

DOI: 10.5846/stxb201801090067

胡莹洁,孔祥斌,姚静韬.北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征.生态学报,2019,39(2): - .

Hu Y J, Kong X B, Yao J T. Vertical distribution of soil organic carbon in plains areas of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征

胡莹洁^{1,2}, 孔祥斌^{1,2,*}, 姚静韬^{1,2}

1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193

摘要: 研究土壤有机碳垂直分布特征规律对精确测算土壤有机碳储量具有重要意义。本文通过野外调查实地挖取北京市平原区 40 个典型土壤剖面共 169 个样品数据, 研究土壤有机碳垂直分布特征。结果表明: 1) 北京市平原区 0—150 cm 土壤平均有机碳含量为 (5.98 ± 2.62) g/kg, 垂直分布上, 随剖面深度增加土壤有机碳含量逐渐降低, 且在浅层 (≤ 60 cm) 下降速度显著快于深层 (> 60 cm); 2) 各发生层次不同土壤质地的有机碳含量差异整体上均表现为粉粒及黏粒含量比例越高, 即质地越黏重, 土壤有机碳含量越高; 3) 不同土体构型的平均土壤有机碳含量大小关系为通体砂 < 通体壤 < 壤下黏 < 夹黏, 通体砂型土壤有机碳含量垂直变化相对平缓, 壤下黏型土壤有机碳含量在垂直方向呈“降—升—降”趋势, 通体壤及夹黏型则均呈先快速下降后缓慢下降趋势; 4) 耕地和园地土壤平均有机碳含量高于荒草地, 耕地在整个剖面中土壤有机碳含量均居于三种土地利用类型之首, 耕地和园地的土壤有机碳含量在 0—20 cm 和 40—60 cm 之间下降速度高达 40.10% 和 55.92%, 剖面深度超过 60 cm 后下降速度显著放缓, 受人类活动直接影响相对较少的荒草地在垂直方向上变化相对平缓。

关键词: 土壤有机碳; 垂直分布; 剖面深度; 北京市平原区

Vertical distribution of soil organic carbon in plains areas of Beijing

HU Yingjie^{1,2}, KONG Xiangbin^{1,2,*}, YAO Jingtao^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Key Laboratory of Agricultural Land Quality and Monitoring of Land and Resource, Beijing 100193, China

Abstract: Understanding the vertical distribution of soil organic carbon (SOC) is of great significance for precisely assessing SOC storage. In this paper, data from 169 samples of 40 typical soil profiles in the plains areas of Beijing were excavated in the field and analyzed to investigate the vertical distribution characteristics of SOC. The results showed: 1) The average SOC content in the 0—150 cm depth in the plains areas of Beijing was 5.98 ± 2.62 g/kg. SOC content gradually decreased with depth, and the rate of decrease in the shallow (≤ 60 cm) SOC was significantly faster than that in deep (> 60 cm) SOC. The average SOC contents in the depths of 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm and 100—150 cm were 8.49, 6.47, 4.78, 4.94, 4.61 g/kg and 3.87 g/kg, respectively. 2) The differences in the SOC of different soil textures at different profile layers generally showed that the higher the proportion of powder and clay content, namely, the more viscous the texture, the higher the content of SOC. 3) The trend of average SOC contents along different soil profile configuration patterns was sand-sand-sand < loam-loam-loam < loam-loam-clay < loam-clay-loam. The average SOC of sand-sand-sand was significantly lower than that of the other soil profile configurations, and its vertical variation was relatively gentle. The SOC content of loam-loam-clay showed a vertical trend of “decline-rise-decline”, while the SOC content of loam-loam-loam and loam-clay-loam showed a trend of rapid decrease and then slight decrease. 4) The average SOC contents of cultivated land and orchard land were higher than that of grassland, and the cultivated land in each profile level

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

收稿日期: 2018-01-09; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kxb@cau.edu.cn

ranked the first among the three kinds of land use types. The SOC content of cultivated land and orchard land decreased by 40.10% and 55.92%, respectively, between the depths of 0—20 cm and 40—60 cm, and the rate of decrease slowed down significantly in the profile depths deeper than 60 cm. Compared with the cultivated land and orchard land, which were more directly affected by human activities, the SOC contents of grassland changed relatively gently in the vertical direction.

Key Words: soil organic carbon; vertical distribution; profile depth; plains areas of Beijing

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)不仅在土壤质量演变过程中具有重要作用^[1],而且构成了陆地生态系统系统中最大的碳库^[2-3],其含量和变化已成为全球农业可持续发展、气候变化及碳循环研究的焦点与热点。土壤中有有机碳的分布在横向和纵向上都是连续的,是一个空间连续体^[4],研究土壤有机碳分布特征是精确测算土壤有机碳含量的前提和基础。对于土壤有机碳在水平方向的分布特征,国内外现有研究^[5-12]所用土壤有机碳数据采样深度多集中于表层 20 cm(10—40 cm),该采样深度在一定程度上影响了土壤有机碳储量测算精度^[13]。研究表明,掌握土壤有机碳在垂直方向的分布规律是准确测算土壤有机碳储量,研究其对气候变化和人类活动响应的关键^[14]。国内土壤有机碳垂直分布研究数据主要有两大来源:一是 1979—1985 年开展的全国第二次土壤普查^[14-17]和 1999 年开始实施的全国多目标区域地球化学调查^[18];二是通过野外调查实地挖取土壤剖面获取。前者数据空间尺度大,但数据年份相对陈旧;后者研究目前多集中于部分关键生态区^[19-22],如杨帆等^[21]在祁连山中段阴坡和阳坡各挖取 5 个深度为 120 cm 的土壤剖面,研究不同地形条件下土壤有机碳和无机碳的垂直分布特征;丁咸庆等^[22]在大围山采集 4 个深度为 100 cm 的土壤剖面土样,分析不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征。针对城市平原区的土壤有机碳垂直分布特征的研究较少^[23-24]。

