

DOI: 10.5846/stxb201911142431

李瑾璞, 于秀波, 夏少霞, 赵玮, 王树涛, 许策. 白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征. 生态学报, 2020, 40(24): 8928-8935.

Li J P, Yu X B, Xia S X, Zhao W, Wang S T, Xu C. The spatial distribution of soil organic carbon density and carbon storage in Baiyangdian wetland. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8928-8935.

白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征

李瑾璞^{1,2}, 于秀波¹, 夏少霞^{1,*}, 赵 玮¹, 王树涛³, 许 策¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001

3 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001

摘要: 湿地生态系统碳储量是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 提供重要的生态系统服务功能。白洋淀湿地是国家重要生态湿地和华北平原最大的淡水湿地, 同时是雄安新区的核心水系, 湿地区土壤碳储量的估算研究将为湿地生态系统服务评估和湿地生态恢复提供数据支撑。研究通过对白洋淀湿地 7 种不同地类的 105 个土壤剖面进行分层取样, 揭示了其湿地土壤有机碳密度及储量的空间分布特征, 结果表明: (1) 白洋淀湿地地区土壤有机碳含量整体偏低, 在各层土壤中, 淹水芦苇湿地的有机碳含量均显著高于其他植被类型, 约为其他类型土壤碳含量的 3 倍左右。 (2) 在各植被类型中土壤有机碳含量均以表层 (0—20 cm) 最高, 其分配比例均集中在 30% 左右, 随着土壤剖面深度的增加, 湿地土壤的有机碳含量逐渐减少。 (3) 不同植被类型土壤有机碳含量与土壤有机碳密度的差异显著, 具体表现为: 乔木园地 < 旱地 < 常绿针叶林 < 落叶阔叶林 < 水田 < 台田芦苇 < 淹水芦苇。 (4) 根据估算, 白洋淀湿地区的土壤有机碳储量约为 5816.77×10^3 Mg。随着雄安新区环境治理工作的推进, 白洋淀湿地区生态系统固碳将呈现持续向好态势, 结合生态恢复和土地布局优化, 尽量减少雄安新区建设中土地流转带来的碳排放影响, 对提高区域生态效益具有重要意义。

关键词: 白洋淀湿地; 土壤有机碳; 植被类型; 碳储量; 空间分布特征

The spatial distribution of soil organic carbon density and carbon storage in Baiyangdian wetland

LI Jinpu^{1,2}, YU Xiubo¹, XIA Shaoxia^{1,*}, ZHAO Wei¹, WANG Shutao³, XU Ce¹

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001

3 College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071001

Abstract: Carbon storage of wetland ecosystem plays an important role in the terrestrial ecosystem carbon cycle and holds important ecosystem service functions. Baiyangdian Wetland is a national key ecological wetland and the largest freshwater wetland in the North China Plain. As the core water system in the Xiong'an New Area, it is critical to estimate the soil carbon storage in Baiyangdian Wetland, which will provide data support for ecosystem service evaluation and wetland ecosystem restoration. In this study, 105 soil profiles in seven different vegetation types in Baiyangdian wetland region were layered and sampled. The spatial distribution of soil organic carbon density and storage were clarified based on physical and chemical analysis in laboratory and statistical analysis. The results showed that: (1) the average Soil Organic Carbon (SOC) content in the surface soil (0—20 cm) in Baiyangdian wetland is 8.53—17.70 g/kg, which is relatively lower than

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701212); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19020305, XDA23040203); 国家生态系统观测研究共享服务平台能力建设项目

