

引用格式:孔祥斌,胡莹洁,李月,等.北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J].资源科学,2019,41(12):2307-2315.
[Kong X B, Hu Y J, Li Y, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing[J].
Resources Science, 2019, 41(12): 2307-2315.] DOI: 10.18402/resci.2019.12.14

北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素

孔祥斌¹,胡莹洁²,李月¹,段增强¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100193;

2. 江西师范大学城市建设学院,南昌 330022)

摘要:土壤有机碳既是影响全球气候变化的生态因子,也是影响耕地质量的肥力因子,研究耕地土壤有机碳分布特征及其影响因素对增加耕地碳储量和提升耕地生产能力具有重要指导意义。本文以北京市为研究区,以第二次土壤普查的土壤类型及质地数据、2010年测土配方施肥项目土壤养分调查成果、数字高程模型(DEM)及耕地种植类型分布图为基础数据,分析区域耕地土壤有机碳密度及储量空间分布特征。结果表明:①2010年北京市耕地表层土壤平均有机碳密度为22.51 t/hm²,碳储量为990.34×10⁴ t;②北京市西北部山区以及城市近郊区耕地碳密度较大,各区县中耕地表层土壤平均有机碳密度最大的是门头沟区,达39.93 t/hm²;③地形、土壤类型、土壤质地及种植类型对耕地土壤有机碳密度均有影响,且随着海拔升高耕地土壤有机碳密度整体呈增加趋势;土壤类型为棕壤、褐土的耕地有机碳密度显著高于其他类型,整体表现出土壤质地越黏重土壤有机碳密度越大的趋势;利用方式为非粮作物的耕地土壤有机碳密度略高于粮食作物;④综合分析表明,在中山、低山区春玉米土壤碳密度最高,而在丘陵、平原区则是露天菜、设施农业碳密度最高。当前北京市耕地利用调整应综合考虑当地地貌地形、土壤条件以及人为利用因素对耕地表层土壤有机碳的影响,因地制宜提高或保持耕地固碳能力。

关键词:耕地;表层土壤;有机碳密度;有机碳储量;耕地利用;北京市

DOI: 10.18402/resci.2019.12.14

1 引言

土壤碳库是地球陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量约为大气碳库的3倍、陆地植被碳库的2.5倍^[1,2]。土壤碳库及其动态变化被视为影响大气CO₂浓度的重要生态过程,对全球气候变化具有重要影响^[3]。通过增加土壤碳库以固定大气中的碳,对缓解温室效应尤为重要,已成为当前气候变化领域的研究热点和焦点^[4-6]。对于耕地而言,土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)不仅是重要的生态因子,同时还是影响耕地质量和农业可持续性的重要因素^[7,8]。耕地土壤有机碳密度及储量受自然和人为因素的综合影响。自然因素方面,Davidson等^[9]从气温敏感性的角度综述了气候变化对土壤有机碳含量的影响;李龙等^[10]研究了地形因子对梯田土壤

有机碳含量的影响;王淑芳等^[11]研究了气候、地形和土壤属性对土壤有机碳密度及储量的影响。人为因素方面,多数研究侧重于耕地利用方式和利用强度^[12,13],农业生产管理措施^[14,15]和区域农地保护政策^[16,17]等因素对耕地土壤有机碳的影响。总体来说,目前关于耕地有机碳影响因素的研究大多集中在自然或人为的某单一因素上,综合分析自然因素和人为因素的研究还不多。从数据来源上看,不少研究使用的数据源于1979—1985年开展的第二次全国土壤普查^[18-20]或1999年开始实施的全国多目标区域地球化学调查^[21,22],也有部分研究使用的是小区实验土壤样点数据^[23,24]。前者研究空间尺度较大,但数据年份相对陈旧;后者研究尺度小,且只能研究碳密度,缺乏区域土壤碳储量特征。此外,也有少数

收稿日期:2018-09-27,修订日期:2019-09-24

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(8151001);国家自然科学基金项目(41771561)。

作者简介:孔祥斌,男,河北承德人,教授,研究方向为耕地利用与保护,耕地质量评价。E-mail: kxb@cau.edu.cn

分学者利用各地从2006年开始的测土配方施肥土壤养分调查成果,研究区域耕地土壤有机碳密度及储量分布特征及影响因素,如江叶枫等^[25]利用测土配方施肥项目成果,在研究江西省耕地土壤有机碳空间特征的基础上,识别主控影响因素。类似的研究还有吉林省^[26]、粤北山区^[27]、下辽河平原区^[28]等地。使用近期区域尺度数据对大都市区耕地有机碳分布特征及其影响因素开展研究的相对较少。

在快速城市化和工业化的背景下,北京市耕地土壤有机碳既受到诸如土壤条件等自然因素的影响,又受到多种多样人为利用方式的强烈影响^[29]。揭示地貌、土壤类型和质地以及利用方式对北京市耕地表层土壤有机碳密度和储量的影响规律,在为增加耕地土壤碳库储量、减缓CO₂排放、提高耕地质量提供科学依据方面具有重要的研究意义。

