

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.023

张青青, 伍海兵, 梁晶. 上海市绿地表层土壤有机碳储量的估算. 土壤, 2020, 52(4): 819–824.

上海市绿地表层土壤有机碳储量的估算^①

张青青^{1,2}, 伍海兵^{1,2}, 梁晶^{1,2*}

(1 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

摘要: 本文调查了上海市 472 个绿地土壤样点, 通过对其土壤有机碳含量、密度等指标进行测定分析, 最终估算出上海市绿地土壤表层有机碳储量, 同时为预测上海市未来十几年的碳库变化提供数据支撑。研究表明: ①上海市绿地表层(0~20 cm)土壤有机碳空间差异性较大, 土壤有机碳含量和密度表现为西高东低, 且自中心向四周逐渐增高。②不同绿地类型土壤有机碳含量大小依次为: 公园绿地>公共绿地>道路绿地; 有机碳密度的大小依次为: 公共绿地>公园绿地>道路绿地。不同绿地类型土壤有机碳含量和密度差异显著, 其中, 城区不同绿地类型土壤有机碳含量和密度差异显著($P<0.05$), 但郊区不同绿地类型土壤有机碳含量和密度差异不显著($P>0.05$)。③2015 年上海市绿地表层土壤有机碳储量约为 4.26×10^6 t。预计到 2035 年, 上海市绿地表层土壤有机碳储量约可达到 1.53×10^7 t。

关键词: 城市绿地土壤; 有机碳含量; 有机碳密度; 有机碳储量

中图分类号: S153 文献标志码: A

Estimation of Storage of Organic Carbon in Green Surface Soils in Shanghai

ZHANG Qingqing^{1,2}, WU Haibing^{1,2}, LIANG Jing^{1,2*}

(1 Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China; 2 Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China)

Abstract: In this study, 472 green surface soil samples (0-20 cm) were collected in Shanghai, the contents and densities of soil organic carbon (SOC) were analyzed, and then the storage of organic carbon of green surface soil was estimated in order to provide data support for predicting the changes of carbon pool in Shanghai in the coming years. The results showed that the spatial variability of SOC in green surface soil was large, and the content and density of SOC were higher in the west region but lower in the east region, and gradually increased from the center to surrounding regions. The contents of SOC were in the order of park green space > public green space > road green space, while the densities of SOC were in the order of public green space > park green space > road green space. There were significant differences in SOC contents and densities among different green spaces, and among them, SOC contents and densities were significantly different in different green spaces within urban area ($P<0.05$), but no significant differences in suburbs ($P>0.05$). In 2015, the storage of organic carbon in surface soil of green space in Shanghai was about 4.26 million tons, and is estimated to be 15.3 million tons by 2035.

Key words: Urban green soil; Organic carbon content; Organic carbon density; Organic carbon storage

土壤作为陆地生态系统最大的碳库,其碳库微小的变化可能直接影响大气中 CO_2 浓度,进而影响全球气候变化^[1]。随着城市化进程的加快,建筑物、道路等施工使城市的封闭土壤大量增加,不仅致使土壤有机碳易于释放到空气中,而且减弱了对大气 CO_2 的固存量,最终造成温室效应、热岛效应加剧,对城市的发展造成了很大的影响^[2-4]。为了解决这种现象,

国家大力推进生态文明建设,转变土地利用方式,注重城市绿地的建设,试图通过绿地土壤来调控土壤碳库。而城市绿地土壤有机碳库主要聚集于表层^[5],因此,研究城市绿地表层土壤有机碳储量具有重要意义。

Edmondson 等^[6]分析了英国莱斯特市不同土地覆盖对家庭花园和非住宅绿地有机碳储量的影响,发现城市绿地 0~21 cm 土壤的有机碳平均密度为 99

①基金项目: 上海市科学技术委员会科技专项(17DZ1202801)资助。

* 通讯作者(liangjing336@163.com)

作者简介: 张青青(1992—),女,山西运城人,硕士,助理工程师,主要从事城市土壤质量评价与改良修复的研究。E-mail: qqzhang19921119@163.com

t/hm²。罗上华等^[7]对北京市不同类型绿地 0~20 cm 土壤有机碳进行测定,结果表明:城市不同类型绿地土壤有机碳含量差异明显,行道树土壤有机碳含量显著高于其他类型绿地,而其他类型绿地土壤有机碳含量差异不显著。周陶冶^[8]发现上海市不同类型绿地表层土壤有机碳含量大小依次为公园绿地>农业用地>交通道路>居民区绿地。目前,国内外学者多从土地利用方式变化方面研究绿地土壤有机碳含量和密度的变化特征^[9],缺乏对某个特定区域绿地土壤有机碳总库大小的估算和预测。

