

文章编号: 1671-4229(2014)03-0073-07

广州市土壤与植被碳蓄积及其空间格局分析

吴志峰^{1 2}, 黄银华^{1 2}, 姜春^{2 3}

(1. 广州大学地理科学学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 以广州市为研究区,在遥感与GIS技术的支持下,基于广东省第2次土壤普查数据和2000年ETM+遥感数据,提取广州市土壤数据和遥感影像数据,采用土壤类型法和植被指数法分别计算广州市的土壤与植被碳蓄积,并分析其空间格局及相关性.结果表明:①广州市土壤有机碳储量0~20 cm为 2.16×10^7 t,0~100 cm为 6.40×10^7 t;广州市土壤有机碳平均密度0~20 cm为 $32.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,0~100 cm为 $94.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$.②广州市植被碳储量为 5.75×10^7 t,平均碳密度为 $160.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;不同植被类型平均碳密度:针叶林($178.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 阔叶林($164.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 园地($106.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 灌木($8.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 草地($0.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$).③广州市土壤有机碳密度南部高于中部和北部,土壤有机碳储量则呈现北高南低的分布特征;广州市植被碳密度较高的区域位于植被保护较好的风景区和郊区,中心城区土壤有机碳库和植被碳库都较低.④土壤有机碳储量与植被碳储量在空间上具有正相关关系,植被碳储量高的区域,其土壤有机碳储量也高.表层(0~20 cm)土壤有机碳储量与植被碳储量的相关性大于深层(0~100 cm)土壤.

关键词: 土壤; 植被; 碳蓄积; 空间格局; 广州市

中图分类号: S 159.2

文献标志码: A

以全球气候变暖为主要特征的全球气候变化引起了许多科学家对全球和区域碳循环以及碳储量的研究^[1-4].陆地生态系统碳循环又是全球碳循环中最复杂、受人类活动影响最大的部分,土壤和植被作为陆地生态系统碳库的两大主要组成部分,倍受研究者的重视^[5-8].

近20 a来,随着城市化进程的加快,城市土地利用类型发生很大变化,许多城市土壤被固封,这引起了许多学者对城市土壤碳库的关注和研究.波亚特等研究了纽约等城市的城乡梯度和土地利用类型对城市生态系统中土壤碳库的影响^[9];何跃等以南京市为对象,研究了功能区之间土壤有机碳和黑碳含量的差异^[10];孙艳丽等对开封市城市土壤有机碳含量研究表明,城市土壤有机碳随城市土壤年龄增加而增加,随深度的增加而降低,土地利用方式的变化可以改变有机碳在土壤中的贮存与分布^[11].

目前关于植被碳储量的研究,较多的是对森林生态系统研究^[7-8,12-13],王淑君等利用1990、1997、2000年3个时相的TM数据对广州市森林碳储量的时空演变进行研究,结果表明,广州市3种森林类型(阔叶林、针叶林、园地)的碳储量均呈上升趋势,3个时期的森林碳储

量在空间上均存在较强的正相关关系^[14].而关于城市植被生态系统的研究还比较缺乏.城市植被是吸收CO₂维护城市生态系统健康的重要生物成分,对于人口高度集中的城市来说,城市的植被情况与城市的环境质量息息相关,在城市日益发展扩大的今天,城市植被的碳储量在碳循环中的作用已不容忽视.

随着城市化发展过程的加快,城市用地面积不断增加,大面积的土壤景观和植被景观被坚硬的不透水面所取代,使得城市中土壤和植被碳库在城市化背景下呈下降趋势^[15].对城市土壤和植被碳储量情况进行调查研究,摸清城市碳库本底值,能够了解城市碳库在全球碳循环中的地位,能够更好地理解人类社会经济活动对碳循环的驱动作用,并为城市的碳管理提供依据^[9,16-17].

通过广州市土壤和植被碳储量的空间格局及相关性进行分析,了解广州市碳库的空间分布特征,能够为城市规划和城市生态环境建设提供科学参考.

1 材料和方法

1.1 研究区概况

广州市(E112°57'~114°03',N22°26'~23°56')位于

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171446);广州市属高校“羊城学者”科研资助项目(12A002G)

作者简介: 吴志峰(1969-),男,教授,博士. E-mail: gzuwzf@163.com

广东省中南部,珠江三角洲的北缘,接近珠江流域下游入海口,全市面积 7 434.4 km².地势东北高,西南低,属南亚热带季风气候,气温高、降水多,年平均气温 21.9 °C,年平均降水量 1 696.5 mm.管辖区域包括越秀区、天河区、荔湾区、黄浦区、海珠区、白云区、南沙区、番禺区、花都区、萝岗区及增城区、从化区^[18].