2 研究区概况

北京市地处华北平原北部(115°25'E—117°30'E,39°28'N—41°05'N),地势西北高耸,东南低缓,西部、北部和东北部环太行山脉和燕山山脉,东南是向渤海倾斜的平原^[30],全市平均海拔为43.5 m,山地海拔为1000~1500 m,平原地区海拔高度20~60 m。北京气候为暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,年均气温为11~13.5℃,≥10℃积温为4100~4500℃,无霜期为190~200 d,年降雨量550~570 mm;土壤类型以潮土、褐土、棕壤等为主。山前平原区土地平坦,土层较深,热量条件满足一年两熟制,典型种植制度为冬小麦-夏玉米,主要耕地利用方式还包括春玉米、陆地蔬菜及设施农业(如温室大棚等)。北京市行政区划及地形如图1所示,下辖东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区等16个区县。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源及处理

本文所用的数据包括4类:土壤数据、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用数据及耕地种植类型数据。其中,土壤数据包括土壤有机碳数据、土壤类型和土壤质地数据。土壤有机碳数据来源于北京市土肥站测土配方施肥项目土壤养分调查成果,土壤采样时间为2006—2008年,样点共计24009个,按照农化采样要求,取样时用GPS进行空间定位,在样点四周100 m范围选择3~5个

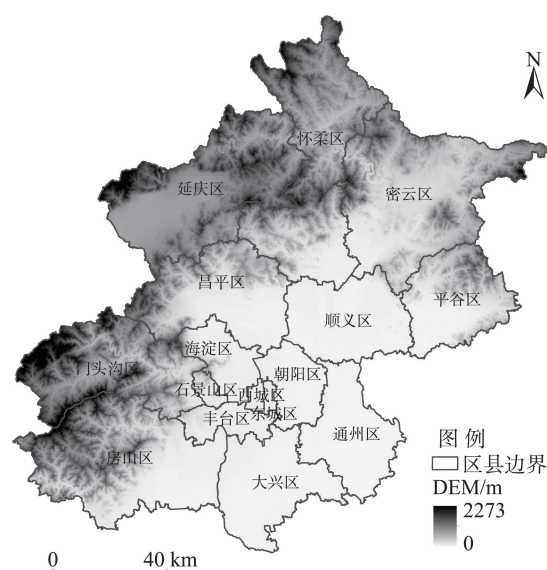


图1 北京市行政区划及数字高程图

Figure 1 Administrative division and digital elevation model (DEM) of Beijing Municipality

点,取0~20 cm表层土壤,然后按照四分法混合采集样品,将其中的石块、植物根系残体等杂物剔除,并进行风干,土壤有机碳含量采用“重铬酸钾氧化-外加热法”进行测定,土壤容重通过环刀法测定。土壤类型和土壤质地数据源于北京市第二次土壤调查数据,并参考全国第二次土壤普查数据进行验证。土地利用与覆被数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率为100 m,由Landsat-TM和MODIS卫星遥感影像解译而来;DEM数据源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为90 m。耕地种植类型数据源于遥感影像解译结合实地调研。采用2010年Landsat影像,利用ENVI和ArcGIS软件,运用人机交互式解译方法得到北京市耕地种植类型分布。根据北京市耕地利用特点以及本文需要,将耕地种植类型分为5种类型:冬小麦、露天蔬菜、设施农业、春玉米和冬小麦-夏玉米。为排除高程及地形的影响,本文仅针对平原区研究种植类型对耕地土壤有机碳的影响,考虑到果园大多分布在山区,少数位于平原区的果园在遥感影像纹理特征上与平原造林不易区分,因此本文耕地种植类型划分中未考虑果园。利用实地调查样点及Google Earth高分辨率遥感影像对解

译结果进行精度检验,实地调查的70个样点中有57个解译结果与实际类型相符,Google Earth软件同时期高分辨率遥感影像上补充的30个样点中有25个相符,整体上解译结果准确率超过80%,可信度较高。

3.2 耕地表层土壤有机碳储量估算方法

本文研究对象为耕地表层的土壤有机碳,土壤厚度为20 cm^[31],有机碳含量由有机质含量除以1.724得到,表层土壤碳密度(D_{oc})由以下公式^[32]求得:

$$D_{oc} = S_{oc} \times \gamma \times H \times 10^{-1}$$

式中: D_{oc} 为土壤碳密度(t/hm^2); S_{oc} 为土壤有机碳含量(g/kg); γ 为土壤容重(g/cm^3); H 为耕地表层厚度,为20 cm。

土壤表层总有机碳储量(P_{oc})计算公式^[33]如下:

$$P_{oc} = \sum_{i=1}^n S_i \times D_{oci}$$

式中: P_{oc} 是土壤碳储量(t); S_i 为第*i*个土壤图斑的面积(hm^2); D_{oci} 为第*i*个土壤图斑的碳密度(t/hm^2); n 为图斑总数, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