上海作为中国发展速度较快的大城市,注重城市绿地面积建设(如 198 地块),且强调注重发挥绿地固碳增汇作用,维持城市的可持续发展。但目前上海市绿地土壤对土壤有机碳库的贡献大小尚不清楚。因此,本研究以上海市绿地表层土壤为对象,基于大量的土壤数据,分析土壤有机碳含量和密度的空间分布规律,估算 2015 年上海市绿地表层土壤有机碳总储量,并根据上海城市整体规划对 2035 年上海市绿地表层土壤有机碳储量进行推算,为上海市绿地土壤碳

库评价与改良提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海位于中国的东南部(120°52'~122°12'E, 30°40'~31°53'N),总面积 6.34×10⁵ hm²,共 16 个区。其中,城区包括黄浦、徐汇、长宁、静安、普陀、虹口、杨浦、浦东新区,郊区包括崇明、宝山、嘉定、青浦、闵行、奉贤、松江、金山。2015 年,上海市年均温为 17.1 °C,年均降水量为 1 649.1 mm,属亚热带湿润季风气候,平均海拔约为 4 m。当年,上海市绿地面积达到 1.27×10⁵ hm²,约占上海总面积的 20.08%。其中,公园绿地面积为 1.84 ×10⁴ hm²(上海统计年鉴,2015 年)。

本研究于 2015 年 7—8 月份,对上海市的公园绿地、公共绿地、街道绿地等不同类型绿地土壤进行采样,共采集表层(0~20 cm)样品 472 个,同时每处采集 3 个环刀样,用于容重的分析。采样点地理位置见图 1。

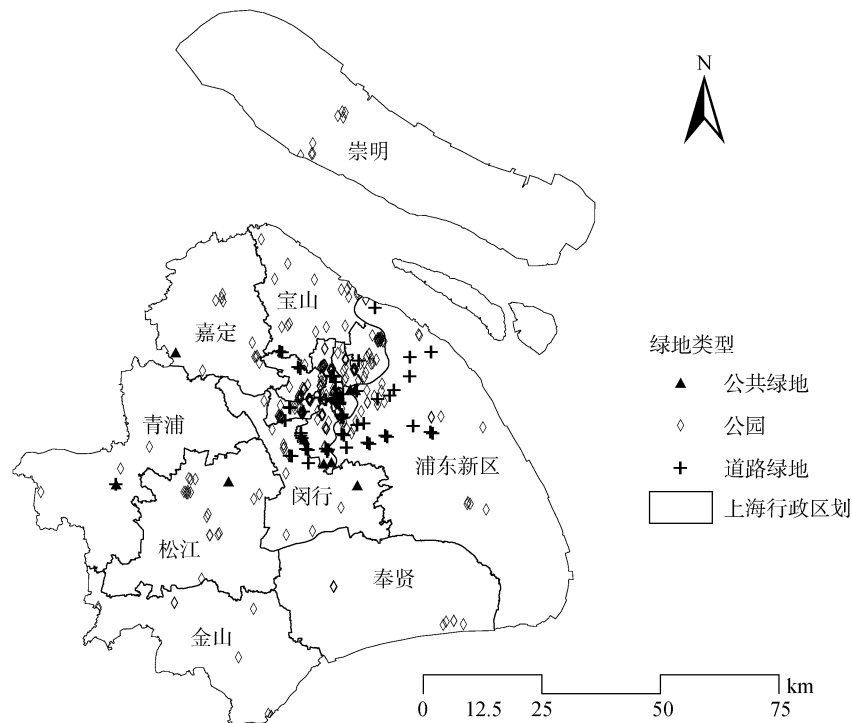


图 1 采样点地理位置

Fig.1 Location of sampling sites

1.2 研究方法

土壤容重采用环刀法测定。土壤有机碳含量(SOC)通过重铬酸钾-外加加热法测定^[10]。土壤有机碳密度(SOCD)是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量。目前,它已成为评价和衡量土壤中有机