1.2 数据来源与处理

土壤数据来源于广东省 1:20 万土壤类型图、广东省第二次土壤普查后出版的《广东土种志》和《广东土壤》,共摘录了 223 个代表不同土种的典型剖面数据,包括典型土壤剖面分层的有机质含量、土壤容重、土层厚度和面积等数据^[19-21].利用广州市边界矢量图对广东省土壤类型图进行裁剪,得到广州市的土壤类型图(图 1a,见封二).研究区土壤类型共 7 个土类、14 个亚类和 42 个土属,917 个图斑,扣除了水体及裸露岩石的面积后,可以得出广州市土壤总面积为 6 741.98 km²,占广州市总面积的 90.69%.

植被数据包括植被类型数据和植被指数数据.植被类型数据来源于 2000 年广东省 1:10 万土地利用现状图,植被指数数据来源于 2000 年 9 月 14 日 Landsat ETM+(122/44,122/43)的两景遥感影像.利用 ArcGIS 从土地利用现状图中提取植被信息,得到广州市植被类型图(图 1b,见封二).利用 ENVI 遥感软件对 ETM+ 遥感影像进行预处理,包括影像几何校正、拼接、裁剪.

1.3 研究方法

1.3.1 土壤碳估算方法

土壤碳储量中土壤有机碳碳储量占主要部分,土壤有机碳密度是指单位面积上一定深度的土层中土壤有机碳的储量.目前国内外对土壤有机碳密度的研究方法有土壤类型法、植被类型法、生态系统类型法、模型法等^[22].土壤类型法是利用每个土壤剖面的有机质含量、容重等数据,根据土壤类型、土壤亚类、土属、土种等分类层次去聚合土壤剖面数据,该方法以其简单、数据可靠准确且比较容易获得而成为目前有机碳密度估算的常用方法,本文采用土壤类型法^[21,23-24].土壤剖面有机碳密度的计算模型如下:

$$DOC = SOC \times r \times H_i \times 10^{-1} \quad (1)$$

$$SOC = 0.58 \times SOM \quad (2)$$

其中,DOC 为土壤剖面有机碳密度(tC·hm⁻²),SOC 为有机碳含量(g·kg⁻¹),r 为土种平均容重(g·cm⁻³),H 为土层厚度(cm),SOM 为有机质含量,0.58 为有机质转换为有机碳的平均换算系数.

1.3.2 植被碳估算方法

利用遥感影像各波段的光谱特征,结合比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)和归一化植被指数

(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),对不同植被类型的生物量进行估算,从而得到植被碳储量.本文植被碳储量的计算不考虑农田,只包括常绿阔叶林、常绿针叶林、园地、灌木、草地等 5 类.

(1) 生物量计算

生物量的计算不考虑地下部分,只计算地上部分植被的生物量.

常绿阔叶林和常绿针叶林生物量计算方法参考郭志华等^[25]模型如下:

$$B(t \cdot \text{hm}^{-2}) = 720(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times V(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}) / 1\,000(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}) \quad (3)$$

B 为生物量, V 为材积. V 的计算模型分为常绿阔叶林和常绿针叶林两种.

常绿阔叶林材积:

$$V = -33\,354.7 + 25\,4148.1/\text{TM3} + 7\,360.3\ln(\text{TM3}) \quad (4)$$

常绿针叶林材积:

$$V = 9\,870.2 + 86.9\text{TM3} - 3\,669.2\ln(\text{TM3}) + 3.2(\text{TM1} + \text{TM2} + \text{RVI}) \quad (5)$$

园地生物量估算参考赵丽琼等^[26]模型如下:

$$B = 2\,117.532 \times (\text{NDVI})^2 - 804.994 \times (\text{NDVI}) + 116.379 \quad (6)$$

灌木和草地生物量估算参考杨昆等^[27]模型如下:

$$Y_g = -35.67 + 1\,333.32(\text{PH}) \quad (7)$$

$$Y_c = 11.65 + 4.25(\text{PH}) \quad (8)$$

Y_g 和 Y_c 分别为单位面积灌木和草地的生物量(t·hm⁻²), P 为盖度(%), H 为高度(m).

(2) 碳储量估算

植被碳储量由植被生物量乘以植被的含碳率得来,植被的含碳率常采用 0.5^[14],即

$$\text{碳储量} = \text{生物量} \times 0.5 \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 广州市土壤碳蓄积

2.1.1 土壤有机碳密度、碳储量特征

广州市土壤有机碳密度随土壤类型、土层深度的不同而差异较大.如表 1 所示 0~20 cm 土层深度的土壤有机碳密度最大值 68.76 t·hm⁻²,最小值 26.96 t·hm⁻²,平均值 32.06 t·hm⁻²;0~100 cm 土层深度的土壤有机碳密度最大值 170.67 t·hm⁻²,最小值 78.31 t·hm⁻²,平均值 94.91 t·hm⁻².