3.3 耕地表层土壤有机碳分布特征分析

本文主要借助ArcGIS软件对耕地表层土壤有机碳密度的空间分布特征进行分析,将2010年北京市土地利用现状图与土壤有机碳密度图进行叠加提取得到2010年耕地表层土壤有机碳密度栅格数据,然后将耕地表层土壤碳密度空间分布图与地貌类型、土壤类型、土壤质地和种植类型数据进行叠加区域统计,得到北京市不同地貌类型、土壤类型、土壤质地和种植类型的耕地面积及对应土壤有机碳密度和碳储量的差异特征。在对上述结果进行描述性统计分析的同时,利用SPSS软件对不同地貌类型、土壤类型、土壤质地和种植类型耕地表层土壤有机碳密度进行方差分析,辅助说明不同自然和人为因素对北京市耕地土壤有机碳密度的影响。

4 研究结果

4.1 耕地表层土壤有机碳密度空间分布

2010年北京市耕地表层土壤有机碳平均碳密度为22.51 t/hm^2 ,标准差为5.58 t/hm^2 ,耕地表层土壤有机碳储量为990.34 $\times 10^4$ t。北京市耕地土壤碳密度分布图显示(图2),全市耕地表层土壤有机碳密

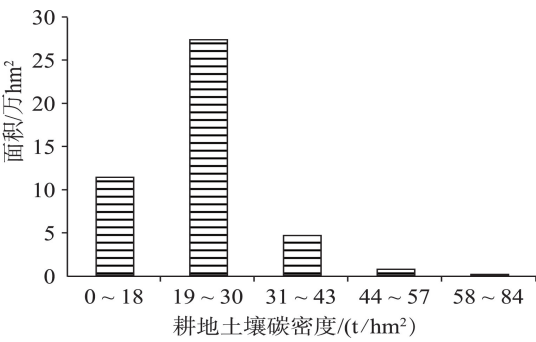


图2 北京市耕地土壤碳密度分布

Figure 2 Cultivated land soil carbon density distribution of Beijing

度多集中在18.00~30.00 t/hm^2 ,占耕地总面积的61.97%,耕地表层碳密度处于0.00~18.00 t/hm^2 范围的耕地面积占耕地总面积约1/4,超过85%的耕地表层有机碳密度低于30.00 t/hm^2 ,有机碳密度超过43.00 t/hm^2 的耕地面积占比小于2%。

北京市各区县耕地土壤碳密度和碳储量分布表(表1)显示,各区县中门头沟区耕地表层土壤有机碳密度最大,达39.93 t/hm^2 ,其次是石景山区,为32.93 t/hm^2 ,顺义区耕地表层土壤有机碳密度最小,仅为17.70 t/hm^2 (表1)。各区县中变异系数最大的是延庆区,达43.96%,表明延庆区耕地土壤碳密度分布最为分散,其次是房山区,为39.84%;丰台区的变异系数最小,为15.71%。2010年土地利用现状图

表1 北京各区县耕地土壤碳密度和碳储量

Table 1 Carbon density and carbon storage of cultivated land in the districts of Beijing

各区	耕地 面积	土壤有机碳密度/(t/hm^2)			有机碳 储量/ 10^4 t
		均值	标准差	变异系数/%	
丰台区	6314	25.73	4.04	15.71	16.25
大兴区	66338	20.43	4.77	23.33	135.50
密云区	44316	21.27	6.68	31.41	94.26
平谷区	30170	22.28	2.77	12.43	67.22
延庆区	45649	22.62	9.94	43.96	103.25
怀柔区	27944	26.96	7.64	28.32	75.33
房山区	46100	23.30	9.28	39.84	107.43
昌平区	29411	22.99	4.85	21.11	67.63
朝阳区	8947	27.70	4.71	16.99	24.78
海淀区	9190	27.58	5.58	20.22	25.34
石景山区	19	32.93	3.36	10.19	0.06
通州区	57704	23.69	4.85	20.46	136.68
门头沟区	7362	39.93	6.44	16.12	29.39
顺义区	60589	17.70	3.18	17.94	107.23

表明,北京市耕地面积为 $44.01\times 10^4\text{ hm}^2$,多集中分布在山前平原,少量分布于山区。各区县中大兴区耕地面积最大,为 $6.63\times 10^4\text{ hm}^2$,占全市耕地总面积15.08%,石景山区耕地面积最小,仅为 19 hm^2 。各区县中通州区耕地表层土壤有机碳储量最大,为 $136.68\times 10^4\text{ t}$,占全市的13.80%,其次是大兴区,为 $135.50\times 10^4\text{ t}$,占比为13.68%,石景山区的碳储量最小,仅占0.01%,主要由于该区耕地面积最小。

耕地土壤碳密度空间分布图显示(图3),西北部地区土壤碳密度较大,山地区域耕地土壤碳密度整体高于平原地区,这可能与山区土壤受机械翻耕影响较小有关。平原区城市近郊耕地表层土壤碳密度相对较高,可能与近郊区多种植蔬菜施肥量巨大^[34]有关。

4.2 耕地表层土壤有机碳影响因素

耕地表层土壤有机碳的差异主要取决于土壤中有机质的矿化分解、腐殖化等土壤中碳的输入和输出之间的平衡,影响土壤有机碳含量的因素主要包括气候、植被、母质、地形及人类的土地利用及田间管理^[35]。本文从自然因素和土地利用方式角度出发,选取地貌类型、土壤类型、土壤质地及耕地利用方式4项因素对土壤有机碳密度分布的影响因素进行分析研究。