碳储量的一个极其重要的指标。计算公式为:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n SOC_i \times BD_i \times (1 - \alpha) \times H_i / 10 \quad (1)$$

式中:SOCD 的单位为 t/hm²,SOC 的单位为 g/kg, n 为土层数($n = 1$),BD 为土壤容重(g/cm³), α 为土壤

中>2 mm 石砾的体积百分数, H 为土层厚度(cm), 本研究土层厚度为 20 cm。

1.3 数据处理与分析

采用 SAS 9.0 软件对绿地表层土壤有机碳含量和有机碳密度进行正态分布检验, 并分析不同绿地类型土壤有机碳含量、有机碳密度的差异。运用 ArcGIS 14.2 软件中的普通克里金法对上海市绿地表层土壤有机碳含量和有机碳密度进行空间插值。采用 Origin 2017 作图。

2 结果与讨论

2.1 上海市绿地表层土壤有机碳含量和密度总体特征

上海市绿地表层土壤有机碳含量介于 2.83 ~ 41.47 g/kg, 平均值为 13.50 g/kg, 变异系数(CV)为 44.82%(表 1)。根据 Nielsen 的变异系数分级标准,

$CV \leq 10\%$, 属于弱变异性; $10\% < CV < 100\%$, 属于中等变异性; $CV \geq 100\%$, 属于强变异性。本研究表明, 上海市绿地表层土壤有机碳含量属于中等变异性。同郝瑞军等^[11]2011 年测定的上海市绿地表层土壤有机碳平均含量(11.21 g/kg)相比, 2015 年上海市绿地表层土壤有机碳平均含量有增加趋势, 且年均增加速率为 0.57 g/(kg·a)。而与国内其他城市相比, 上海市绿地表层土壤有机碳含量则高于北京市崇文区绿地表层土壤有机碳含量(10.90 g/kg)^[12], 也高于郑州市绿地表层土壤有机碳含量(6.60 g/kg)^[13]。

上海市绿地表层土壤有机碳密度介于 8.72 ~ 104.05 t/hm², 平均值为 35.04 t/hm², CV 值为 39.46%, 也属于中等变异性(表 1)。与国内其他城市相比, 本研究结果与开封市的土壤有机碳密度(35.3 t/hm²)较为接近^[14], 略高于芜湖市的土壤有机碳密度(32.8 t/hm²)^[15]。

表 1 上海市绿地表层土壤有机碳含量和密度的统计分析
Table 1 Statistical analysis of content and density of organic carbon in green surface soil in Shanghai

指标	均值	最大值	最小值	方差	标准差	变异系数(%)	偏度	峰度
容重(g/cm ³)	1.32	1.61	0.83	0.01	0.12	9.14	-0.60	0.66
有机碳含量(g/kg)	13.50	41.47	2.83	36.63	6.05	44.82	1.52	3.37
有机碳密度(t/hm ²)	35.04	104.05	8.72	181.17	13.83	39.46	1.24	2.77

2.2 上海市绿地表层土壤有机碳含量和密度空间分布特征

如图 2 所示, 上海市绿地表层土壤有机碳含量空间分异性较大。杨浦区东南部、长宁区中部、徐汇区北部、青浦区北部、松江区北部以及崇明区西北部的土壤有机碳含量较高, 高于 14.7 g/kg; 宝山区北部、闵行区东部、浦东西区西部、金山区西部、奉贤区中部和崇明区西南部的有机碳含量较低, 低于 10.3 g/kg。在空间上有机碳含量表现为西高东低, 自中心向四周有逐渐增加的趋势。

同土壤有机碳含量变化相似, 上海市绿地表层土壤有机碳密度的空间分异性也较大(图 3)。崇明区西北部较高, 高于 71.0 t/hm²; 宝山区北部、闵行区东部、浦东西区西部、金山区西部和南部、奉贤区西部和崇明区西南部土壤有机碳密度较低, 低于 27.8 t/hm²。在空间上有机碳密度也表现为西高东低, 中心区域低于四周郊区。这同史利江等^[16]发现上海市 0 ~ 100 cm 的土壤有机碳密度呈西高东低的研究结果相似。分析其原因可能有以下几方面: ①上海市郊区较中心城区的绿地养护更为粗放, 枯枝落叶等凋落物更多回归于土壤, 这促进了土壤有机碳的积累; ②中心城区、闵