从各土类 0~20 cm 有机碳密度来看,黄壤有机碳密度最高,达 68.76 t·hm⁻²,其次是石灰土,为 52.67 t·hm⁻²,最低的是赤红壤,为 26.96 t·hm⁻².各土类 0~

100 cm 有机碳密度特征表现为:黄壤有机碳密度最高, 达 $170.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 其次是红壤、水稻土, 分别为 $112.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $110.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最低的是石灰土, 为 $78.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表1 广州市不同土壤类型土壤有机碳密度、碳储量
Table 1 The SOC density and storage of different soil types in Guangzhou

土壤类型	面积/hm ²	面积比/%	土壤有机碳密度/(t·hm ⁻²)		土壤有机碳储量/t	
			0~20 cm	0~100 cm	0~20 cm	0~100 cm
水稻土	261 992.06	38.86	37.03	110.63	9 702 815.87	28 983 781.65
潮土	19 923.93	2.96	34.13	109.37	680 008.51	2 179 143.60
赤红壤	351 823.85	52.18	26.96	79.63	9 483 588.09	28 016 390.52
红壤	30 533.00	4.53	37.78	112.29	1 153 575.50	3 428 557.05
黄壤	5 933.12	0.88	68.76	170.67	407 971.99	1 012 579.60
石灰土	1 737.54	0.26	52.67	108.69	91 509.58	188 849.86
石质土	2 254.23	0.33	41.22	78.31	92 919.51	176 529.03
全市	674 197.73	100.00	32.06	94.91	2 1612 389.04	63 985 831.32

广州市 0~20 cm 土层深度的土壤有机碳储量为 $2.16 \times 10^7 \text{ t}$, 0~100 cm 土层深度的土壤有机碳储量为 $6.40 \times 10^7 \text{ t}$ (表1)。从各土类 0~20 cm 有机碳储量来看, 水稻土有机碳储量最高, 达 $9.70 \times 10^6 \text{ t}$, 其次是赤红壤, 为 $9.48 \times 10^6 \text{ t}$, 两者由于面积大, 分别占广州市土壤总面积的 38.86%、52.18%, 故其有机碳储量大, 分别占广州市土壤有机碳储量的 44.89%、43.88%; 最低的是面积最小的石灰土, 为 $9.15 \times 10^4 \text{ t}$, 其次是石质土和黄壤, 分别为 $9.29 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $4.08 \times 10^5 \text{ t}$, 石灰土、石质土、黄壤面积分别占广州市土壤总面积的 0.26%、0.33%、0.88%, 有机碳储量分别占广州市土壤有机碳储量的 0.42%、0.43%、1.89%。从各土类 0~100 cm 有机碳储量来看, 排在第一、二位的依然是水稻土和赤红壤, 分别为 $2.90 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $2.80 \times 10^7 \text{ t}$, 分别占广州市土壤有机碳储量的 45.30%、43.79%。最低的是石质土, 为 $1.77 \times 10^5 \text{ t}$ 。

由此可见, 水稻土和赤红壤对广州市土壤有机碳库的贡献最大。赤红壤碳密度低, 但其面积大, 若能提高赤红壤的碳密度, 将能很大程度地提高整个广州市的土壤有机碳储量。黄壤虽然在两种土层深度碳密度最高, 但由于其面积较小, 故其有机碳储量也低, 对广州市土壤有机碳库贡献较小。

2.1.2 土壤有机碳密度、碳储量空间格局特征

从图2(见封二)可见, 广州市 0~20 cm 和 0~100 cm 两种土层深度的土壤有机碳密度在空间分布上基本是南部高于中部和北部, 即番禺区和南沙区的土壤有机碳密度较高, 中部和北部的土壤有机碳密度较低, 北部只有边界周边黄壤分布的小区域土壤碳密度较高。番禺区和南沙区地势平坦, 且多位于河流下游, 三角洲, 便于发展耕作业, 土壤类型多为水稻土, 故土壤有机碳密度较高。中部和北部赤红壤面积广布, 碳密度较低。

从图3可见, 广州市 0~20 cm 和 0~100 cm 两种土层深度的土壤有机碳储量呈现明显的北高南低的现象,

从化区北部的土壤有机碳储量最高, 花都区北部、增城区北部以及萝岗区的土壤有机碳储量也较高, 市中心和番禺区、南沙区的土壤有机碳储量最低。位于中心城区的广州老八区, 由于城市化程度高, 许多土壤被破坏、固封, 其土壤有机碳储量较低。番禺区和南沙区虽然土壤碳密度高, 但由于常年耕种, 土层较薄, 加上区域内河网比较密集, 土壤受河流冲刷, 使得该地区的土壤有机碳总量最少。而从化区、增城区和花都区因其森林覆盖度较高, 森林面积较广, 在植被的保护下, 土壤有机碳保存得比较好, 其土壤碳总量最高。