北京市平原区面积虽然仅占全市土地面积 38%,但是该区域既是耕地尤其是高质量耕地集中区域,同时又是城市发展的主要地区,土地利用矛盾突出。随着社会经济发展和城市化推进,北京市平原区土地利用变化剧烈^[25-26],对土壤有机碳含量变化有重要影响^[27-28]。研究该地区土壤有机碳在垂直方向的变化特点,揭示不同土壤质地、不同土体构型、不同土地利用类型下土壤有机碳的垂直分布特征差异,既能够丰富城市地区土壤有机碳研究,也可以为准确测算北京市平原区土壤有机碳含量提供科学依据,具有重要的理论及现实意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

北京市平原区位于北京市东南部,属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,春秋短暂,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。该地区土层较深,土壤肥沃,土壤类型以潮土、褐土为主,热量条件满足一年两熟制,典型种植制度为冬小麦—夏玉米。北京市平原区既是城市集中发展区域,也是都市农业发展的重要区域,地上植被及土地利用类型变化剧烈^[25-26]。

1.2 土样采集与测定方法

从成土母质、地形地貌、土地利用等成土因素对土壤有机碳的影响特征出发,以第二次全国土壤普查的土壤类型图为基础图件,结合北京市植被类型图、北京市土地利用类型图(2010 年)、北京市地形图等图件以及 2010 年 9 月所开展的野外调查实际情况,最终确定布设 40 个典型土壤剖面,利用 GPS 获取样点的地理坐标(图 1),按照《野外土壤描述与采样手册》^[29]要求,详细记录各样点的剖面形态、土壤性状以及海拔、地形地貌、植被类型与土地利用类型等环境条件,按土壤发生学层次共计采集 169 个土壤样品。采用吸管法进行土壤颗粒分析,利用重铬酸钾氧化—外热源法测定土壤有机碳含量。

1.3 数据处理

由于是按土壤发生层次进行土壤剖面层次划分及土壤取样,故各样点土壤剖面深度不一,且剖面划分层

次数目及每层的深度都不尽相同,为便于比较,需对数据进行归一化处理,即将各剖面层次不同厚度有机碳含量数据归一化至可比较的相同深度上^[30]。本研究统一将剖面深度 1 m 以内的部分等间距地划分为 5 层,每层深度为 20 cm,对剖面深度超过 1 m 的部分不做分层。鉴于实际采样剖面程度最深不超过 150 cm,故本研究将土壤剖面划分为 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 和 100—150 cm 共计 6 层,对原有的土壤剖面层次的土壤有机碳含量按照深度进行加权处理。

$$C_{a-b} = \sum C_i \times \frac{H_i}{20} \quad (1)$$

式中: $a(0 \leq a \leq 80)$ 、 $b(20 \leq b \leq 100)$ 分别为加权后各层次的深度(cm); C_{a-b} 为加权后土壤深度在 $a-b$ cm 范围内的土壤有机碳含量(g/kg); C_i 为加权前剖面第 i 层土壤有机碳含量(g/kg), H_i 为 i 层在等间距 20 cm,即 $a-b$ cm 范围内的深度。该处理可将不同厚度土层的有机碳数据都归一化为 5 层等间距为 20 cm 的土壤有机碳含量。

类似地,对于 100—150 cm 的最深层,加权处理公式如下:

$$C_{100-150} = \frac{\sum C_j \times H_j}{\sum H_j} \quad (2)$$

式中: $C_{100-150}$ 为加权后土壤深度在 100—150 cm 范围内的土壤有机碳含量(g/kg); C_j 为加权前剖面第 j 层土壤有机碳含量(g/kg), H_j 为 j 层在 100—150 cm 范围内的深度。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳总体分布特征

将各发生层土壤有机碳含量按土层厚度进行加权平均,得到各剖面样点的平均土壤有机碳含量,利用 SPSS 18.0 软件对其进行描述性统计检验。结果表明,北京市平原区土壤有机碳含量服从正态分布(K-S 检验),平均含量为 (5.98 ± 2.62) g/kg,在全国属中等偏低水平^[15]。最大值为 16.95 g/kg,最小值为 1.32 g/kg,极差较大。变异系数为 43.82%,表明北京市平原区土壤有机碳研究样本总体上呈中等程度变异。

由图 2 可知,随着深度增加,各层次的土壤平均有机碳含量逐步降低,且在浅层(≤ 60 cm)下降速度显著快于深层(> 60 cm)。0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 土壤平均有机碳含量依次为 8.49、6.47 g/kg 和 4.78 g/kg;0—20 cm 到 20—40 cm 间和 20—40 cm 到 40—60 cm 间土壤有机碳含量下降幅度分别为 23.81% 和 26.02%。60 cm 后各层次间变化幅度趋缓,60—80、80—100 cm 和 100—150 cm 土壤平均有机碳含量依次为 4.94、4.61 g/kg 和 3.87 g/kg。

不同剖面深度的土壤有机碳含量差异大小亦存在一定差别。0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有机碳含量差异较大,范围依次为 1.78—16.95 g/kg 和 0.99—16.95 g/kg。随着剖面深度增加,各层次有机碳含量差异整体呈逐渐缩小趋势,60—80 cm 和 80—100 cm 有机碳含量的差异相对变大,可能是由于个别土壤剖面在淀积层的 60—100 cm 深度中存在埋藏层。

土壤有机碳含量与剖面深度的关系(图 3)显示,随着剖面深度的增加,土壤有机碳含量整体呈递减趋势,此外,土壤有机碳在剖面中的纵向分布也出现不规则的变化,不同质地层次的土壤有机碳含量在横向上延