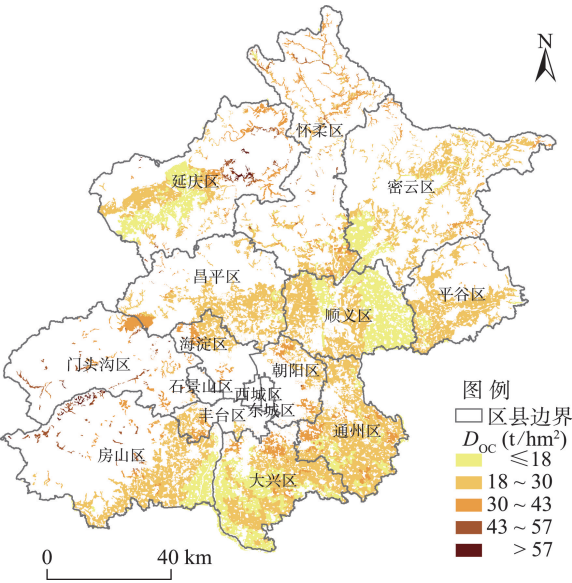


图3 北京市耕地土壤碳密度空间分布

Figure 3 Spatial distribution of carbon density of cultivated land in Beijing

4.2.1 不同地貌类型的耕地土壤碳密度差异

地貌类型的划分沿袭研究区已有地貌类型区划^[36],并结合耕地的区位分布确定地貌划分标准。首先以100 m高程作为平原与山区的高程分界线,然后综合考虑地貌形态及耕地分布将北京市耕地划分为以下几种地貌类型:①平原:高程 $\leq 100\text{ m}$;②丘陵:高程 $101\sim 300\text{ m}$;③低山: $301\sim 800\text{ m}$;④中山:高程 $801\sim 1600\text{ m}$;⑤高山:高程 $>1600\text{ m}$ 。

北京市不同地貌类型耕地土壤碳密度存在一定差异(表2),具体大小关系为:平原<丘陵<低山<中山。因高山无耕地分布,故不作分析。整体上耕地土壤碳密度随着高程增加呈现逐渐增加的趋势。在各地貌类型中,中山耕地表层土壤碳密度最大,达 41.72 t/hm^2 ,平原耕地表层有机碳密度最小,为 21.09 t/hm^2 。和平原区相比,山区耕地在被开垦前大多为林地植被,生物有机碳输入及积累水平较高,具有较高的土壤有机碳含量。同时山地区域机械化水平低,土壤受到机械翻耕扰动较小,进而为土壤有机碳积累提供了条件,与传统耕作相比更有利于土壤有机碳的固持^[37,38]。此外,随着海拔的升高,气温及土壤温度逐渐降低,降水量增加,导致微生物对土壤有机质的分解减弱,促进了土壤有机碳的积累^[39]。与此对应的是,随着海拔高度的降低,温度升高,促进了微生物对土壤有机质的分解;加之平原区耕地土壤受翻耕扰动较大,土壤通透性及呼吸作用增强,有机碳的分解速率加快,使有机碳含量降低,故而平原区耕地土壤有机碳含量低于山区。从变异系数看,平原区耕地土壤碳密度的变异系数最小,碳密度分布最为集中,原因可能是平原区耕地土壤在耕作的同时会定期不断施肥,土壤间

表2 北京市各地貌类型耕地土壤碳密度和碳储量

Table 2 Carbon density and carbon storage of cultivated land of different geomorphic types in Beijing

地貌类型	栅格面积 /hm ²	土壤有机碳密度/(t/hm ²)			有机碳储量/10 ⁴ t
		均值	标准差	变异系数/%	
平原	319005	21.09c	4.94	23.42	672.74
丘陵	42830	24.39b	7.25	29.73	104.48
低山	72596	26.26b	10.39	39.57	190.65
中山	5175	41.72a	13.78	33.03	21.59

注:均值数字后的不同字母表示耕地土壤有机碳密度差异显著($P<0.05$),字母相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著。

有机碳含量的差异变小,较为稳定;相较于平原区,山区耕地土壤有机碳含量受有机碳历史积累水平的影响更大,开垦前不同的植被(如森林、草甸)覆盖下土壤有机碳含量不同,变异性更强^[39];此外,不同坡面朝向(阴坡、阳坡)及其造成的水热条件差异,也是山区耕地土壤变异性较大的重要原因。

4.2.2 不同土壤类型的耕地土壤碳密度差异

北京市主要土壤类型包括:潮土、风砂土、褐土、水稻土、棕壤等(图4)。平原区多为潮土,山地区域则以褐土为主。为排除地形、高程等其他自然因素的影响,分析土壤类型对耕地表层土壤有机碳密度的影响时仅考虑山前平原区(高程<200 m)。将土壤类型图与土壤有机碳密度空间分布图进行空间叠加和区域统计,得到不同土壤类型耕地表层土壤有机碳密度(表3),大小关系为:风砂土<沼泽土<褐土<潮土<水稻土<棕壤。棕壤的平均有机碳