2.2 广州市植被碳蓄积

2.2.1 植被碳储量、碳密度

广州市植被总碳储量为 $5.75 \times 10^7 \text{ t}$, 其中常绿阔叶林总碳储量为 $3.04 \times 10^7 \text{ t}$, 针叶林为 $2.22 \times 10^7 \text{ t}$, 园地为 $4.86 \times 10^6 \text{ t}$, 灌木为 $3.01 \times 10^3 \text{ t}$, 草地为 89.01 t (表2)。常绿阔叶林、常绿针叶林和园地 3 种植被类型碳储量总和占广州市植被总碳储量的 99.99%, 是广州市植被碳库的主要组成部分, 这是由于这 3 种植被类型面积占广州市植被面积的 99.43%, 且其碳密度远大于灌木和草地(表2)。王淑君等^[14]对广州市 1997 年森林碳储量的计算结果为: 碳总量为 $7.07 \times 10^6 \text{ t}$, 其中常绿阔叶林为 $2.79 \times 10^6 \text{ t}$, 常绿针叶林为 $3.39 \times 10^6 \text{ t}$, 园地为 $8.86 \times 10^5 \text{ t}$ 。由于本研究范围涉及整个广州市的植被(农田除外), 且采用的估算模型不同, 故在总量估算方面, 结果上与前者存在差异, 但空间分布变化趋势相似, 今后可在大量地面验证前提下进行相互校验, 提高全市范围的植被碳库估算精度。

广州市植被碳密度随植被类型的不同而差异较大, 如表2所示, 植被碳密度最大值 $178.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最小值 $0.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均值 $160.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。广州市不同植被类型平均碳密度为: 常绿针叶林 > 常绿阔叶林 > 园地 > 灌木 > 草地, 分别为 $178.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $164.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $106.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

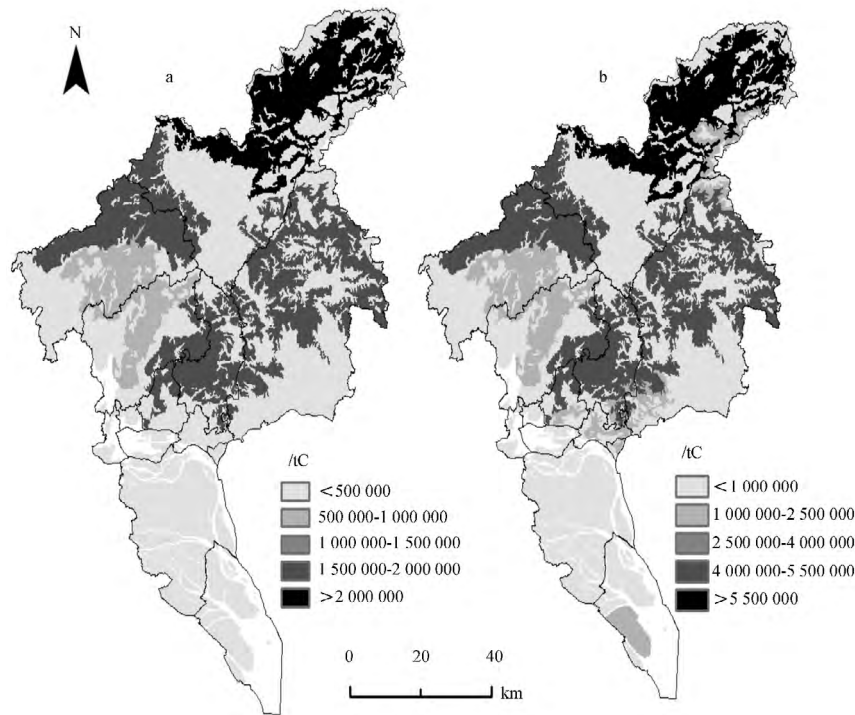


图 3 广州市 0~20 cm、0~100 cm 土壤有机碳储量
Fig. 3 The SOC storage of 0~20 cm(a) and 0~10 cm(b)

表 2 广州市植被碳密度及碳储量

Table 2 The vegetation carbon density and carbon storage of Guangzhou

植被类型	面积/ hm^{-2}	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量/t
常绿阔叶林	184 693.00	164.68	30 415 500.00
常绿针叶林	124 739.00	178.00	22 203 800.00
园地	45 780.10	106.23	4 863 200.00
灌木	748.64	8.04	3 009.52
草地	1 271.57	0.13	89.01
总计	35 7232.31	160.92	57 485 598.53

2.2.2 植被碳蓄积空间分布格局

从图 4 可见,广州市植被碳密度高的区域较少,且呈零星状分布.广州市植被碳密度较大的区域位于:白云区东部、萝岗区、增城区中部以及西南靠近萝岗区部分、花都区中偏北部分(呈东西走向的条带状分布)、从化区南部(特别是靠近花都区部分).从植被碳储量上看,如图 5 所示,广州各区植被碳储量为:从化区>增城区>花都区>萝岗区>白云区>番禺区>天河区>南沙区>黄埔区>越秀区>海珠区>荔湾区.