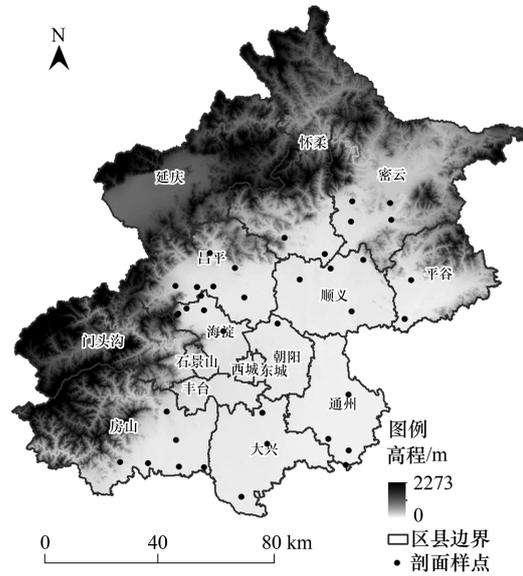


图 1 北京市高程及剖面样点分布图

Fig.1 Digital elevation model (DEM) and profile sampling sites of Beijing

伸^[30]。利用 40 个土壤剖面共计 169 个土壤样品的有机碳测定数据拟合土壤有机碳的纵向变化情况,在已有散点图基础上,利用相关分析确定土壤有机碳含量与剖面深度在 1% 置信水平下存在显著的负相关关系,相关系数为 -0.541,然后利用线性函数、对数函数、幂函数、指数函数、二次多项式等多个函数对其进行回归拟合,比较选择拟合结果最佳的回归模型,拟合曲线方程如下(式 3):

$$y = -7.2200 \times 10^{-6} \times x^3 + 0.0023x^2 - 0.2362x + 12.8417 \quad (3)$$

以上回归模型拟合优度(R^2)为 0.380,且通过 t 检验,表明以上回归系数具有统计意义,拟合数据对实测数据的模拟效果较好(图 3)。

2.2 不同土壤质地的有机碳含量差异

作为土壤最基本的物理性质之一,土壤质地对包括通透性、养分含量在内的各种土壤性状均有重要影响。本研究依据土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.5 mm)及砂粒(0.05—2 mm)的含量比例,比照美国农业部土壤质地分类三角坐标图进行土壤质地划分,研究各发生层次不同土壤质地的有机碳含量差异。40 个土壤剖面各发生层的土壤质地主要有以下 6 类:粘壤土、粉(砂)质黏壤土、粉(砂)壤土、壤土、砂质壤土和壤质砂土。其中,粉(砂)质黏壤土质地在第 3 层开始出现。

各发生层次不同土壤质地的有机碳含量存在一定差异(图 4)。表层土壤中,黏壤土和壤质砂土仅有 1 个样本,土壤有机碳含量分别为 6.38 g/kg 和 1.95 g/kg,SPSS 单因素方差分析结果表明,表层土壤有机碳含量在不同质地间差异显著($P < 0.05$),具体大小关系为:砂质壤土 < 壤土 < 粉(砂)壤土。表层土壤质地为粉(砂)壤土的土壤平均有机碳含量最高,为 11.32 g/kg,壤土次之,为 8.06 g/kg,砂质壤土略低于壤土,为 7.67 g/kg。亚表层土壤中壤质砂土仅有 1 个样本,其余 4 种土壤质地土壤有机质含量大小关系为:砂质壤土 < 粘壤土 < 壤土 < 粉(砂)壤土,土壤平均有机质含量依次分别为 4.21、4.62、6.07 g/kg 和 6.70 g/kg。第 3 层土壤中,各土壤质地土壤有机质含量大小关系为:壤质砂土 < 砂质壤土 < 壤土 < 粘壤土 < 粉(砂)壤土 < 粉(砂)质黏壤土。第 4 层土壤中,各土壤质地土壤有机质含量大小关系为:壤质砂土 < 粘壤土 < 砂质壤土 < 壤土 < 粉(砂)壤土 < 粉(砂)质黏壤土。整体上,各发生层次不同土壤质地的有机碳含量均表现为粉粒及黏粒含量比例越高,即质地越黏重,土壤有机碳含量越高的趋势。

在此基础上,利用相关分析探究各发生层次土壤有机碳含量与土壤黏粒、粉粒及砂粒含量之间的关系(表 1)。结果显示,表层和亚表层土壤有机碳含量与砂粒含量存在显著的负相关关系,与粉粒含量存在显著