收稿日期: 2019-11-14; **修订日期:** 2020-11-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiasx@igsnrr.ac.cn

those of the other wetlands. The SOC content varied among different vegetation types and the organic carbon content in reed marsh is about three times than that of the other land use types. (2) In terms of the vertical distribution characteristics, the SOC in Baiyangdian wetland decreased as the increase of the soil depth, and it is highest in the surface layer (0—20 cm), which account for about 30% of the total amount of the soil. (3) The dynamics of density and content of SOC is consistent and it varied according to the vegetation tapes. It showed that the garden plot < dry land < evergreen coniferous forest < deciduous broad-leaved forest < paddy field < ota reed < flooded reed. The organic carbon density of flooded reed (24.36 kg/m^2) is significantly higher than that of the other vegetation types. (4) The total amount of SOC storage in this region is $5816.77 \times 10^3 \text{ Mg}$. With the environmental improvement in the Xiong'an New Area, Baiyangdian Wetland will continue to increase its ecosystem carbon sequestration. It is of great significance for regional ecological benefits to combine with ecological restoration and land layout optimization, and minimize the carbon emissions due to land transfer in the construction of the Xiongan New Area.

Key Words: Baiyangdian wetland; soil organic carbon; vegetation type; carbon storage; spatial distribution;

土壤碳库是碳循环与全球变化研究的重要环节^[1],作为碳移动和流通的转换媒介,土壤碳储量变化常常作为评价土壤质量的指标。而湿地土壤有机碳含量占到整个陆地碳库的 10%^[2]。因其积水厌氧的环境而在土壤中积累大量有机碳,起着“碳汇”的功能^[3-4]。因此,准确估算湿地碳储量对于认识碳循环过程,制定科学合理的生态系统碳管理措施具有重要意义^[5-6]。

目前,各国的学者针对土壤有机碳储量开展了大量研究,我国对土壤碳储量研究自 20 世纪 90 年代初,主要方法包括结合土壤类型、植被分布图等对有机碳含量进行加权平均法估算^[7]以及根据土壤有机碳与容重的关系进行碳密度估算^[8],从而确定不同类型土壤中的碳储量,根据估算中国 1m 深的土壤碳储量在 70—90 Pg 范围^[9-10]。随着 3S 技术的发展,遥感与模型拟合的方法为全球土壤碳储量的估算提供了新的手段^[11],但系统的土壤监测数据的缺失是导致土壤碳储量估算结果存在较大不确定性的重要原因,因此开展实地调查研究非常必要^[12]。土地利用方式变化是引起土壤碳储量变化的关键因素之一,不同土地覆被类型的碳储存能力不同,同时,由一种土地覆被类型转换为另一种类型过程中往往会导致碳储量的变化^[13]。在黑河流域的研究表明,由灌木林和草地向农田等土地类型的转化,导致了土壤有机碳储量的降低^[11]。对中国森林、草地、农田和湿地等不同生态系统土壤有机碳储量的变化,发现湿地有机碳储量呈减小的趋势^[12]。

湿地是受人类活动干扰强度较大的区域之一,其碳储量变化动态也是全球变化科学中的前沿与热点。湿地生态系统类型多样,沼泽湿地^[14]、河口三角洲湿地^[15]、湖泊湿地^[16-18]、海岸湿地^[19]、红树林湿地^[20]等类型的碳储量具有较大的差异。而随水文和高程梯度变化,在同一湿地区,碳储量也具有较大的变异性^[16]。因此,湿地生态系统碳储量测算也是湿地生态系统研究的难点。白洋淀湿地作为华北平原唯一的淡水湖泊湿地,是雄安新区的核心水系。近几十年来,白洋淀湿地面积不断缩减,对湿地的生态功能产生了不利的影响。白洋淀的生态修复和保护是雄安新区总体规划中的重要组成部分,开展白洋淀湿地区域土壤碳储量的调查与初步研究,将为白洋淀湿地恢复提供本底数据。研究在白洋淀湿地区采集了 7 种地类的 105 个土壤剖面,并对其有机碳含量进行分层测定,估算了湿地区总碳储量,初步揭示了白洋淀湿地区土壤碳储量的时空特征规律,将为白洋淀湿地及雄安新区的生态修复及碳库管理提供科学支撑。