行区受高楼大厦等封闭空间的影响, 其热岛效应高于四周较为开阔的郊区^[17-18], 致使土壤有机碳易于分解, 积累量较低^[19-20]; ③随着城市绿化发展水平的提高, 建设相对较晚的郊区绿地较中心城区绿地土壤质量要求高; ④与本底土壤性质也有一定关系, 如上海东部分布有黄泥、黄潮泥、潮沙泥等水稻土, 而西部多分布为青紫泥等水稻土, 而黄泥、黄潮泥、潮沙泥比青紫泥肥沃, 有机质含量高^[16]。崇明区绿地表层土壤有机碳密度从南到北呈增加趋势, 西北角的尤其高, 在东西方向上呈现西高东低的趋势。这与申广荣等^[21]对崇明表层土壤有机碳密度的研究结果相左, 可能是由于本研究只涉及到绿地, 而申广荣等的研究涉及面广, 包括农田、林地、城镇或建筑用地等。而农田、林地土壤碳库的变化在土壤碳库里占着重要比例。

2.3 上海市不同绿地类型土壤有机碳含量及密度分布特征

由图 4 可知, 上海市不同绿地类型表层土壤有机碳含量依次为: 公园绿地(13.93 g/kg) > 公共绿地(13.91 g/kg) > 道路绿地(10.82 g/kg)。就整个上海而言, 不同绿地类型土壤有机碳含量差异显著, 主要表现