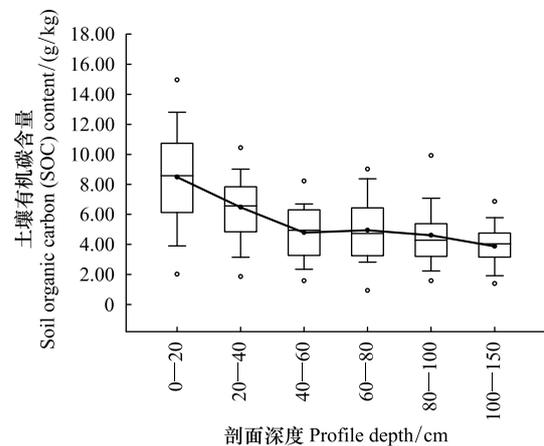


图 2 剖面内不同深度层次土壤有机碳含量变化
Fig.2 SOC of different layers in profile

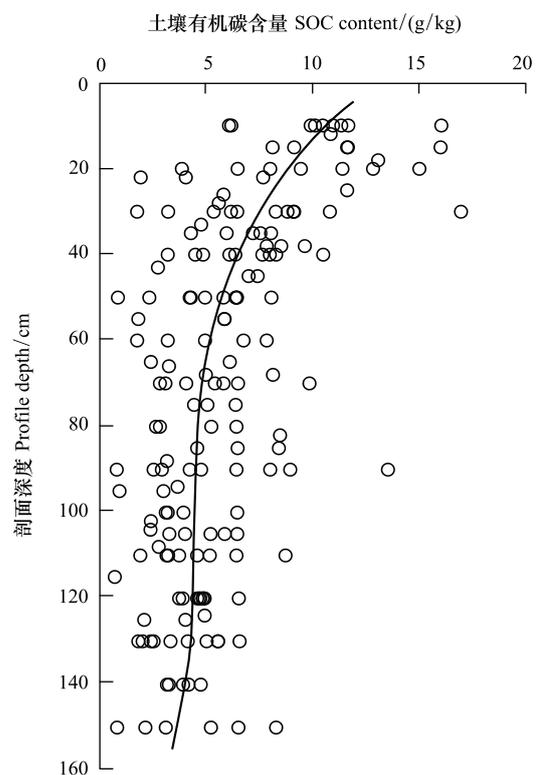


图 3 土壤有机碳含量随剖面深度变化的拟合曲线
Fig.3 Simulated curve of SOC in profile

的正相关关系,与黏粒含量关系不显著;而在相对较深的第3层和第4层,土壤有机碳含量与砂粒含量存在显著的负相关关系,与粉粒和黏粒含量存在显著的正相关关系。一般在气候条件相当情况下,土壤有机质含量与黏粒含量呈正相关^[24,31]。本研究中表层和亚表层土壤有机碳含量与黏粒相关关系不显著可能是由于各剖面表层和亚表层土壤质地相近且多为壤土,黏粒含量相差不大,颗粒组成差异主要在于砂粒与粉粒含量不同。

2.3 不同土体构型的有机碳垂直分布特征

土体构型是整个土体的各个层次的排列组合关系,不仅影响土壤的形态特征及其发育程度,同时也与土壤肥力关系密切^[32-34]。为研究不同土体构型的土壤有机碳分布特征差异,先将发生层次小于2层(含2层)以及土层厚度小于100 cm的剖面样本剔除,其余37个剖面按发生层次质地进行分类,共分为通体黏(通体黏壤土、通体黏土)、通体壤、通体砂(通体砂土、通体壤质砂土)、夹黏(壤/黏/壤、壤/黏壤/壤、壤/黏/黏壤/壤)、上壤下黏(壤/黏壤、壤/黏)5类。通体黏仅有1个剖面样本,有机碳含量为4.51 g/kg,因样本量过少代表性不强故未对其进行详细分析。其余4类土体构型的平均土壤有机碳含量存在一定差异(表2),平均土壤有机碳含量由小到大的土体构型依次为通体砂<通体壤<上壤下黏<夹黏,通体砂型土壤平均有机碳含量显著低于其他土体构型,仅为1.41 g/kg;夹黏型、上壤下黏型和通体壤型有机碳含量较高,依次为6.08、5.87 g/kg和

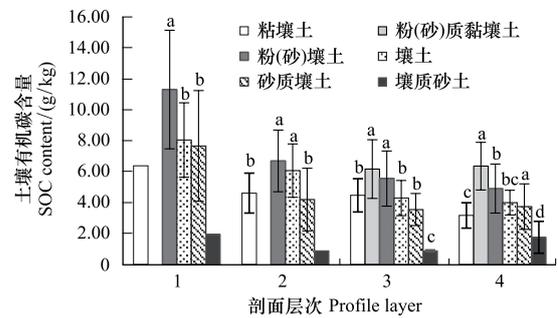


图4 各剖面层次不同土壤质地的有机碳含量差异

Fig.4 SOC with different soil texture in different profile layers
同剖面层次中不同土壤质地间不同字母表示差异显著($P < 0.05$), 误差线为标准偏差

表1 各层次土壤有机碳含量与颗粒组成的相关关系

Table 1 Correlation of SOC with soil particle composition in different profile layers

剖面层次 Profile layers	指标 Indicators	黏粒含量 Clay content/%	粉粒含量 Silt content/%	砂粒含量 Sand content/%
第1层 First layer	相关系数	0.038	0.557 **	-0.456 **
	显著性(双侧)	0.814	0.003	0.003
	样本量	40	40	40
第2层 Second layer	相关系数	0.177	0.483 **	-0.461 **
	显著性(双侧)	0.281	0.002	0.003
	样本量	39	39	39
第3层 Third layer	相关系数	0.435 **	0.693 **	-0.689 **
	显著性(双侧)	0.006	0.000	0.000
	样本量	38	38	38
第4层 Forth layer	相关系数	0.482 **	0.579 **	-0.665 **
	显著性(双侧)	0.008	0.001	0.000
	样本量	29	29	29

* 表示5%置信水平下显著相关, ** 表示1%置信水平下显著相关

表2 不同土体构型土壤有机碳含量差异

Table 2 Differences in SOC of different soil configurations

土体构型 Soil configurations	样本量 Sample size	平均值 Mean/ (g/kg)	标准差 Stand. Deviation	最小值 Minimum/ (g/kg)	最大值 Maximum/ (g/kg)	变异系数 Coefficient of variation/%
通体砂 Sand-sand-sand	2	1.41	0.12	1.32	1.49	8.55
通体壤 Loam-loam-loam	24	5.77	1.40	3.28	7.93	24.26
夹黏 Loam-clay-loam	5	6.08	2.10	4.27	9.22	34.48
上壤下黏 Loam-loam-clay	6	5.87	1.70	3.46	8.23	28.96

5.77 g/kg,三者之间差异较小。从变异系数的角度上看,通体砂型变异系数为 8.55%,为弱变异,其余 3 类土体构型土壤有机碳含量变异系数介于 24.27%—34.48%之间,均属中等程度变异。

