值，其中 \* 表示差异达显著水平( $P<0.05$ )；\* \* 表示差异达极显著水平( $P<0.01$ )；ns 表示未通过显著性检验( $P>0.05$ )。

3 讨论

3.1 城市化对存留常绿阔叶林土壤总有机碳及其组分的影响

城市化显著降低了存留常绿阔叶林土壤总有机碳、易氧化有机碳(ROC)和不易氧化有机碳(NROC)含量(图 2)。ROC 属于活性有机碳，主要来源于动植物残体，易被氧化分解，对环境响应灵敏。珠江三角洲的城区温度明显高于郊区<sup>[18]</sup>，较高的温度可能导致森林土壤动植物残体分解加快<sup>[19]</sup>，不利于易氧化有机碳的积累。NROC 属于惰性有机碳，周转周期慢、对环境变化响应缓慢，其量的积累是一个长期的过程。本研究所选的郊区森林—鼎湖山和从化石门森林的林龄均大于市区的 3 个森林，森林发育越久，更有利于其土壤惰性有机碳积累。另外，土壤微生物优先利用活性有机碳<sup>[20]</sup>，而郊区较高易氧化有机碳含量则有利于其惰性有机碳的保存。城区森林

土壤有机碳含量低于郊区，这与 Chen 等<sup>[12]</sup>关于珠江三角洲地区松林土壤有机碳含量沿城郊梯度的变化趋势一致。城市森林土壤细根生物量下降<sup>[12]</sup>和土壤分解速率加快都是其土壤总有机碳含量下降的可能原因。且郊区森林的郁闭度高，抵御强降水冲刷的能力高于城市森林，其土壤有机碳因强降水而导致的淋溶、地表径流流失水平较低。

3.2 城市化对存留常绿阔叶林土壤碳库活度指数的影响

城市森林土壤碳库活度和碳库活度指数显著高于郊区(表 2)。土壤碳库活度是活性有机碳和非活性有机碳含量的比值，它和碳库活度指数与土壤易氧化有机碳(ROC)均呈显著相关(表 5)，都可以用来反映土壤有机碳的活跃程度，碳库活度和活度指数越大，表示有机碳越易被微生物分解<sup>[5]</sup>。这表明城市森林土壤有机碳的活跃度高于郊区，有机碳易被微生物分解，不利于土壤有机碳的积累。本研究关于有机碳组分的研究结

果与之一致:城市化降低了土壤总有机碳及其活性和惰性组分。城市森林受人为干扰比郊区森林高,森林郁闭度小于郊区,可能形成城市森林高温、低湿度的小气候环境<sup>[21]</sup>,促进了有机碳分解。

### 3.3 城市化对存留常绿阔叶林土壤碳库管理指数的影响

城市森林土壤的碳库指数和碳库管理指数均显著低于郊区森林(表3)。碳库指数和碳库管理指数是反映和检测土壤有机碳变化的指标,较全面地反映环境变化对土壤各组分有机碳在量和质上的变化<sup>[6]</sup>。土壤有机碳量的微小变化可能引起大气中CO<sub>2</sub>浓度的巨大改变<sup>[22]</sup>,而活性有机碳是土壤环境变化的敏感指标,氮、磷是植物生长的必需矿质营养元素和生态系统常见的限制性元素<sup>[23]</sup>,这些都表明了土壤C、N、P含量在表征城市森林生态系统动态变化及稳定性方面具有重要意义。通过相关性分析(表5),发现土壤碳库指数、碳库管理指数与土壤有机碳及其组分以及N、P等土壤养分元素整体相关性较强,其中可能由于低纬度的南亚热带森林是土壤P含量缺乏的区域所以土壤碳库管理指数与土壤TP含量相关性不显著<sup>[24]</sup>。

城市化过程中由于人类活动及土地利用变化造成土壤资源锐减,由于污染物和废弃物的不合理处理造成严重土壤污染,以及土壤肥力下降、土壤生物多样性破坏等环境问题日趋严重,土壤碳库管理指数对城市森林土壤环境具有重要的衡量与指示作用。孟令涵等<sup>[25]</sup>对深圳不同建成区密度和植被类型下绿地土壤的分析发现,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,而土壤容重较高。方晰等<sup>[26]</sup>采用 Hakanson 潜在生态危害指数法研究长沙城郊森林土壤发现从郊区到城区7种重金属含量均提高,城市中心区森林土壤重金属污染加重,已达中等生态危害程度。结合本文研究结果与黄柳菁<sup>[17]</sup>关于城市化背景下环境变化对存留南亚热带常绿阔叶林的影响机制分析结果,发现珠江三角洲地区存留森林土壤理化性质城乡梯度变化显著,表现为城区土壤容重较高,孔隙度减少,土壤旱化情况较郊区严重,结合以上珠江三角洲地区存留森林以C、N、P含量为表征的土壤养分变化趋势,共同反映了城市化发展可能促使该区域森林土壤肥力及土壤质量下降,这与本文基于城乡梯度上碳库管理指数的变化趋势的分析结果一致。碳库管理指数可以用来反映土壤经营和管理的科学性,可用于表征土壤肥力以及土壤性质变化<sup>[5]</sup>。研究区域碳库管理指数随着城乡梯度不断下降,表明不同的土地利用与经营管理方式可能导致土壤肥力下降,土壤性质向恶性方向发展。