1 研究方法

1.1 研究区概况

白洋淀湿地是典型的水陆交错带湿地生态系统,处于华北平原中部($38^{\circ}43'—39^{\circ}02' \text{N}$, $115^{\circ}38'—116^{\circ}07' \text{E}$),隶属大清河水系,有九条河流或渠道流入白洋淀。该区域位于暖温带半干旱气候区,多年平均气温为 $7.3—12.7^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量仅 563.9 mm ,80 % 的降水集中在 6—8 月,年均蒸发量为 1369 mm 。白洋淀湿地

主要由水域、芦苇沼泽、台田以及浅滩湖滨带等多种湿地类型组成,主要植被类型为芦苇^[21]。研究以白洋淀水域边界为基础,通过 ArcGIS 缓冲区分析的工具建立 2 km 缓冲区作为研究区,即白洋淀湿地区,进行实验设计和采样工作。

1.2 土壤样品的采集及预处理

在白洋淀湿地区范围内选取 5 个典型样区,每个样区选取 7 种典型的地类(落叶阔叶林、常绿针叶林、乔木园、旱地、水田、台田芦苇、淹水芦苇),在 2019 年 5—6 月对每种地类进行了 3 次重复采样,共设土壤剖面 105 个。鉴于土壤有机碳主要分布在 100 cm 以内,因此,本研究以 100 cm 作为本次研究的采样深度^[9]。使用土钻及环刀、容重钻等工具,按 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 5 个深度分层采集土样,每层约 2 kg,带回实验室分析^[16]。采样同时利用软件进行 GPS 定位,并详细记录采样点的地类、经纬度坐标及高程等相关信息。野外采回的土样经自然风干、研磨、过筛后进行土壤有机碳含量的测定。

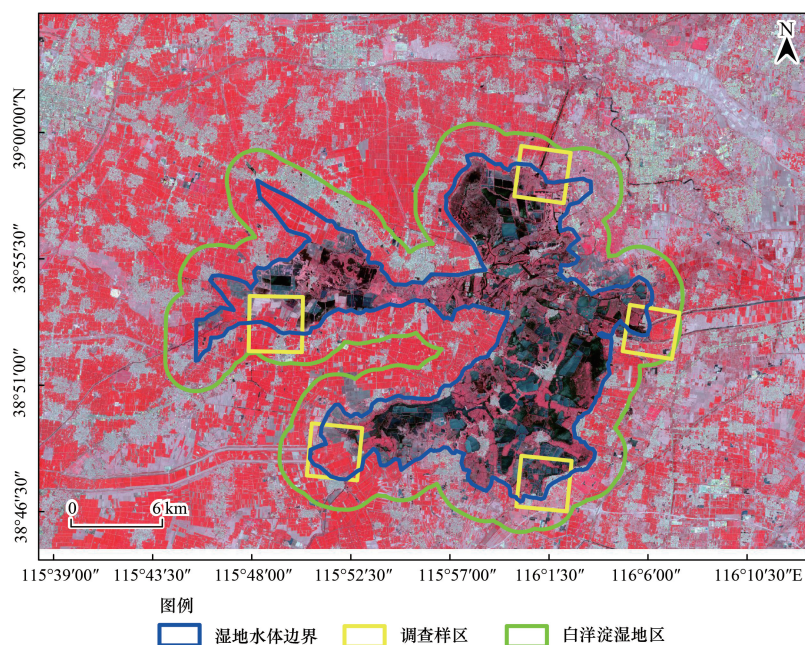


图1 研究区示意图

Fig.1 Location map of Baiyangdian wetland

底图为哨兵 2 号影像,获取日期为 2019 年 5 月 13 日

1.3 样品的测定方法及数据处理

有机碳测定采用重铬酸钾外加热法,土壤容重的测定采用环刀法^[22],土壤有机碳密度及有机碳储量参考了王勇辉^[23]等人研究中的计算方法:

土壤有机碳密度计算公式如下:

$$\text{SOCD}_i = C_i \times P_i \times H_i \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中, SOCD_i 为第 i 层土壤有机碳密度(kg/m^2); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(g/kg); P_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3); H_i 为剖面深度(cm); 10^{-2} 为单位转换系数。