垂直分布上,各土体构型的土壤有机碳含量从表层到底层总体均呈下降趋势,但不同土体构型间存在一定差异(图 5)。通体砂型土壤各个剖面深度的土壤有机碳含量均显著低于其他土体构型,且在垂直变化上相对平缓,从 0—20 cm 的 1.86 g/kg 逐步下降至 100—150 cm 的 1.32 g/kg。上壤下黏型土壤有机碳含量变化则呈现“降—略升—降”的趋势,从 0—20 cm 的 8.70 g/kg 降至 40—60 cm 的 4.94 g/kg,而后略有增加,60—80、80—100 cm 土壤有机碳含量分别为 5.16、5.25 g/kg,随后继续降低。通体壤及夹黏型土壤的有机碳含量垂直变化均呈先快速下降后缓慢下降的特征,其中,通体壤型土壤在 0—20 cm 至 40—60 cm 间下降迅速,之后缓慢下降,而夹黏型土壤在 0—20 cm 至 20—40 cm 间下降迅速,之后下降速度显著减小。上述结果表明,质地

过轻的土壤,如通体砂型中的砂土及壤质砂土,在孔隙多通透性好的同时有机碳分解快,故有机碳含量低。质地黏重的土壤,如上壤下黏型土壤的下层黏重土壤以及夹黏型土壤的夹层黏重土壤,有利于有机碳积累,有机碳含量相对较高,故上壤下黏型土壤有机碳含量在垂直方向呈现“降—略升—降”的趋势,而夹黏型土壤则呈先快速下降后缓慢下降的变化趋势。但是过于黏重的土壤(如通体黏)通透性相对较差,不利于植物根系生长及微生物活动,一定程度上限制了有机碳的来源,因而有机碳含量不高^[23,34]。

利用相关分析探究不同土体构型土壤的有机碳含量与剖面深度的相关关系,结果显示,通体砂型土壤的有机碳含量与剖面深度相关关系并不显著,这可能与通体砂型土壤在整个剖面上质地较粗,保水保肥性相对较差有关。通体壤、夹黏及上壤下黏型土壤的有机碳含量与剖面深度均存在显著的负相关关系,但相关系数存在一定差异(表 3)。

表 3 不同土体剖面构型土壤有机碳含量与剖面深度的相关关系

Table 3 Correlation of SOC with profile depth of different soil configurations

指标 Indicators	通体砂 Sand-sand-sand	通体壤 Loam-loam-loam	夹黏 Loam-clay-loam	上壤下黏 Loam-loam-clay
相关系数 Pearson Correlation	-0.175	-0.610 **	-0.389 *	-0.602 **
显著性(双侧) Sig. (2-tailed)	0.628	0.000	0.049	0.000
样本量 Sample size	10	96	26	30

在相关分析结果的基础上,利用线性函数、对数函数、幂函数、指数函数、二次多项式等多项函数分别对通体壤、夹黏及上壤下黏型土壤的有机碳含量与剖面深度进行回归拟合,比较选择拟合优度及显著性最佳的回归模型(图 6),3 个拟合回归结果均通过 t 检验,表明所得回归系数均具有统计意义,拟合方程对实测数据的模拟效果较好。

2.4 不同土地利用类型的有机碳垂直分布特征

土地利用类型也是影响土壤有机碳含量的一项重要因素,尤其是当自然环境条件相当时,不同的土地利用类型将改变土壤水、热、光、气和养分间的相互关系,进而影响土壤有机碳含量及其在垂直方向的分布。依据土地利用类型的不同,将各剖面样点划分为耕地、园地、荒草地三类,其中,荒草地包括植被类型为草本植物和灌木的荒草地及未利用地。统计海拔低于 100 m 的不同土地利用类型土壤有机碳含量差异,结果表明,3