## 4 结论

(1)珠江三角洲地区存留常绿阔叶林土壤有机碳及其组分在0—10,10—20 cm两个土壤层次上均呈现城乡梯度变化,总有机碳(TOC)含量表现为从化石门森林公园>鼎湖山>鹤山>白云山>帽峰山>植物园。城区森林土壤总有机碳、易氧化有机碳和不易氧化有机碳的含量显著低于郊区( $P<0.05$ )。

(2)在0—10 cm层次,城区森林土壤碳库的活度和活度指数显著高于郊区( $P<0.05$ );在10—20 cm,城区森林土壤碳库的活度和活度指数也高于郊区,但差异不显著。城市森林的土壤总有机碳碳库活度和活度指数高于郊区森林,表明城市化加剧了土壤有机碳分解,不利于总有机碳积累。

(3)在0—10,10—20 cm,郊区森林土壤的碳库指数和碳库管理指数显著高于城市森林( $P<0.05$ )。通过对森林土壤碳库管理指数与土壤有机碳及其组分以及N、P含量进行相关分析,并结合城市化对珠三角地区常绿阔叶林理化性质的影响的相关研究,证明了土壤碳库管理指数能较全面地反映土壤质量变化,可作为衡量与监测土壤经营和管理科学性的量化指标。综上所述,在珠江三角洲地区,城市化进程改变了城市森林土壤有机碳组分及其碳库管理指数。城市森林土壤碳库指数和碳库管理指数显著下降,表明了城市化可能促使城市存留森林土壤有机碳质量下降。

### 参考文献:

- [1] 尹锴,赵千钧,崔胜辉,等.城市森林景观格局与过程研究进展[J].生态学报,2009,29(1):389-398.
- [2] Bradford M A, Fierer N, Reynolds J F. Soil carbon stocks in experimental mesocosms are dependent on the rate of labile carbon, nitrogen and phosphorus inputs to soils[J]. Functional Ecology, 2008, 22(6): 964-974.
- [3] Dungait J A J, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [4] Rovira P, Jorba M, Romanyà J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils[J]. Biology Fertility of Soils, 2010, 46(4): 355-369.
- [5] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等.不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响[J].水土保持研究, 2008, 15(3): 61-64.
- [6] 郭宝华,范少辉,杜满义,等.土地利用方式对土壤活性碳库和碳库管理指数的影响[J].生态学杂志, 2014, 33(3): 723-728.
- [7] 吕瑞珍,熊瑛,李友军,等.保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J].水土保持学报, 2014, 28(4): 206-209.
- [8] 龚伟,胡庭兴,王景燕,等.川南天然常绿阔叶林人工更

- 新后土壤碳库与肥力的变化[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [9] 王谢, 李贤伟, 范川, 等. 林分改造初期整地行为对土壤有机碳、氮和微生物量碳氮及土壤碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 193-198.
- [10] 王谢, 李贤伟, 范川, 等. 人工开窗面积大小对柏木低效林土壤有机碳含量及碳库管理的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 177-182.
- [11] 陈帅, 王效科, 逯非. 城市与郊区森林土壤微生物群落特征差异研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 614-620.
- [12] Chen H, Zhang W, Gilliam F, et al. Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forest along an urban-to-rural gradient of southern China[J]. Biogeosciences, 2013, 10(7): 6609-6616.
- [13] 何俊杰, 陈小梅, 冯思红, 等. 城郊梯度上亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 591-596.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-168.
- [15] 陈小梅, 刘菊秀, 邓琦, 等. 降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1210-1216.
- [16] 欧阳学军, 周国逸, 魏识广, 等. 亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1688-1694.
- [17] 黄柳菁. 城市化影响下存留亚热带常绿阔叶林群落特征及其与环境因子关联研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [18] 窦浩洋, 张晶晶, 赵昕奕. 珠江三角洲城市热岛空间分布及热岛强度研究[J]. 地域研究与开发, 2010, 29(4): 72-77.
- [19] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温级及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7071-7079.
- [20] Hagedorn F, Spinnler D, Bundt M, et al. The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO<sub>2</sub> [J]. Global Change Biology, 2003, 9(6): 862-872.
- [21] 黄承标, 韦善华, 秦武明. 不同年龄灰木莲人工林对林内小气候的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(11): 1-5.
- [22] 吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6686-6693.
- [23] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [24] Houlton B Z, Wang Y P, Vitousek P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. Nature, 2008, 454(7202): 327-30.
- [25] 孟令涵, 曾辉, 熊燕梅, 等. 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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(5): 899-907.
- [26] 方晰, 唐志娟, 田大伦, 等. 长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7595-7606.
- (上接第 134 页)
- [13] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695-4704.
- [14] 史薪钰, 陈梦华, 齐国辉, 等. 片麻岩山地土壤团聚体分布及养分特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 172-175.
- [15] 高飞. 不同秸秆覆盖量对宁南旱作农田土壤水肥及作物产量的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [16] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025-1030.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34, 74-76.
- [18] 张英利, 许安民, 尚浩博, 等. AA3 型连续流动分析仪测定土壤和植物全氮的方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 128-132.
- [19] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 720-728.
- [20] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 276-284.
- [21] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 秸秆和地膜覆盖对旱作玉米田土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 405-413.
- [22] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226-233.
- [23] 张赛, 王龙昌, 杜娟, 等. 西南“早三熟”区不同作物和秸秆覆盖对土壤团聚体及固碳潜力的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 98-107.
- [24] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1423-1430.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [26] Kirkby C A, Kirkegaard J A, Richardson A E, et al. Stable soil organic matter: A comparison of C : N : P : S ratios in Australian and other world soils[J]. Geoderma, 2011, 163(3): 197-208.