密度最大,达29.20 t/hm²,棕壤大多分布于山区,开垦为耕地之前大多为森林或草甸植被覆盖,生物积累作用较强,同时高海拔的水热条件有助于积累大量的有机质或腐殖质,使得其土壤有机碳含量较高;风砂土的碳密度最小,为18.51 t/hm²,风砂土土壤颗粒相对较粗,有机质积累能力相对较差,因此其土壤有机碳含量较低;沼泽土、褐土、潮土和水稻土的平均有机碳密度介于19.45~22.22 t/hm²之间,差距相对较小。从变异系数的角度上看,棕壤的变异系数最大,达27.91%,表明该土壤类型有机碳密度分布更为分散,沼泽土的变异系数最小,为15.27%。潮土、风砂土、褐土、水稻土的变异系数相近,介于23.46%~26.74%之间。各土壤类型的碳储量大小关系为:棕壤<风砂土<沼泽土<水稻土<褐土<潮土。潮土有机碳储量最大,达476.17×10⁴ t,棕壤有机碳储量最小,仅为1103 t。平原区耕地中潮土面积最大,因此虽然潮土平均碳密度不是最大,但储量最高。类似地,虽然棕壤的平均碳密度最大,但因其在北京平原区耕地中面积最小,故而棕壤碳储量在各土壤类型中位居最小。

4.2.3 不同土壤质地的耕地土壤碳密度差异

与土壤类型的分析类似,排除高程及地形的影响,对北京市山前平原区(高程<200 m)不同土壤质地的土壤碳密度进行分析,主要包括以下6种土壤质地:轻壤质、砂壤质、砂质、粘壤质、中壤质、重壤质。表4统计汇总了不同土壤质地土壤有机碳密度与储量,结果显示:土壤有机碳密度由小到大的土壤质地依次为砂质<砂壤质<轻壤质<中壤质<重壤质<粘壤质,整体表现出质地越黏重土壤有机碳密度越大的趋势。砂质土壤平均有机碳密度最低,仅为18.01 t/hm²,粘壤质最高,达26.64 t/hm²,;从变异

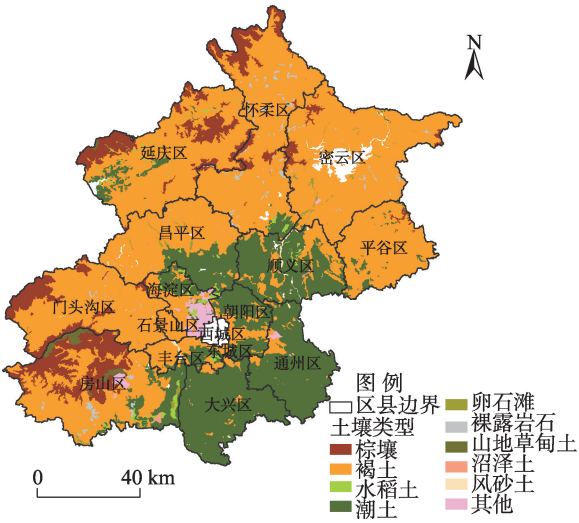


图4 北京市土壤类型图

Figure 4 Soil map of Beijing

表3 不同土壤类型耕地土壤碳密度与碳储量

Table 3 Carbon density and carbon storage of cultivated land of different soil types

土壤类型	图斑面积 /hm ²	土壤有机碳密度/(t/hm ²)			有机碳储 量/10 ⁴ t
		均值	标准差	变异系数/%	
潮土	224808	21.23bc	4.98	23.46	476.17
风砂土	663	18.51d	4.95	26.74	1.24
褐土	86539	20.95c	5.08	24.25	180.46
水稻土	5249	22.22b	5.36	24.12	11.29
棕壤	44	29.20a	8.15	27.91	0.11

表4 不同土壤质地耕地土壤有机碳密度与储量

Table 4 Carbon density and carbon storage of cultivated land with different soil texture

土壤质地	图斑面积 /hm ²	土壤有机碳密度/(t/hm ²)			有机碳储 量/10 ⁴ t
		均值	标准差	变异系数/%	
轻壤质	149297	21.47c	4.84	22.54	321.23
砂壤质	83778	20.66c	4.79	23.18	171.65
砂质	33110	18.01d	4.45	24.71	58.18
粘壤质	3142	26.64a	4.74	17.79	8.31
中壤质	41511	22.68b	5.10	22.49	94.65
重壤质	5145	23.99b	5.85	24.39	12.28

系数的角度上看,砂质土壤最大,达24.71%,粘壤质较小,为17.79%,其他4种质地变异系数相近;对于各土壤质地的碳储量,轻壤质碳储量最大,达 321.23×10^4 t,主要由于该种质地面积最大,因此虽然轻壤质土壤有机碳密度并非最高,但储量最大;类似地,虽然粘壤质土壤碳密度最大,但由于其面积最小,故其碳储量最小。整体上土壤有机碳密度较大的几类土壤质地(粘壤质、重壤质、中壤质等)面积不占优势,相应碳储量也不高。