从化区是广州市植被面积最大的行政区域,植被面积占广州市植被面积的 41.55%,其碳储量位于广州市各区之首.增城区和花都区的植被面积在广州市各区植被面积中分别排第二、三位,植被碳储量也在广州市各

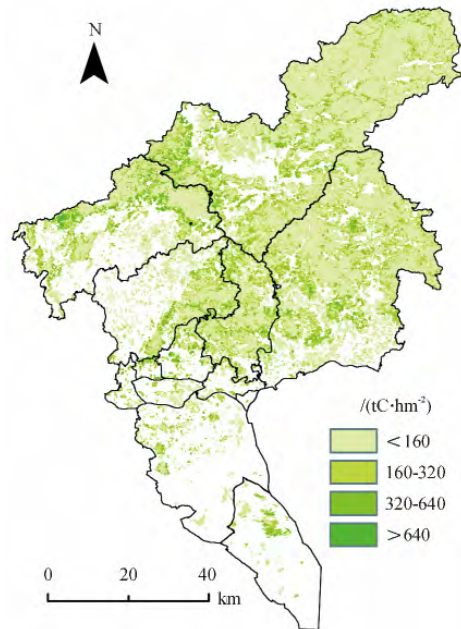


图 4 广州市植被碳密度分布图
Fig. 4 The vegetation carbon density of Guangzhou

区中居第二、三位.萝岗区在 2000 年城市开发程度不高,植被覆盖较好,故植被碳储量也较大.白云区东部是白云山风景区、帽峰山森林公园所在地,植被受人类保护,植被覆盖度高,故植被碳密度高,但其植被面积位居广州市各区植被面积第 5 位,碳储量居于广州市各区碳储量的中间位置.

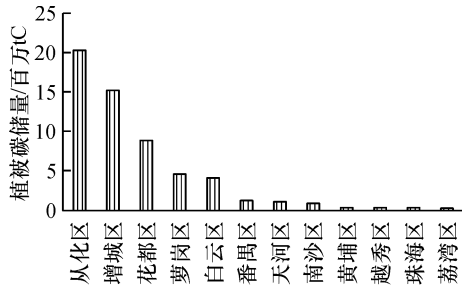


图 5 广州市各区植被碳储量

Fig. 5 The vegetation carbon storage of Guangzhou districts

广州市中心由于开发程度高, 植被受到人类的干扰和破坏比较严重, 植被覆盖面积小, 故其植被碳储量也小。番禺区、南沙区由于地形平坦、河网密布、水源充足, 形成了许多土壤肥沃的三角洲, 适合发展耕作业, 故本地区农田面积较广, 而本文考虑的植被类型面积较小, 因此其碳储量也较小。

2.3 广州市土壤有机碳储量与植被碳储量相关性分析

在广州市土壤有机碳储量和广州市植被碳储量计算结果的基础上, 分析广州市土壤有机碳储量与植被碳储量之间的相关关系。用广州市植被类型图裁剪广州市土壤类型图, 获取植被覆盖下的土壤数据, 得到广州市植被-土壤图。计算每一土壤斑块的植被碳总量, 将结果链接到广州市植被-土壤图的属性表中, 导出数据表。在 Excel 中选取植被碳储量和土壤 0~20 cm、0~100 cm 有机碳储量 3 个字段, 分析土壤有机碳储量与植被碳储量之间的相关关系, 删除部分异常点后, 得到广州市 0~20 cm、0~100 cm 土壤有机碳储量与植被碳储量散点图(图 6~7)。

对广州市 0~20 cm、0~100 cm 土壤有机碳储量与植被碳储量进行线性相关性分析, 得到两种土层深度土壤有机碳储量与植被碳储量的线性方程分别为

$$y_1 = 0.184x_1 + 279.3 (R_1^2 = 0.817, P_1 < 0.001) \quad (10)$$

$$y_2 = 1.026x_2 + 10870 (R_2^2 = 0.683, P_2 < 0.001) \quad (11)$$

由两个线性方程可知, 两种土层深度土壤有机碳储量都与植被碳储量在空间上存在正相关关系, 即是说植被碳储量高的区域, 其土壤有机碳储量也高。

如式(10)、式(11)所示, $R_1^2 > R_2^2$, 说明表层(0~20 cm)土壤有机碳储量与植被碳储量的相关性大于 0~100 cm 土层深度。土壤上部的 O 层与覆盖其上的植被有很大关系, 植被覆盖度高, 生物量大, 凋落物多, O 层的有机质含量越大, 对表层土壤有机碳的积累贡献越大; O 层对土壤有机碳含量的影响随土层深度的增加而减弱, 土层深度越深, 土壤有机碳含量越低。因此, 植被碳储量的高低对表层土壤有机碳储量的影响更大。

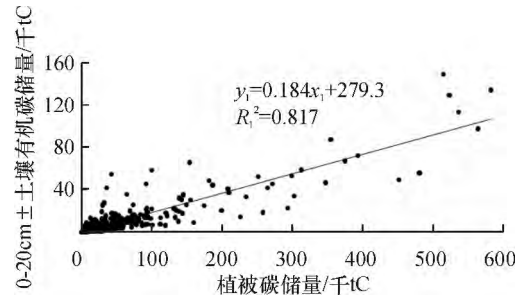


图 6 广州市 0~20 cm 土壤有机碳储量与植被碳储量散点图

Fig. 6 The scatter of SOC storage(0~20 cm) and vegetation carbon storage in Guangzhou