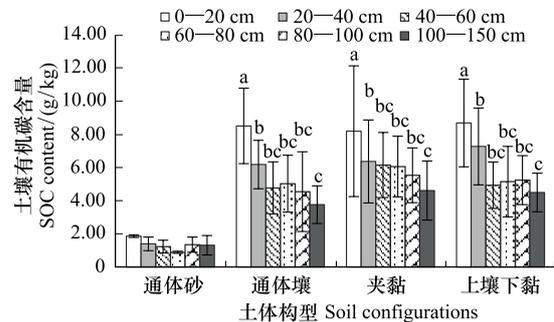


图 5 不同土体构型土壤有机碳含量随剖面深度变化

Fig.5 SOC with increasing profile depth in different soil configurations

同土地构型下不同土层深度间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 误差线为标准偏差

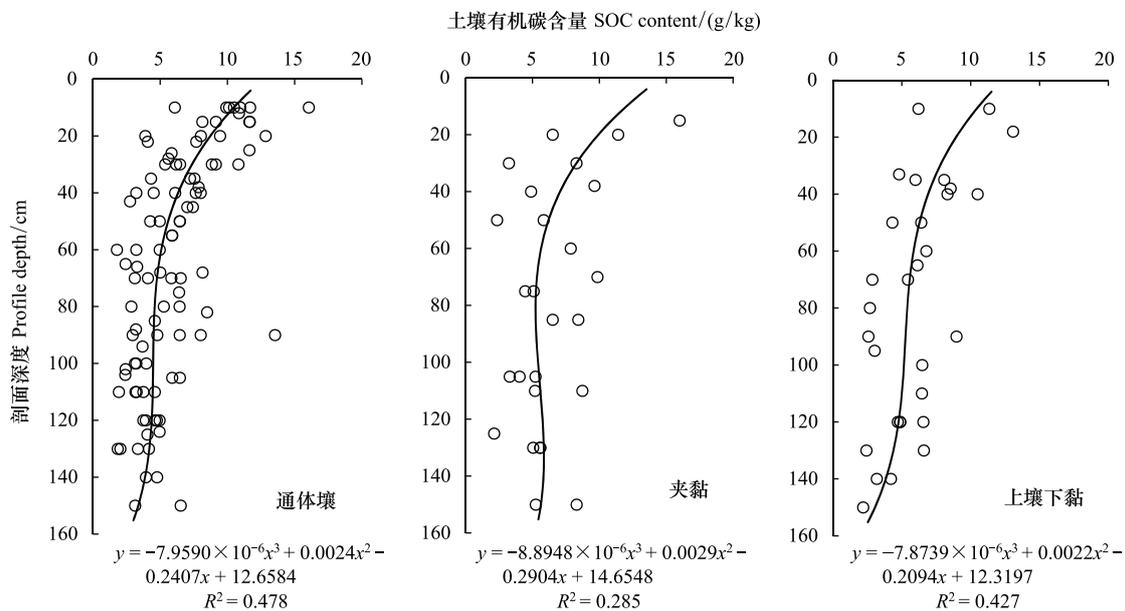


图 6 不同土体剖面构型土壤有机碳含量随剖面深度变化的拟合曲线

Fig.6 Simulated curve of SOC in profile of different soil configurations

种利用类型中,耕地土壤有机碳含量为 6.05 g/kg,高于园地(5.09 g/kg)和荒草地(4.59 g/kg);耕地、园地和荒草地的变异系数相近,依次为 30.69%、46.32%和 46.08%,均属于中等变异。耕地上人类进行的农业生产活动中,耕作施肥、灌溉排水、平整土地、改造地形等农田管理行为,均是旨在提高土壤肥力的措施,对土壤有机碳含量具有一定的提升作用,因而耕地的平均土壤有机碳含量整体上高于其他土地利用类型,且变异性相对较小。园地和荒草地土壤有机碳变异系数相对较高,可能与地上植被种类差异较大有关。

分析不同土地利用类型土壤有机碳垂直分布特征(图 7),可知从浅到深各剖面层次中耕地平均土壤有机碳含量均居于该三种土地利用类型之首。受人类活动

直接影响相对较少的荒草地在垂直方向上的变化相对平缓,随剖面深度增加,有机碳含量从 0—20 cm 的 6.34 g/kg 逐步下降至 100—150 cm 的 3.51 g/kg。受人类活动直接影响相对较多的耕地和园地的土壤有机碳含量则随剖面深度增加呈先快速下降后缓慢下降的特征,有机碳含量分别从 0—20 cm 的 9.00 g/kg 和 7.08 g/kg 快速下降至 40—60 cm 的 5.23 g/kg 和 3.05 g/kg,降幅分别为 41.89%和 54.61%,剖面深度超过 60 cm 之后,下降速度显著放缓。

利用相关分析探究不同土地利用类型土壤有机碳含量与剖面深度的相关关系,结果显示,园地土壤有机碳含量与剖面深度无显著相关关系,耕地及荒草地的土壤有机碳含量与剖面深度均存在显著的负相关关系,相关系数分别为-5.73 和-0.602(表 4)。

在相关分析结果的基础上,利用线性函数、对数函数、幂函数、指数函数、二次多项式等多项函数分别对耕地和荒草地土壤有机碳含量与剖面深度进行回归拟合,比较选择拟合优度及显著性最优的回归模型(图 8),各拟合回归结果均通过 t 检验,表明回归系数具有统计意义,拟合数据对实测数据的模拟效果良好。

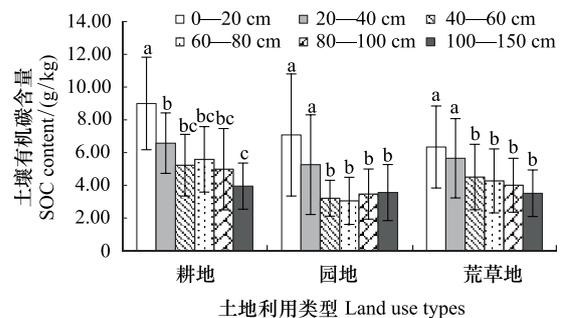


图 7 不同土地利用类型土壤有机碳含量随剖面深度变化

Fig.7 SOC with increasing profile depth in different land use types

同一利用类型下不同土层深度间不同字母表示差异显著($P < 0.05$),误差线为标准偏差

表 4 不同土地利用类型土壤有机碳含量与剖面深度的相关关系

Table 4 Correlation of SOC with profile depth of different land use types

指标 Indicators	耕地 Cultivated land	园地 Orchard land	荒草地 Grassland
相关系数 Pearson Correlation	-0.573 **	-0.394	-0.602 *
显著性(双侧) Sig. (2-tailed)	0.000	0.077	0.019
样本量 Sample size	109	21	19