土壤有机碳储量计算公式如下:

$$\text{SOC}_{\text{storage}} = \sum_{i=1}^n S \times \text{SOCD}_i \quad (2)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{storage}}$ 代表某种植被类型的土壤有机碳储量; S 代表某种植被类型面积。

采样数据进行录入后,用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析,选择 Duncan 新复极差法和 t 检验($\alpha=0.05$)对

不同处理的差异性进行比较,用 Origin 2016 进行制图。

2 研究结果

2.1 不同植被类型土壤有机碳含量变化

白洋淀湿地地区不同植被类型的土壤有机碳含量存在较为明显的差异(如图 2 所示),其中尤以 60—80 cm 土壤的差异大。在各层土壤中,淹水芦苇的土壤有机碳含量均与其他植被类型的土壤有机碳含量显著高于其他植被类型($P<0.05$),其中,土壤有机碳含量约为其他植被类型的 3 倍左右。具体来看,在 0—20 cm 层(表层土)中,土壤有机碳含量表现为:乔木园地(8.53 g/kg)<台田芦苇(8.72 g/kg)<常绿针叶林(9.62 g/kg)<落叶阔叶林(10.16 g/kg)<水田(10.33 g/kg)<旱地(10.76 g/kg)<淹水芦苇(17.70 g/kg),最大值与最小值相差 2 倍;在 20—40 cm 层(上层土)中,乔木园地(5.12 g/kg)<常绿针叶林(5.79 g/kg)<落叶阔叶林(6.06 g/kg)<芦苇(6.60 g/kg)<旱地(7.12 g/kg)<水田(8.18 g/kg)<淹水芦苇(14.38 g/kg),最大值与最小值相差 2.8 倍;在 40—60 cm 土层(中层土)中,乔木园地(4.73 g/kg)<旱地(5.21 g/kg)<落叶阔叶林(5.84 g/kg)<常绿针叶林(6.12 g/kg)<水田(7.07 g/kg)<芦苇(7.28 g/kg)<淹水芦苇(12.67 g/kg),最大值与最小值相差 2.73 倍;在 60—80 cm 土层(下层土)中,乔木园地(3.55 g/kg)<旱地(4.49 g/kg)<水田(5.43 g/kg)<常绿针叶林(6.31 g/kg)<芦苇(6.55 g/kg)<落叶阔叶林(6.57 g/kg)<淹水芦苇(11.59 g/kg),最大值与最小值相差 3.26 倍;80—100 cm 土层(下层土)中,旱地(3.94 g/kg)<乔木园地(4.12 g/kg)<水田(5.40 g/kg)<芦苇(5.57 g/kg)<常绿针叶林(5.59 g/kg)<落叶阔叶林(6.15 g/kg)<淹水芦苇(11.67 g/kg),最大值与最小值相差 2.96 倍。