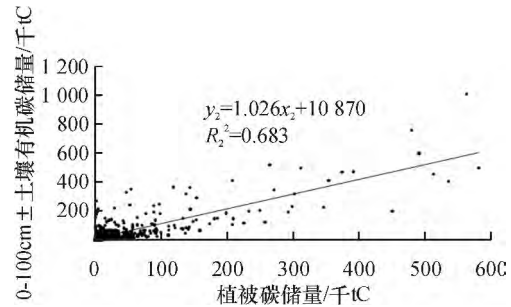


图 7 广州市 0~100 cm 土壤有机碳储量与植被碳储量散点图

Fig. 7 The scatter of SOC storage(0~100 cm) and vegetation carbon storage in Guangzhou

3 结 论

(1) 广州市土壤有机碳密度随着土壤类型、土层深度变化具有很大的空间变异性, 且 0~100 cm 土层深度的土壤有机碳密度不同, 土类之间的差异大于 0~20 cm 土层深度。

(2) 广州市主要土壤类型为赤红壤和水稻, 水稻土有机碳储量最高, 分别占 0~20 cm、0~100 cm 土壤总碳储量的 44.89%、45.30%, 对广州市土壤有机碳储量的贡献最大, 建议加强对水稻土的合理利用, 保护广州市土壤碳库和粮食生产安全; 赤红壤碳密度较低, 但其面积分布广, 占广州市土壤总面积的 52.18%, 若能提高赤红壤的碳蓄积能力, 增加其碳密度, 将能很大程度地提高整个广州市范围内的土壤有机碳总储量。

(3) 广州市主要的植被类型是常绿阔叶林、常绿针叶林和果树经济林(园地), 其面积占广州市植被总面积的 99.43%, 3 种植被类型碳储量总和占广州市植被总碳储量的 99.99%, 是广州市植被碳库的主要组成部分。由于计算模型、数据源和研究范围的变化, 本文植被碳库估算结果与前人的计算结果存在差异, 需要进一步根据地面验证数据加以相互验证。

(4) 从空间格局来看, 广州市 0~20 cm 和 0~100 cm 两种土层深度的有机碳密度基本是南部高于中部和

北部,有机碳储量的分布则呈现出明显的北高南低的现象.广州市植被碳密度高的区域较少,且呈零星状分布,植被碳密度较高的区域位于植被保护较好的风景区和郊区.城市化程度高的地区,土壤有机碳库和植被碳库都总体较低.

(5)土壤有机碳储量与植被碳储量在空间分布上具有正相关关系,且表层(0~20 cm)土壤比深层(0~100 cm)土壤有机碳储量与植被碳储量的相关性更大.加强对植被的保护力度,不仅能够增加植被的碳储量,而且能有利于提高土壤有机碳储量.

参考文献:

- [1] WIGLEY T M L, SCHIMMEL D S E. The carbon cycle[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] SCHILESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20.
- [3] 查同刚, 张志强, 朱金兆, 等. 森林碳蓄积量估算方法及其应用分析[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 112-119.
ZHA T G, ZHANG Z Q, ZHU J Z, et al. Carbon storage and carbon cycle in forest ecosystem[J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2008, 6(6): 112-119.
- [4] SUN X, Yue T, FAN Z, et al. Spatiotemporal trends in global vegetation carbon storage[J]. *Res Sci*, 2013, 35(4): 782-791.
- [5] 朴世龙, 方精云, 黄耀. 中国陆地生态系统碳收支[J]. *中国基础科学*, 2010(2): 20-22.
PU S L, FANG J Y, HUANG Y. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *China Basic Sci*, 2010(2): 20-22.
- [6] 姜春, 吴志峰, 钱乐祥, 等. 广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 5118-5125.
JIANG C, WU Z F, QIAN L X, et al. Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province[J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(16): 5118-5125.
- [7] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [8] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2007, 37(6): 804-812.
Fang J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000[J]. *Sci China (Ser D: Earth Sci)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [9] POUYAT R, GROFFILLAN P, YESILONIS I, et al. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystem[J]. *Environ Poll*, 2002, 116: 107-118.
- [10] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 178-182.
HE Y, ZHANG G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing[J]. *Acta Pedol Sin*, 2006, 43(2): 178-182.
- [11] 孙艳丽, 马建华, 李灿. 开封市城市土壤有机碳含量和密度的变化分析[J]. *河南大学学报:自然科学版*, 2008, 38(5): 491-496.
SUN Y L, MA J H, LI C. Variations of the content and density of urban soil organic carbon in Kaifeng City[J]. *J Henan Univ: Nat Sci Edi*, 2008, 38(5): 491-496.
- [12] 王敏, 李贵才, 仲国庆, 等. 区域尺度上森林生态系统碳储量的估算方法分析[J]. *林业资源管理*, 2010(2): 107-112.
WANG M, LI G C, ZHONG G Q, et al. Integrating ecosystem process models, remote sensing and groundbased observations for regional-scale analysis of the carbon storage[J]. *Forest Res Manag*, 2010(2): 107-112.
- [13] 伏鸿峰, 闫伟, 陈晶晶. 内蒙古大兴安岭林区森林碳储量及其动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 166-170.
FU H F, YAN W, CHEN J J. Forest carbon storage and its dynamics in Da-Xing mountains of Inner Mongolia[J]. *J Arid Land Res Environ*, 2013, 27(9): 166-170.
- [14] 王淑君, 管东生, 黎夏, 等. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 778-785.
WANG S J, GUAN D S, LI X, et al. The temporal-spatial evolution and heterogeneity of forest carbon in Guangzhou, China[J]. *Acta Sci Circ*, 2008, 28(4): 778-785.
- [15] REN Y, WEI X, WEI X H, et al. Relationship between vegetation carbon storage and urbanization: A case study of Xiamen China[J]. *Forest Ecol Manag*, 2011, 261: 1214-1223.
- [16] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 189-204.
CHEN G S, TIAN H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems[J]. *J Plant Ecol*, 2007, 31(2): 189-204.
- [17] SETOA K C, GÜMERALPA B, HUTYRA L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools[J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2012, 109(40): 16083-16088.