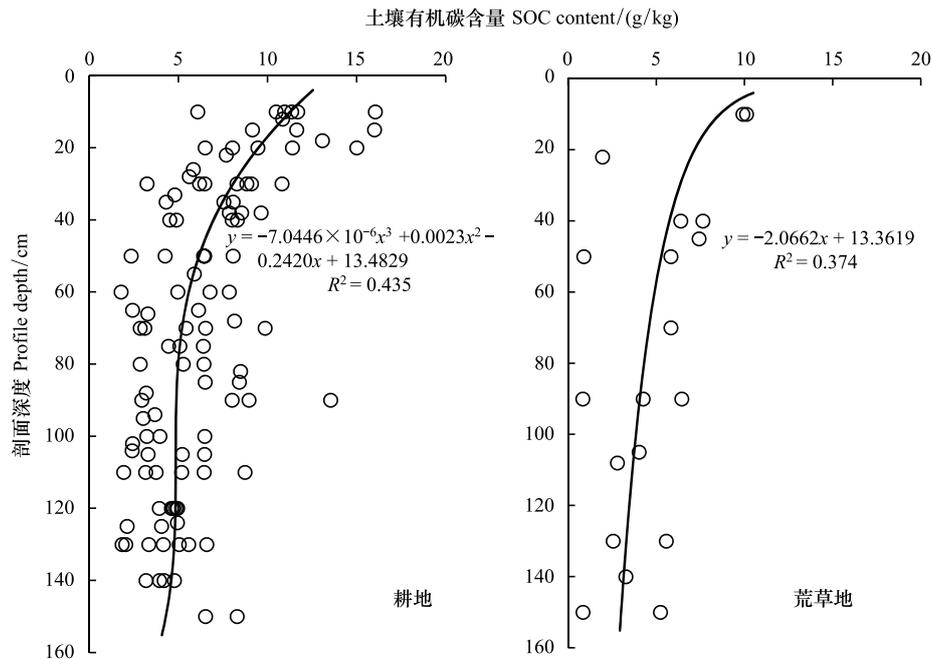


图 8 不同土地利用类型土壤有机碳含量随剖面深度变化的拟合曲线

Fig.8 Simulated curve of SOC in profile of different land use types

3 讨论

3.1 北京市平原区土壤有机碳含量与山区的比较

本研究利用 2010 年野外实地挖取的 40 个剖面样点数据,对北京市平原区土壤有机碳含量及垂直分布特征进行分析。结果表明,北京市平原区有机碳平均含量为 (5.98 ± 2.62) g/kg,最大值为 16.95 g/kg,最小值为 1.32 g/kg,变异系数为 43.82%。同时期王秀丽等人^[23]对北京市山区土壤有机碳分布的研究显示,北京山区有机碳平均含量为 (12.61 ± 9.58) g/kg,最大值为 46.17 g/kg,最小值为 2.33 g/kg,变异系数为 76.02%。将本研究结果与上述结果进行比较,可知北京市平原区土壤有机碳平均含量约为山区的一半,极差和变异性均显著低于山区。该差异符合本研究及王秀丽等人^[23]研究中土壤有机碳含量随海拔增加而增加的趋势。

从垂直分布特征角度上看,本研究表明北京市平原区各层次的土壤平均有机碳含量随剖面深度增加而逐步降低,且在浅层(<60 cm)下降速度显著快于深层(>60 cm),0—20 cm 到 20—40 cm 间和 20—40 cm 到 40—60 cm 间土壤有机碳含量下降幅度分别为 23.81% 和 26.02%,60 cm 后各层次间变化幅度趋缓。王秀丽等人^[23]的研究将所有剖面依据发生层次划分为 4 个层次,结果表明,随着剖面深度增加,北京市山区各发生层次的土壤平均有机碳含量逐步降低,表层到第二发生层次迅速降低,下降幅度达 44.48%;第二发生层次以下的下降幅度趋缓。综上所述,北京市平原区与山区土壤有机碳含量在垂直方向的变化趋势基本一致。

3.2 土壤有机碳垂直分布与碳储量的测算

本文分析北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征规律,研究结果可以为精确测算研究区土壤碳储量提供

一定的科学参考。现有土壤有机碳储量研究多集中于表层土壤,亦有部分学者尝试使用剖面数据对深度超过 1 m 的土壤有机碳储量进行测算^[18,30,35]。徐艳等^[30]运用纵向拟合方法和横向插值方法对河北省曲周县四疃乡土壤有机碳储量进行测算,将所获取的 30 个剖面数据进行纵向拟合,获得对数函数曲线方程拟合效果最佳。奚小环等^[18]在对全国土壤碳储量方法研究中,发现直线模型计算土壤有机碳储量的误差远大于指数模型。该研究基于各省及全国土壤有机碳含量的垂直分布特征分析,发现土壤有机碳含量一般从表层至深层递减,表层递减速率较快,深层逐渐减慢,符合指数模型的空间变化规律,故而运用指数模型对土壤有机碳库进行测算。本研究中将所获取的 40 个剖面所有数据进行纵向拟合,模拟效果较好的是三次多项式函数模型;将各剖面数据按照不同土体构型、不同土地利用类型分别进行土壤有机碳含量与土壤深度关系拟合,所得最佳拟合方程类型及拟合优度存在一定差异。在数据允许的情况下,未来的土壤有机碳储量核算研究可将模型拟合法与土壤类型法、植被类型法^[36-37]等方法相结合,即基于不同土壤类型或植被类型研究土壤有机碳含量垂直分布规律,分别进行土壤有机碳含量与土壤深度关系拟合,继而进行区域土壤有机碳储量测算。

3.3 不足与展望

土壤有机碳含量由碳输入与碳输出两方面决定,碳输入主要源于自然植被及人类土地利用活动(施肥等),碳输出主要指土壤碳的分解^[38]。气候条件(气温、降水)等是决定土壤有机碳的重要先决条件^[31,38],一方面直接影响植被生物量进而影响土壤碳输入大小,另一方面直接影响土壤微生物活动进而影响土壤碳分解强弱。考虑北京市平原区内气候条件相对一致,故本研究中未考虑上述因素对土壤有机碳含量及垂直分布的影响。如何定量刻画不同气候条件下土壤有机碳含量及垂直分布特征差异及其形成机理,还需进一步在更大的空间尺度上进行深入研究。

除自然因素外,人类活动也是影响土壤有机碳的重要因素。北京市平原区是城市发展与耕地保护矛盾最为激烈的地区,土地利用类型变化剧烈,如何定量刻画该背景下北京市不同剖面深度土壤有机碳的时空演变规律是未来的研究重点。

4 结论

通过对北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征的分析,得出北京平原区土壤有机碳平均含量为 (5.98 ± 2.62) g/kg,属于中下水平,变异系数为 43.82%,中等程度变异。垂直方向上,各层次土壤平均有机碳含量随深度增加逐步降低,且在浅层(≤ 60 cm)下降速度显著快于深层(> 60 cm),0—20 cm 土壤有机碳含量差异较大,20 cm 以下层次的有机碳含量差异随着深度增加而逐渐缩小。在不同影响因素下,北京市平原区土壤有机碳垂直分布具有以下特征:1)各发生层次有机碳含量整体上均表现出质地越黏重,土壤有机碳含量越高的变化趋势;2)不同土体构型的平均土壤有机碳含量大小关系为通体砂<通体壤<上壤下黏<夹黏,通体砂型土壤有机碳含量显著低于其他土体构型,且在垂直方向上变化相对平缓,上壤下黏型土壤有机碳含量则呈现“降—升—降”的趋势,通体壤及夹黏型土壤的有机碳含量垂直变化均呈先快速下降后缓慢下降的特征;3)耕地和园地土壤平均有机碳含量高于荒草地,耕地在各个剖面层次中土壤有机碳含量均居于 3 种土地利用类型之首。垂直方向上,受人类活动直接影响相对较少的荒草地变化相对平缓,耕地和园地的土壤有机碳含量在浅层下降明显,剖面深度超过 60 cm 之后,下降速度显著放缓。