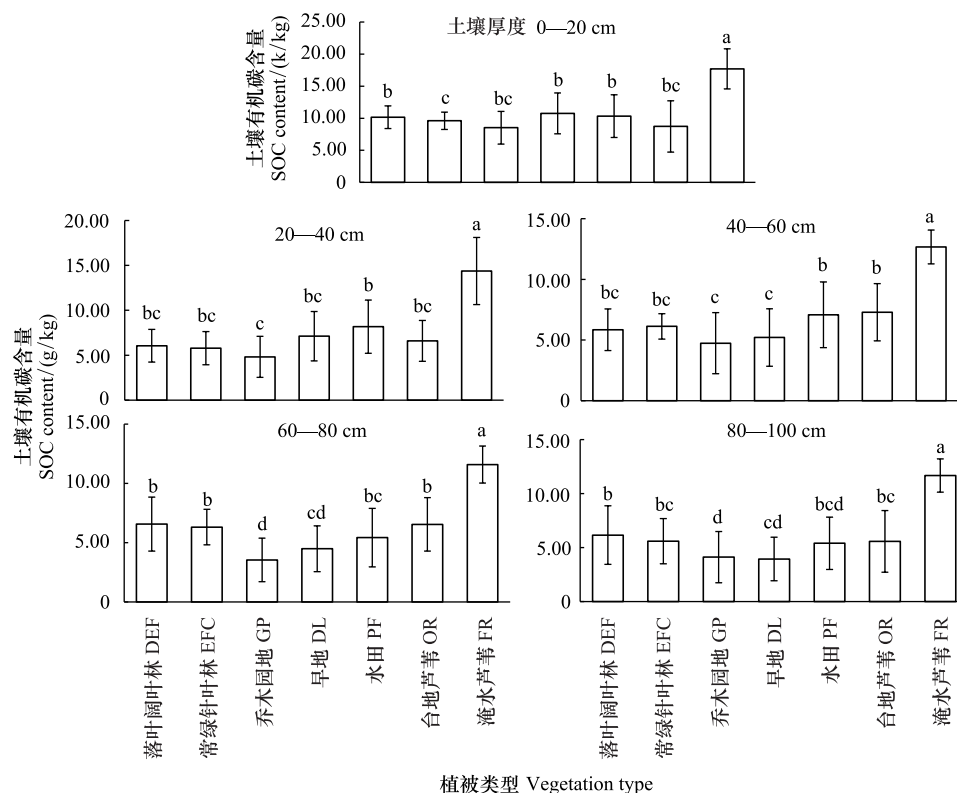


图 2 不同植被类型的土壤有机碳含量特征

Fig.2 Soil organic carbon (SOC) stock in indifferent vegetation types

不同小写字母表示相同土壤深度的不同植被类型间的土壤有机碳含量差异显著($P<0.05$); DEF: Deciduous broad-leaved forest; ECF: Evergreen coniferous forest; GP: Garden plot; DL: Dry land; PF: Paddy field; OR: Ota reeds; FR: Flooded reeds

2.2 土壤有机碳含量的空间分异特征

2.2.1 土壤有机碳含量垂直分布特征

总体而言,不同植被类型中,土壤有机碳含量的垂直分布规律几乎一致,即 0—20 cm 表层土壤有机碳水平均为最高值,随着土壤剖面深度增加,土壤中有机碳的含量呈现减少趋势,但逐渐趋于稳定。旱地的有机碳含量自表层至深层减少幅度最大,自 10.76 g/kg 减少至 3.94 g/kg,有机碳含量共减少 6.81 g/kg;其次为淹水芦苇,其有机碳含量自 17.70 g/kg 减少至 11.07 g/kg,有机碳含量共减少 6.03 g/kg。土壤有机碳含量自表层至深层减少量最小的为落叶阔叶林及常绿针叶林,分别为 4.01 g/kg 和 4.02 g/kg。

2.2.2 不同土层深度的土壤有机碳分配

由图 4 可以看出,不同植被类型的土壤在各土层深度的分配比例略有差异,但均以表层(0—20 cm)最高,该层有机碳含量分配比例均集中在 30%左右,自 40 cm 以下,分配比例变幅相对较小。其中,落叶阔叶林、常绿针叶林与乔木园地的分配比例各有不同,落叶阔叶林在 40—60 cm 层的分配比例最小,常绿针叶林在 80—100 cm 层的分配比例最小,乔木园地在 60—80 cm 层的分配比例最小;旱地、水田及淹水芦苇的分配比例表现一致,从表层到深层分配比例依次减少。

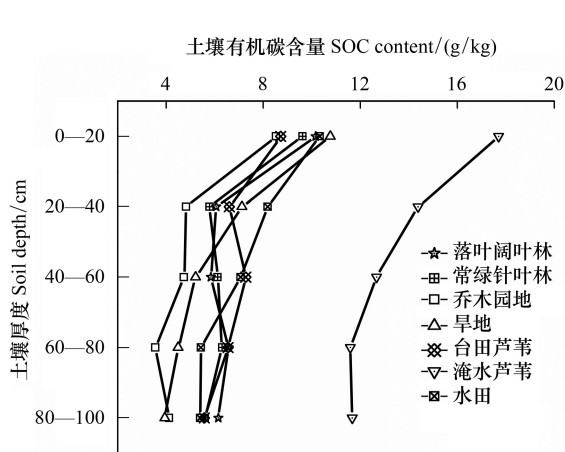


图 3 不同植被类型的土壤有机碳垂直分布特征
Fig. 3 Vertical distribution pattern of soil organic carbon indifferent vegetation types