- [18] 广州市统计局. 广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
Bureau of Statistics of Guangzhou Municipal. Guangzhou statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press 2009.
- [19] 广东省土壤普查办公室. 广东土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
Soil Survey Office of Guangdong Province. Guangdong soil species [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [20] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Soil Survey Office of Guangdong Province. Guangdong soil [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [21] 文雅, 黄宁生, 匡耀求. 广东省山区土壤有机碳密度特征及空间格局[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(增刊): 10-18.
WEN Y, HUANG N S, KUANG Y Q. Pattern and characteristics of soil organic carbon density in Mountain Area of Guangdong Province, China [J]. J Basic Sci Envir, 2010, 18(Suppl): 10-18.
- [22] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1077-1086.
XU X W, PAN G X, CAO Z H, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui Province of China [J]. Geogr Res, 2007, 26(6): 1077-1086.
- [23] SMITH J U, SMITH P, WATTENBACH M, et al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990-2080 [J]. Glob Chang Biol, 2005(11): 2144-2152.
- [24] 姜春. 基于小波的土壤有机碳密度与其影响因子的尺度相关分析[D]. 广州: 广州大学, 2011.
JIANG C. The scale-correlation analysis between soil organic carbon density and its influence factors based on wavelet [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011.
- [25] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量[J]. 生态学报, 2002, 22(11): 1832-1839.
GUO Z H, PENG S L, WANG B S. Estimating forest biomass in western Guangdong using Landsat TM data [J]. Acta Ecol Sin, 2002, 22(11): 1832-1839.
- [26] 赵丽琼. 北京山区森林碳储量遥感估测技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
ZHAO L Q. Remote sensing estimation of forest carbon stock in Beijing mountain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [27] 杨昆, 管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 705-714.
YANG K, GUAN D S. Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest [J]. Acta Ecol Sin, 2007, 27(2): 705-714.

Soil and vegetation carbon storage and its spatial pattern analysis of Guangzhou City, China

WU Zhi-feng^{1,2}, HUANG Yin-hua^{1,2}, JIANG Chun^{2,3}

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Institute of Eco-Environment and Soil Science, Guangzhou 510650, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Taking Guangzhou as a case study, this study was based on the soil data and remote sensing image that were derived from the second national soil survey data from Guangdong Province and ETM+ remote sensing data in 2000. By using the methods of soil types and vegetation index, we calculated the carbon storage in soil and vegetation, then quantified their spatial patterns and correlation. The results showed that: (1) The SOC storage was 2.16×10^7 t (0~20 cm) and 6.40×10^7 t (0~100 cm) in Guangzhou, while the mean SOC density was $32.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (0~20 cm) and $94.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (0~100 cm). (2) The vegetation carbon storage was 5.75×10^7 t, while its mean carbon density was 160.92 t/ha with difference among vegetation types: conifer forest ($178.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > broadleaf forest ($164.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > orchard ($106.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > shrub ($8.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > grassland ($0.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). (3) From the view of spatial pattern, the SOC density in the southern part of Guangzhou was higher than that in the center and northern part, but the SOC storage was just the opposite case. The area with higher vegetation carbon density was located in scenic and suburban areas with better vegetation protection. Both the soil and vegetation carbon storage were rather low in the central urban area. (4) The soil and vegetation carbon storage was spatially correlated which indicated the higher vegetation carbon storage, the higher SOC storage, and the correlativity with the surface soil carbon storage was stronger than that with the soil depth of 0~100 cm.