4.2.4 不同耕地利用方式的土壤有机碳密度差异

北京市耕地利用方式主要包括冬小麦、冬小麦-夏玉米、春玉米、露天菜、设施农业5种,其表层土壤有机碳密度的大小关系为:冬小麦-夏玉米<冬小麦<露天菜<设施农业<春玉米(表5),5种耕地利用方式中,土壤平均有机碳密度最大的是春玉米,为 21.00 t/hm^2 ,最小的是冬小麦-夏玉米,为 19.67 t/hm^2 ,可见不同利用方式之间土壤有机碳密度差距不大。通常来说,蔬菜的肥料投入要显著高于粮食作物,有助于土壤有机碳含量提升。但是本文结果中,蔬菜和粮食作物土壤有机碳密度差距不太显著,这可能是由于蔬菜在肥料高投入的同时,产量也显著高于粮食作物,这种高投入高产出的特征可能使得蔬菜土壤碳积累水平未必显著高于粮食作物。从变异系数的角度上看,5种耕地利用方式中,土壤有机碳密度变异系数最大的是春玉米,达33.00%,其次为设施农业,为24.66%,最小为冬小麦,为21.11%。从碳储量的角度上看,春玉米的播种面积最大,为 49642 hm^2 ,且其土壤有机碳密度较大,故5种耕地利用方式中,春玉米碳储量最大,达 104.27×10^4 t,其次为设施农业、冬小麦-夏玉米、露天菜、冬小麦。

表5 不同耕地利用方式土壤有机碳密度与碳储量

Table 5 Carbon density and carbon storage of cultivated land under different planting system

耕地利用方式	面积/ hm^2	土壤有机碳密度/(t/hm^2)			有机碳 储量/ 10^4 t
		均值	标准差	变异系数/%	
冬小麦	844	20.13	4.25	21.11	1.70
露天菜	7660	20.31	4.79	23.58	15.56
设施农业	18161	20.48	5.05	24.66	37.19
春玉米	49642	21.00	6.93	33.00	104.27
冬小麦-夏玉米	17941	19.67	4.50	22.88	35.29

5 结论

本文分析了北京市耕地表层土壤有机碳密度空间分布差异特征,在此基础上揭示了地貌类型、土壤类型、土壤质地和耕地利用方式对北京市耕地表层土壤有机碳密度的影响规律,对北京市调整耕地利用、提高耕地固碳能力具有一定的理论和现实意义。

(1)2010年北京市耕地表层土壤有机碳平均密度为 22.51 t/hm^2 ,碳储量为 990.34×10^4 t。北京市耕地表层土壤有机碳密度多集中在 $18.00 \sim 30.00 \text{ t/hm}^2$,约占耕地总面积的62%;空间上,北京市西北部山区及平原城市近郊区耕地表层土壤有机碳密度较大。各区县中,门头沟区耕地表层土壤有机碳密度最大,达 39.93 t/hm^2 ,顺义区耕地表层土壤有机碳密度最小,为 17.70 t/hm^2 。

(2)北京市耕地表层土壤有机碳含量呈现随高程增加而逐渐增加的趋势,不同地貌类型耕地表层土壤碳密度分布特征为:平原<丘陵<低山<中山。同时,土壤条件也是影响耕地表层土壤有机碳含量的重要因素,北京市耕地表层土壤有机碳含量按照土壤类型的分布特征为:风砂土<潮土<水稻土<褐土<棕壤,按照土壤表层质地分布的特征为:砂质<砂壤质<轻壤质<中壤质<重壤质<粘壤质。

(3)此外,耕地利用方式对北京市耕地土壤有机碳含量也有明显影响,不同种植类型耕地土壤有机碳含量分布特征为:冬小麦-夏玉米<冬小麦<露天菜<设施农业<春玉米。在中山、低山区域春玉米土壤碳密度最高,而在丘陵、平原区则是露天菜、设施农业碳密度最高。

耕地表层土壤有机碳密度同时受到自然因素和人为利用的影响,要提高耕地表层土壤碳含量,需综合考虑地貌、土壤类型、质地和利用方式,既可以通过优化种植结构提升耕地表层碳密度,也可以通过增施有机肥、改土等土地整治手段,改善表层土壤质地,提高耕地有机碳密度。

参考文献(References):

- [1] Scharlemann J P W, Tanner E, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon