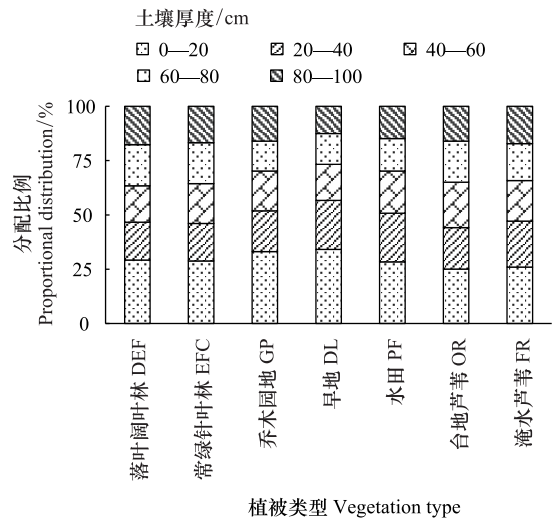


图 4 不同土层深度土壤有机碳分配比例
Fig.4 The ratios of soil organic carbon in different soil layers

2.3 不同植被类型土壤有机碳密度比较

本研究结合土壤容重参数,估算了白洋淀湿地区不同植被类型的土壤有机碳密度(图 5)。不同植被类型的土壤有机碳密度间存在差异,各土层深度中,淹水芦苇的土壤有机碳密度显著高于其他植被类型($P < 0.05$),各植被类型的总土壤有机碳密度分布规律为:乔木园地<旱地<常绿针叶林<落叶阔叶林<水田<台田芦苇<淹水芦苇。总体而言,土壤有机碳密度的变化是随土壤剖面深度的增加而减少的趋势,这与土壤有机碳含量的垂直分布特征一致,这种趋势在旱地、台田芦苇与淹水芦苇 3 种植被类型中尤为明显。

2.4 白洋淀湿地土壤有机碳储量估算

本研究估算了白洋淀湿地区不同植被类型的土壤有机碳储量(表 1)。其中,旱地土壤有机碳储量最大,不同土层深度的土壤有机碳范围为 $(323.73—775.97) \times 10^3 \text{ MgC}$,总储量为 $2462.41 \times 10^3 \text{ MgC}$ 。其次是淹水芦苇,不同土层深度的土壤有机碳储量范围为 $(344.96—503.72) \times 10^3 \text{ MgC}$,总储量为 $1998.47 \times 10^3 \text{ MgC}$ 。乔木园地土壤有机碳储量最低,不同土层深度的范围为 $(8.98—20.64) \times 10^3 \text{ MgC}$,总储量为 $63.27 \times 10^3 \text{ MgC}$ 。白洋淀湿地的土壤有机碳储量总计为 $5816.77 \times 10^3 \text{ MgC}$ 。