参考文献 (References):

- [1] 吕贻忠,李保国. 土壤学. 北京:中国农业出版社,2006:151-159.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil science society of America journal*, 1992, 57(1): 192-194.
- [4] 张凤荣. 土壤地理学. 北京:中国农业出版社,2001.
- [5] Franzluebbbers A J. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern united states. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2): 347-357.
- [6] Yigini Y, Panagos P. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of the Total Environment*, 2015, 513: 102-111.

- Environment, 2016, 557-558: 838-850.
- [7] Chevallier T, Voltz M, Blanchart E, Chotte J L, Eschenbrenner V, Mahieu M, Albrecht A. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol (Martinique). *Geoderma*, 2000, 94(1): 43-58.
- [8] Cao X H, Long H Y, Lei Q L, Liu J, Zhang J Z, Zhang W J, Wu S X. Spatio-temporal variations in organic carbon density and carbon sequestration potential in the topsoil of Hebei Province, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(11): 2627-2638.
- [9] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1546-1554.
- [10] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 李生秀. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价. *农业工程学报*, 2010, 26(S2): 325-330.
- [11] 张春华, 王宗明, 任春颖, 宋开山, 张柏, 刘殿伟. 松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空格局. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 300-307.
- [12] 谭梦, 黄贤金, 钟大洋, 赵荣钦, 顾留其, 徐泽基, 蒋超俊, 黄金碧. 土地整理对农田土壤碳含量的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 324-329.
- [13] Olson K R, Al-Kaisi M M. The importance of soil sampling depth for accurate account of soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss. *Catena*, 2015, 125: 33-37.
- [14] Wang S, Huang M, Shao X M, Mickler R A, Li K R, Ji J J. Vertical distribution of soil organic carbon in China. *Environmental Management*, 2004, 33(S1): S200-S209.
- [15] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [16] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 362-367.
- [17] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 李超凡, 韩其飞, 范彬彬. 天山北麓不同土地覆被下土壤有机碳垂直分布特征. *干旱区研究*, 2013, 30(5): 913-918.
- [18] 奚小环, 杨忠芳, 夏学齐, 李敏. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究. *地学前缘*, 2009, 16(1): 194-205.
- [19] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 吕宪国. 垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响. *环境科学*, 2013, 34(1): 283-287.
- [20] 李龙波, 刘涛洋, 李晓东, 刘文景, 刘丛强. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 241-247.
- [21] 杨帆, 黄来明, 李德成, 杨飞, 杨仁敏, 赵玉国, 杨金玲, 刘峰, 张甘霖. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1226-1236.
- [22] 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 侯红波, 彭佩钦, 彭红东. 大围山不同海拔森林土壤有机碳垂直分布特征. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 258-262.
- [23] 王秀丽, 张凤荣, 朱泰峰, 周建, 吴昊, 杨黎芳. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究. *资源科学*, 2013, 35(6): 1152-1158.
- [24] 吕贻忠, 张凤荣, 孙丹峰. 百花山山地土壤有机质的垂直分布规律. *土壤*, 2005, 37(3): 277-283.
- [25] 奉婷, 张凤荣, 聂鑫, 谢臻, 汪晗. 北京平原区粮菜林三地类时空转变特征. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 257-264.
- [26] 孙强, 蔡运龙, 王乐. 北京耕地流失的时空特征与驱动机制. *资源科学*, 2007, 29(4): 158-163.
- [27] Ye H C, Huang Y F, Chen P F, Huang W J, Zhang S W, Huang S Y, Hou S. Effects of land use change on the spatiotemporal variability of soil organic carbon in an urban-rural ecotone of Beijing, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(4): 918-928.
- [28] Wang Z C, Liu S S, Huang C, Liu Y Y, Bu Z J. Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in Northeast China. *CATENA*, 2017, 152: 1-8.
- [29] 中国科学院南京土壤研究所. 野外土壤描述与采样手册. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2009.
- [30] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 张琳, 孔祥斌. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨. *土壤通报*, 2005, 36(6): 836-839.
- [31] Rabbi S M F, Tighe M, Delgado-Baquerizo M, Cowie A, Robertson F, Dalal R, Page K, Crawford D, Wilson B R, Schwenke G, Mcleod M, Badgery W, Dang Y P, Bell M, O'Leary G, Liu D L, Baldock J. Climate and soil properties limit the positive effects of land use reversion on carbon storage in Eastern Australia. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17866.
- [32] 李学敏, 翟玉柱, 李雅静, 刘全凤, 王振明. 土体构型与土壤肥力关系的研究. *土壤通报*, 2005, 36(6): 975-977.
- [33] 李梅, 张学雷. 基于 GIS 的农田土壤肥力评价及其与土体构型的关系. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 129-136.
- [34] 叶文华. 华北平原农田土体构型与作物生长关系的研究. *地理学报*, 1985, (1): 37-49.
- [35] 奚小环, 张建新, 廖启林, 陈德友, 白荣杰, 黄增芳. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题——以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 58-67.
- [36] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松雨, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, (5): 533-544.
- [37] Wang S Q, Zhou C H, Liu J Y, Tian H Q, Li K R, Yang X M. Carbon storage in northeast China as estimated from vegetation and soil inventories. *Environmental Pollution*, 2002, 116(1): S157-S165.
- [38] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.