2019年12月

- pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81–91.
- [2] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 80–99.
- [3] Horwath W R, Kuzyakov Y. Chapter three—the potential for soils to mitigate climate change through carbon sequestration[J]. *Developments in Soil Science*, 2018, 35: 61–92.
- [4] Pries C E H, Castanha C, Porras R C, et al. The whole-soil carbon flux in response to warming[J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1420–1422.
- [5] Minasny B, Malone B P, Mcbratney A B, et al. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59–86.
- [6] Corbeels M, Cardinael R, Naudin K, et al. The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 188: 16–26.
- [7] Johannes A, Matter A, Schulin R, et al. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? [J]. *Geoderma*, 2017, 302: 14–21.
- [8] Adhikari K, Owens P R, Libohova Z, et al. Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 833–845.
- [9] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165–173.
- [10] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 2930–2935. [Li L, Yao Y F, Qin F C. Distribution and affecting factors of soil organic carbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 2930–2935.]
- [11] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2011, 43(4): 515–524. [Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in upstream watershed of Miyun Reservoir in North China[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 515–524.]
- [12] 崔东, 李卫红, 朱成刚, 等. 伊犁河谷不同土地利用方式下土壤有机碳含量与土壤理化性质相关性分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(7): 1239–1245. [Cui D, Li W H, Zhu C G, et al. Soil organic carbon content in relation to soil physicochemical properties under different land use types in the Yili Valley[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1239–1245.]
- [13] 邵继承, 靳振江, 崔立强, 等. 不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 124–128. [Tai J C, Jin Z J, Cui L Q, et al. Changes in soil organic carbon fractions with land uses in soils reclaimed from wetlands of Jiangnan Plain, Hubei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 124–128.]
- [14] 赵明松, 李德成, 王世航. 近30年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 595–605. [Zhao M S, Li D C, Wang S H. Variation of soil organic carbon in farmland of Anhui and its influencing factors in the 30 years from 1980 to 2010 [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 595–605.]
- [15] 徐尚起, 黄光辉, 李永, 等. 农业措施对农田土壤碳影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(8): 259–264. [Xu S Q, Huang G H, Li Y, et al. The research progress about effects of agricultural measures on soil carbon content[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(8): 259–264.]
- [16] Wang Z M, Wu J G, Madden M, et al. China's wetlands: Conservation plans and policy impacts[J]. *AMBIO*, 2012, 41(7): 782–786.
- [17] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: Achievements, problems, synthesis, and applications[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317–335.
- [18] 严宁珍, 程永毅, 杨剑虹, 等. 岩溶山地土壤有机碳的分布特征及表层土壤有机碳的影响因素分析: 以重庆市北碚区为例[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(3): 292–298. [Yan N Z, Cheng Y Y, Yang J H, et al. Distribution and impact factor of soil organic carbon on topsoil in karst mountain: A case study of Beibei District of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(3): 292–298.]
- [19] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 基于GIS的陕西省土壤有机碳估算及其空间差异分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(5): 911–918. [Liu X F, Ren Z Y, Lin Z H. Estimation of soil organic carbon in Shaanxi Province and analysis of its spatial difference based on GIS[J]. *Resources Science*, 2012, 34(5): 911–918.]
- [20] 李典友, 陈良松, 李军, 等. 霍山县县域范围内不同空间尺度下农田土壤有机碳变异分析[J]. *地理研究*, 2012, 31(9): 1571–1579. [Li D Y, Chen L S, Li J, et al. Variabilities of soil organic carbon in farmlands at different spatial scales in Huoshan County, Anhui Province[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(9): 1571–1579.]
- [21] 鲍丽然, 严明书, 贾中民, 等. 重庆西部表层土壤有机碳储量与密度分布[J]. *物探与化探*, 2015, 39(1): 180–185. [Bao L R, Yan M S, Jia Z M, et al. The distribution of the surface soil organic carbon storage and density in western Chongqing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(1): 180–185.]
- [22] 张固成, 傅杨荣, 何玉生, 等. 海南岛土壤有机碳空间分布特征及储量[J]. *热带地理*, 2011, 31(6): 554–558. [Zhang G C, Fu Y R, He Y S, et al. Distribution and storage of soil organic carbon in Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 2011, 31(6): 554–558.]
- [23] 李杨梅, 贡璐, 解丽娜. 塔里木盆地北缘绿洲不同土地利用方式下土壤有机碳含量及其碳矿化特征[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 216–221. [Li Y M, Gong L, Xie L N. Soil organic carbon