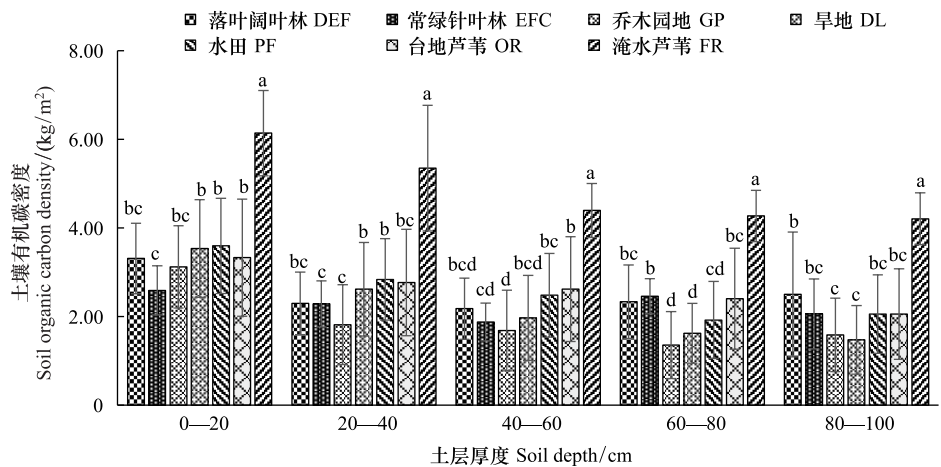


图5 不同植被类型土壤有机碳密度垂直分布特征

Fig.5 Vertical distribution pattern of soil organic carbon density in different vegetation types

表1 白洋淀湿地地区土壤有机碳储量

Table 1 Soil organic carbon storage in Baiyangdian wetland region							
土层厚度 Soil depth/cm	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	乔木园地 Garden plot	旱地 Dry land	水田 Paddy field	台田芦苇 Ota reeds	淹水芦苇 Flooded reeds
0—20	73.13	39.00	20.64	775.97	57.18	229.54	503.72
20—40	50.74	36.33	12.01	574.49	45.16	190.79	438.83
40—60	48.15	29.78	11.14	431.97	39.48	180.66	360.47
60—80	51.59	41.07	8.98	356.25	30.58	165.87	350.48
80—100	55.27	32.71	10.50	323.73	32.68	141.70	344.96
总计 Total	278.87	178.89	63.27	2462.41	205.07	908.58	1998.47

3 结论与讨论

(1)白洋淀湿地土壤有机碳含量整体偏低,低于其他湖泊湿地和沼泽湿地。

湿地生态系统的土壤有机碳含量受诸多条件影响,如地形、水文、温度、土壤质地、植物群落类型、pH等^[23]。本研究估算的白洋淀湿地土壤表层有机碳含量为 8.53—17.70 g/kg,远低于长江中下游区的鄱阳湖湖泊湿地 (21.90—29.21 g/kg)^[16]以及三江平原沼泽湿地(37.32—55.07 g/kg)^[14]。这主要与白洋淀湿地水文条件和湿地优势植被分布有关。白洋淀湿地区域受上游水库给水影响较大,水位降低导致湿地面积缩减,进而造成植被群落退化^[24-25],间接致使进入土壤的植物残体及根系分泌物减少^[25]。同时,蓄水量变化致使土壤干湿交替作用明显,造成土壤微生物呼吸强度提高,致使有机碳分解速率加快^[5],这使得白洋淀湿地土壤有机碳密度水平低于其他湿地。本研究还发现,淹水芦苇的土壤有机碳含量显著高于其他植被类型。其一,枯落物是芦苇群落中土壤有机碳的主要来源,长期无人管理的芦苇在生长期在水中立枯,有机质通过水体流向土壤中,且芦苇的厚壁组织相较于其他植被类型的植物枯落物更难分解^[26];其二,淹水芦苇处于长期淹水的状态,土壤水分始终处于饱和状态,土壤处于厌氧还原条件下有机质不易被分解,土壤有机碳含量呈现最高值^[27]。这意味在白洋淀湿地芦苇对其碳库的维持具有重要作用。

(2)白洋淀湿地的土壤有机碳分布呈现随着土层深度增加而减少的垂直分布特征。

研究表明,表层土壤(0—20 cm)有机碳含量显著高于其他土层,分配比例达 30%左右,中下层土壤有机碳含量则相对稳定。这之前研究中湿地土壤有机碳的分布特征类型一致^[17-23]。有机碳含量垂直分布特征