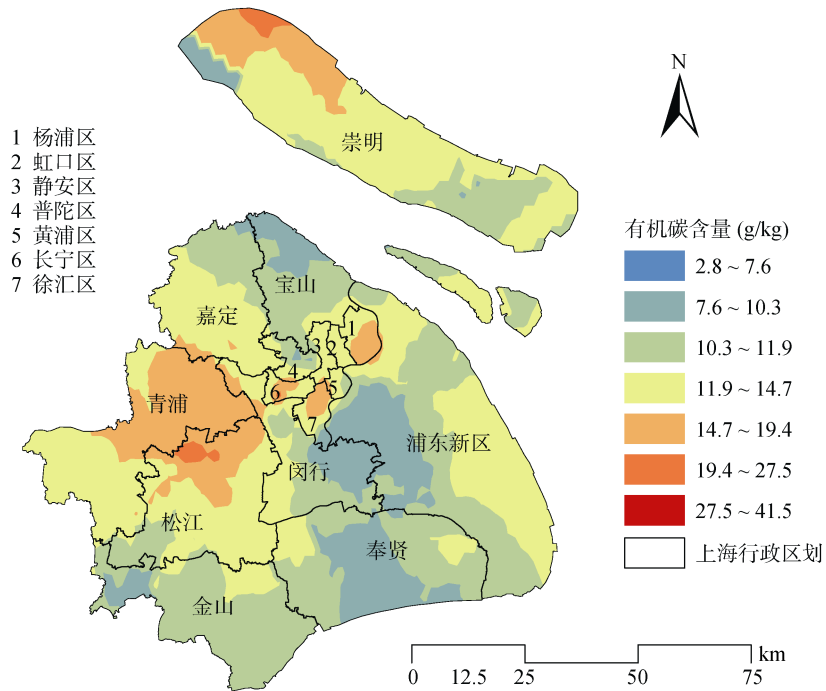


图 2 上海市绿地表层土壤有机碳含量

Fig. 2 Organic carbon content in green surface soil in Shanghai

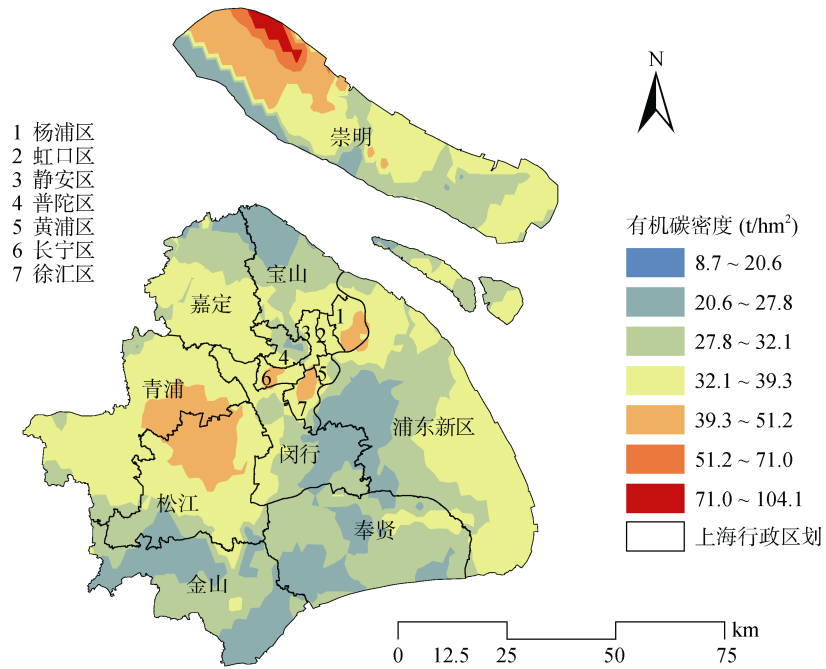


图 3 上海市绿地表层土壤有机碳密度分布图

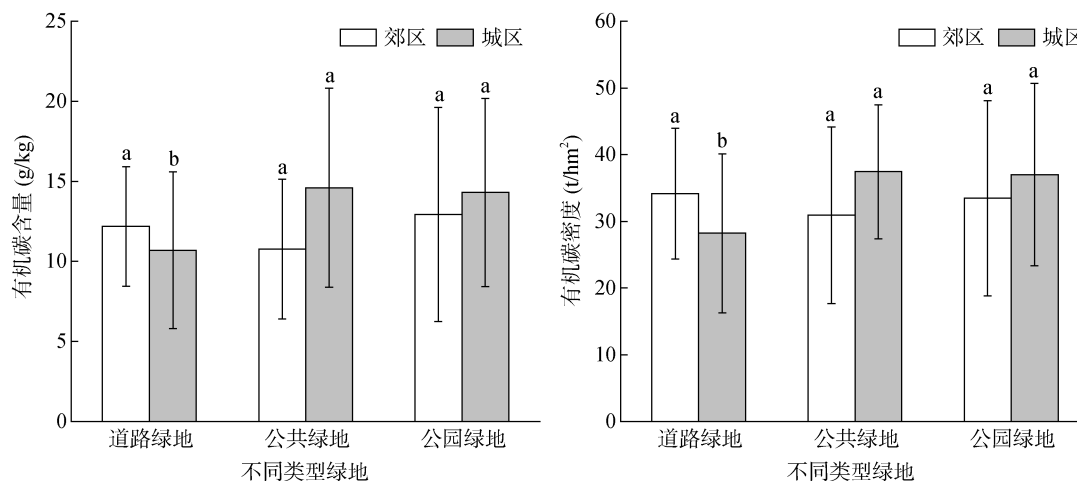
Fig. 3 Organic carbon density in green surface soil in Shanghai

为：公园绿地、公共绿地土壤有机碳含量与道路绿地差异显著($P < 0.05$)，公园绿地与公共绿地土壤有机碳含量差异不显著($P > 0.05$)。就郊区而言，不同绿地类型土壤有机碳含量差异不显著($P > 0.05$)；但城区公园绿地、公共绿地土壤有机碳含量与道路绿地差异显著($P < 0.05$)，公园绿地与公共绿地土壤有机碳含量差异

不显著($P > 0.05$)。本研究结果与齐齐哈尔市中心城区主要绿地土壤有机碳含量排序：公园绿地>单位附属绿地>居住区绿地>道路绿地的研究结果相一致^[22]。但与合肥市 0 ~ 30 cm 土层不同绿地类型土壤有机碳含量大小依次为：道路绿地(9.91 g/kg)>公园绿地(7.00 g/kg)>居住区绿地(5.70 g/kg)的研究结果不同^[23]。

这可能是与不同城市绿地土壤性质及其不同类型绿地土壤的养护水平不同等有关。在本研究中,公园绿地人为干预相对较强,有专门养护人员定期进行施肥、浇水等养护管理,因此土壤有机碳含量最高;公共绿地通常分布于街头、路口等区域,虽然存在人为

养护管理,但养护水平远低于公园绿地;而道路绿地则主要分布在路边绿化带或路中央分车道,管理方式较为粗放,不仅无施肥等养护措施,且道路绿地的凋落物易被环卫工及时清扫,不利于土壤有机碳的积累,因此其土壤有机碳含量最低。