- content and carbon mineralization characteristics under different land use types in northern Tarim Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 216–221.]
- [24] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 112–118. [Ye X X, Wang B Q, Liu S J, et al. Influence of tillage and straw retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 112–118.]
- [25] 江叶枫, 饶磊, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 778–786. [Jiang Y F, Rao L, Guo X, et al. Study on main controlling factors of spatial variability of farmland SOC in Jiangxi Province[J]. *Soils*, 2018, 50(4): 778–786.]
- [26] 于沙沙, 窦森, 黄健, 等. 吉林省耕层土壤有机碳储量及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 1973–1980. [Yu S S, Dou S, Huang J, et al. Organic carbon storage of cultivated top soils and its influencing factors in Jilin Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1973–1980.]
- [27] 文雅, 邓南荣, 刘晓南, 等. 粤北山区近25年来耕地表层土壤有机碳变化分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(8): 1247–1252. [Wen Y, Deng N R, Liu X N, et al. Variations of soil organic carbon of cropland topsoil in mountain area of northern Guangdong over 25 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8): 1247–1252.]
- [28] 宋丹, 李双异, 汪景宽. 下辽河平原区农田土壤有机碳含量时空变异研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 574–578. [Song D, Li S Y, Wang J K. Study of temporal and spatial variation for soil organic carbon in croplands in lower reaches of Liaohe river plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 574–578.]
- [29] 徐艳, 张凤荣, 郑必昭, 等. 集约化农区经济发展对耕地土壤有机碳含量变化的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 74–79. [Xu Y, Zhang F R, Zheng B C, et al. Influence of economic development level on topsoil organic carbon over time[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 74–79.]
- [30] 施园园, 赵华甫, 郎文聚, 等. 北京市耕地多功能空间分异及其社会经济协调模式解释[J]. *资源科学*, 2015, 37(2): 247–257. [Shi Y Y, Zhao H F, Yun W J, et al. Analysis on spatial differentiation of arable land multifunction and socio-economic coordination model in Beijing[J]. *Resources Science*, 2015, 37(2): 247–257.]
- [31] 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 等. 基于GIS的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 1–6. [Chuai X W, Huang X J, Lai L, et al. Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 1–6.]
- [32] 胡莹洁, 李月, 孔祥斌, 等. 1980–2010年北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4625–4636. [Hu Y J, Li Y, Kong X B, et al. Response of agricultural land carbon storage to land use change in Beijing from 1980 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4625–4636.]
- [33] 李亚, 张黎明, 陈瀚阅, 等. 基于Landsat遥感影像和1:50000土壤数据库的福州市耕地有机碳动态变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(4): 581–590. [Li Y, Zhang L M, Chen H Y, et al. Estimation of changes in soil organic carbon in farmlands in Fuzhou City using Landsat vegetation data and 1:50000 soil database[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(4): 581–590.]
- [34] 赵永志, 王胜涛. 北京都市型现代农业发展与耕地土壤资源可持续利用对策探讨[C]. 广州: 土壤资源持续利用和生态环境安全—中国土壤学会第十一届二次理事扩大会议暨学术会议, 2009. [Zhao Y Z, Wang S T. Discussion on the Countermeasures of Sustainable Use of Arable Land under the Development of Beijing Metropolis Type Modern Agriculture[C]. Guangzhou: Sustainable Utilization of Soil Resources and Ecological Environment Security—the Second Enlarged Meeting and the 11th Academic Conference of Soil Science Society of China, 2009.]
- [35] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. [Lv Y Z, Li B G. Soil Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.]
- [36] 李婧, 张超, 朱德海, 等. 基于空间技术北京市地貌类型区划研究[J]. *中国农业科技导报*, 2007, 9(2): 126–129. [Li J, Zhang C, Zhu D H, et al. Research on the relief zonal approach of Beijing based on spatial technology[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(2): 126–129.]
- [37] Mehra P, Baker J, Sojka R E, et al. Chapter five: A review of tillage practices and their potential to impact the soil carbon dynamics in advances in agronomy[J]. *Advances in Agronomy*, 2018, 150: 185–230.
- [38] Cillis D, Maestrini B, Pezzuolo A, et al. Modeling soil organic carbon and carbon dioxide emissions in different tillage systems supported by precision agriculture technologies under current climatic conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 183: 51–59.
- [39] 王秀丽, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(6): 1152–1158. [Wang X L, Zhang F R, Zhu T F, et al. The distribution and impact factors of soil organic carbon in mountainous areas of Beijing[J]. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1152–1158.]

Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing

KONG Xiangbin¹, HU Yingjie², LI Yue¹, DUAN Zengqiang¹

(1. College of Land Sciences and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of City Construction, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an ecological factor as well a typical fertility factor. The study of distribution characteristics and influencing factors of SOC are of great significance for enhancing the cultivated land production capacity and soil carbon storage. Based on agricultural soil sampling data, land use map, digital elevation model (DEM), and cultivated land type distribution map in 2010 and using the zonal statistic function of ArcGIS 10.0 software, we analyzed the spatial distribution feature of SOC density and the influence of natural and human factors in Beijing. The results are as follows: (1) In 2010, the average SOC density of the cultivated land in Beijing was 22.51 t/hm² and the carbon storage was 990.34×10⁴ t; (2) The SOC densities of cultivated land topsoil in the northwestern mountainous areas and suburban areas were higher than the other areas in Beijing. The average SOC density in the surface soil in Mentougou District was the highest among all the 16 districts, reaching 39.93 t/hm²; (3) Topography, soil type, soil texture, and planting type had significant effects on SOC density, The organic carbon density of cultivated topsoil generally increased with altitude; The SOC density of brown soil and cinnamon soil is higher than the other soil types, and the SOC density of cultivated topsoil generally increased with the clay content; The cultivated SOC density of cash crops is slightly higher than that of grain crops; (4) The comprehensive analysis showed that the SOC density of spring maize was the highest in middle and low mountain areas, while the open-air vegetable and facility agriculture fields had the highest SOC densities in hills and plain areas. The adjustment of cultivated land use in Beijing should consider the influence of topography, soil condition, and human factors on the SOC content of cultivated land, and the carbon sequestration capacity of cultivated land should be improved or maintained according to local conditions.

Key words: cultivated land; topsoil; organic carbon density; organic carbon storage; cultivated land use; Beijing Municipality