Key words: soil; vegetation; carbon storage; spatial pattern; Guangzhou City

【责任编辑: 陈 钢】

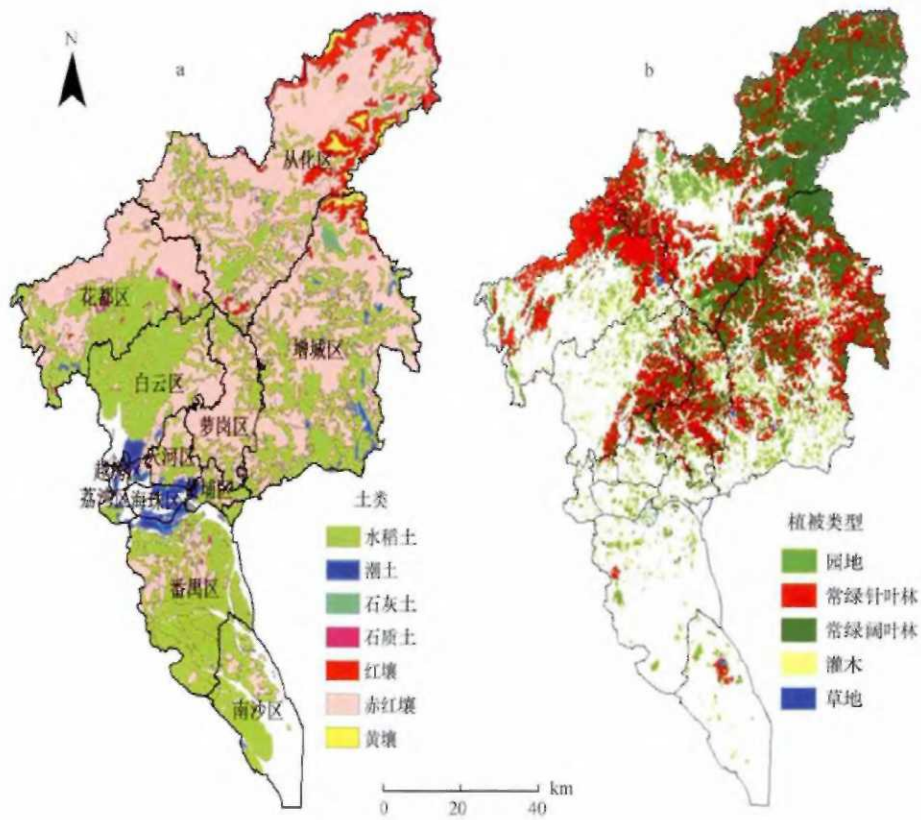


图1 广州市土壤(a)与植被(b)类型图

Fig. 1 The soil (a) and vegetation (b) maps of Guangzhou

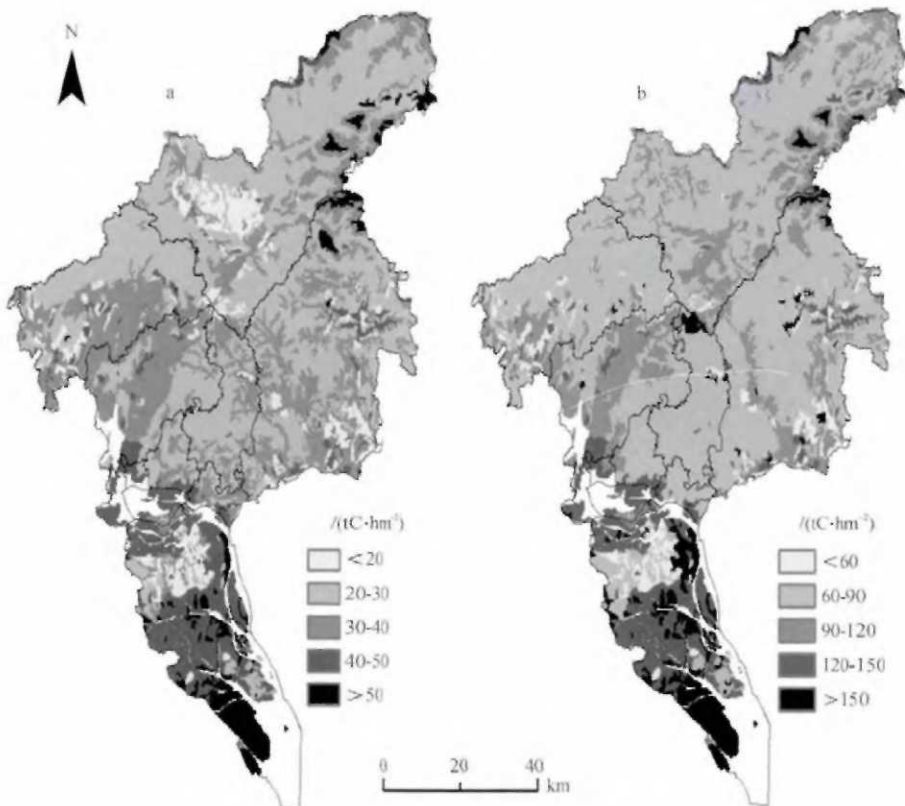


图2 广州市0~20 cm(a)、0~100 cm(b)土壤有机碳密度

Fig. 2 The SOC density of 0~20 cm (a) and 0~100 cm (b) in soil of Guangzhou