(图中小写字母不同表示郊区或城区不同绿地类型土壤有机碳含量、密度的差异达显著水平($P<0.05$))

图4 上海市城区和郊区绿地土壤有机碳含量和密度差异

Fig. 4 Organic carbon contents and density of green surface soils in urban and suburb in Shanghai

同土壤有机碳含量的分布特征相似,上海市不同绿地类型表层土壤有机碳密度依次为:公共绿地(36.26 t/hm^2)>公园绿地(36.04 t/hm^2)>道路绿地(28.75 t/hm^2)(图4)。整个上海不同绿地类型土壤有机碳密度差异显著,主要表现为:公园绿地、公共绿地的土壤有机碳密度与道路绿地差异显著($P<0.05$),公园绿地与公共绿地土壤有机碳密度差异不显著($P>0.05$)。就郊区而言,不同绿地类型土壤有机碳密度差异不显著($P>0.05$);而城区公园绿地、公共绿地的土壤有机碳密度与道路绿地差异显著($P<0.05$),公园绿地与公共绿地土壤有机碳密度差异不显著($P>0.05$)。本研究结果与芜湖市不同绿地类型的土壤有机碳密度均值排序为道路绿地>公园绿地>街头绿地存在差异^[15],同样可能是受土壤性质、养护水平等的影响。但不同类型绿地土壤有机碳密度同土壤有机碳含量的分布特征存在差异,如公共绿地的土壤有机碳密度高于公园绿地土壤,这是由于土壤有机碳密度除了受土壤有机碳含量影响外,土壤容重、土壤砖头石块等建筑废弃物也是影响其差异的因素。相较于公园绿地,公共绿地土壤要求相对较低,且容易受人为干扰,致使土壤容重增大,从而土壤有机碳密度增加。

2.4 土壤碳储量的估算及预测

对上海市不同区域绿地土壤有机碳密度对比分析发现,松江区的土壤有机碳密度最高,为 44.14

t/hm^2 ;奉贤区土壤有机碳密度最低,为 26.38 t/hm^2 (表2),这与上海市绿地表层土壤有机碳密度空间分布特征结果一致。为进一步了解不同区域绿地表层土壤有机碳储量的变化及差异,本研究根据各区绿地表层土壤有机碳密度、各区绿地面积及公园绿地面积,对上海市绿地表层土壤有机碳储量进行了估算,发现上海市绿地表层土壤有机碳储量为 $4.26 \times 10^6 \text{ t}$,其中公园绿地表层土壤有机碳储量为 $6.63 \times 10^5 \text{ t}$ 。与史利江等^[16]估算的上海市表层土壤有机碳储量($2.17 \times 10^7 \text{ t}$)相比,本研究绿地表层土壤有机碳储量是其表层土壤有机碳储量的 19.6% ,这与上海市绿地面积的占比(20.08%)相近,表明上海市绿地土壤有机碳储存能力属于较强的状态。

《上海市城市总体规划(2017—2035年)》指明,至2035年,上海市常住人口控制在2500万人左右,人均公园绿地面积达到 13 m^2 以上。基于此可推断出,至2035年,上海市公园绿地面积约可达到 $3.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。同时,基于上海市绿地规划中公园绿地面积与绿地总面积存在一定的比例关系(14%),可以估算出至2035年,上海市绿地总面积可能达到 $2.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。研究表明,上海市绿地表层土壤有机碳平均含量的年均增加速率为 $0.57 \text{ g/(kg} \cdot \text{a)}$,那么,至2035年上海市绿地表层土壤有机碳平均含量可达到 24.95 g/kg 。在土壤容重变化不大的情况下,可推

表 2 上海市不同区域的绿地表层土壤有机碳密度及储量分布特征

Table 2 Organic carbon density and storage in green surface soils in different regions in Shanghai

区域		有机碳含量(g/kg)	有机碳密度(t/hm ²)	绿地面积(hm ²)	有机碳储量(×10 ⁴ t)	
城区	虹口	13.29	34.11	410	1.40	
	黄浦	13.78	35.69	270	0.96	
	静安	13.91	36.22	755	2.74	
	浦东新区	10.55	28.84	27 200	78.44	
	普陀	11.59	28.54	1 285	3.67	
	徐汇	16.06	41.21	1 317	5.43	
	杨浦	15.99	41.22	1 387	5.72	
	长宁	15.17	39.12	1 050	4.11	
	郊区	宝山	10.51	28.90	6 700	19.36
		崇明	14.18	38.26	27 973	107.02
奉贤		9.52	26.38	10 209	26.93	
嘉定		13.82	36.32	8 510	30.91	
金山		11.04	26.46	8 889	23.52	
闵行		10.03	27.75	8 510	23.62	
青浦		14.36	35.61	10 369	36.93	
松江		17.92	44.14	12 498	55.16	
合计				127 332	425.91	

断出, 至 2035 年, 上海市绿地表层土壤有机碳储量约 1.53×10^7 t。

3 结论

1) 上海市绿地表层土壤有机碳空间分异性较大, 土壤有机碳含量和密度在空间上均表现为西高东低, 自中心向四周逐渐增高。

2) 不同绿地类型土壤有机碳含量大小依次为: 公园绿地>公共绿地>道路绿地; 但受土壤容重及土壤中>2 mm 的石砾的体积百分数的影响, 公共绿地表层有机碳密度最高(36.36 t/hm²), 道路绿地表层有机碳密度最低(28.75 t/hm²)。不同绿地类型表层土壤有机碳含量和密度因养护水平、土壤性质等不同而存在显著差异。

3) 根据上海市各区绿地面积, 可估算出上海市 2015 年绿地表层土壤有机碳库为 4.26×10^6 t。基于研究结果, 并结合《上海市城市总体规划(2017—2035 年)》, 预计到 2035 年, 上海市绿地表层土壤有机碳储量约可达到 1.53×10^7 t。

参考文献:

[1] Bolin B. Modeling the global carbon cycle[M]//Carbon Dioxide, Climate and Society. Amsterdam: Elsevier, 1978: 41–43.
 [2] 陈浩, 吴绍华, 陈东湘, 等. 城市土壤封闭对有机碳库影响的时空变化模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2600–2610.

[3] 魏宗强, 颜晓, 吴绍华, 等. 人工封闭对城市土壤功能的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 710–715.
 [4] 赵涵, 吴绍华, 徐晓晔, 等. 城市土壤无机碳空间分布特征及其与城市化历史的关系[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1540–1546.
 [5] 李金全, 王晶, 曾文静, 等. 城市不同绿地类型土壤有机碳的垂直分布特征及储量[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 12787–12788, 12802.
 [6] Edmondson J L, Davies Z G, McCormack S A, et al. Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European City[J]. The Science of the Total Environment, 2014, 472: 444–453.
 [7] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 6011–6019.
 [8] 周陶冶. 上海城市绿地土壤有机碳储量的空间格局和驱动机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
 [9] 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): 177–182.
 [10] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter[M]//SSSA Book Series. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018: 961–1010.
 [11] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英. 上海城市绿地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 49–52.
 [12] 刘艳. 北京市崇文区绿地表层土壤质量研究与评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
 [13] 焦书道, 白保勋, 刘凤鱼, 等. 郑州市不同土地利用类型土壤有机碳与养分含量特征[J]. 上海农业学报, 2015, 31(6): 73–77.
 [14] Sun Y L, Ma J H, Li C. Content and densities of soil organic carbon in urban soil in different function districts of Kaifeng[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(1): 148–156.
 [15] 沈非, 任雅茹, 黄艳萍, 等. 芜湖城市绿地表层土壤有机碳密度分布特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1123–1129.
 [16] 史利江, 郑丽波, 张卫国, 等. 上海土壤有机碳储量及其空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1442–1447.
 [17] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1461–1471.
 [18] 鲍文杰. 上海城市热岛的时空特征及其演化规律研究[D]. 上海: 复旦大学, 2010.
 [19] Shi B, Tang C S, Gao L, et al. Observation and analysis of the urban heat island effect on soil in Nanjing, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(1): 215–229.
 [20] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99–105.
 [21] 申广荣, 葛晓焯, 黄秀梅. 上海崇明岛表层土壤有机碳密度的空间分布特征及碳储量估算[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2011, 29(6): 61–66.
 [22] 邓琳, 于宁, 乔雪, 等. 齐齐哈尔市城市绿地土壤有机质含量的测定与分析[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(4): 42–43.
 [23] 陶晓. 城市绿地土壤碳储量及碳通量研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.