受到植物群落初级生产力、枯落物产量及分解速率等原因的影响^[28]。研究表明,植物通过光合作用对大气中的二氧化碳进行固定,植物在生长期中,根系能够将光合作用产物以分泌物的形式传输给土壤,在生长结束后,植物通过枯落物的形式向土壤传输有机物^[17]。植物的根系主要存在于表层土壤中,随着土层剖面深度增加,植物根系的数量逐渐减少,同时,植物残体凋落后首先进入表层土壤中参与分解,因此表层土壤的有机碳含量水平最高。

(3) 土地利用/植被类型是导致白洋淀区土壤碳密度变化的关键影响因子之一。

研究表明不同湿地植被类型中土壤有机碳密度和含量具有显著差异,具体表现为淹水芦苇的有机碳密度最高,约为其他土壤类型的 3 倍左右,这与在鄱阳湖湿地的研究结果类似^[27]。湿地的土壤有机碳含量、容重及剖面深度三个因子是土壤有机碳密度估算的基本参数,剖面深度一定的情况下,土壤碳密度的变异则是有机碳含量和容重变异性的综合反映^[17]。土壤性质作为影响土壤容重主要原因,不同的土地利用方式能够使土壤理化性质发生较大的变化^[23],具体表现为:相较于自然土壤,翻耕等农业管理措施使得表层土壤充分混合,土壤通气性变好,导致土壤容重减小;同时耕作能够导致土壤侵蚀增加,使土层变薄,加剧有机质分解流失^[25],这是导致乔木园地与旱地两种受人为干扰较大的类型中土壤有机碳密度较低的原因。

(4) 雄安新区建设将对白洋淀湿地区土壤碳库具有重要影响,整体而言,随着湿地恢复及植被覆盖率的增加,雄安新区的固碳功能将会呈现较好发展态势。

研究估算白洋淀湿地区土壤有机碳储量累计为 $5816.77 \times 10^3 \text{ MgC}$,而旱地土壤有机碳储量最大,约占研究区总储量的 42.33%,这主要是因为旱地是当前研究区的重要土地利用类型。然而,旱地的土壤碳密度则是相对较低的,低于淹水芦苇和台田芦苇,也低于落叶阔叶林和常绿针叶林。而随着雄安新区规划的逐步落实,退耕还林、退塘还湿等将改变未来白洋淀湿地区的地类分布格局,使得湿地和林地面积增加,固碳能力将进一步提升。但雄安新区尚在建设之初,生态系统固碳受外界环境影响较大,在调整土地利用结构时应以经济与生态并重^[29]。同时,注重发挥土地的多种功能,实现单一土地功能向生产—生态复合功能的转变^[30],这对稳定区域碳循环具有重要意义。此外,建设用地固碳能力相较于湿地、林地等生态用地相差甚多^[10],因此,合理规划建设用地面积的增加是城市发展过程中亟需关注的^[31],应结合生态恢复以及土地布局优化,尽量减少雄安新区建设中土地之间的流转带来的碳排放影响,提高区域生态效益。

参考文献 (References):

- [1] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934-941.
- [2] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 2005, 88(1): 25-35.
- [3] Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8171-8183.
- [4] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [5] Whiting G J, Chanton J P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2001, 53(5): 521-528.
- [6] Mitsch W J, Nahlik A, Wolski P, Bernal B, Zhang L, Ramberg L. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(5): 573-586.
- [7] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.
- [8] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [9] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [10] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [11] Tong J H, Hu J H, Lu Z, Sun H R, Yang X F. The impact of land use and cover change on soil organic carbon and total nitrogen storage in the Heihe River Basin: a meta-analysis. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(9): 1578-1594.

- [12] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化. 地理学报, 2018, 73(11): 2150-2167.
- [13] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. 地球科学进展, 2006, 21(2): 138-143.
- [14] 王丽丽, 宋长春, 葛瑞娟, 宋艳宇, 刘德燕. 三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量研究. 中国环境科学, 2009, 29(6): 656-660.
- [15] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 孙景宽, 刘京涛, 宋爱云. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(5): 1731-1738.
- [16] 雷学明, 段洪浪, 刘文飞, 纪宇骥, 周际海, 吴建平, 樊后保. 鄱阳湖湿地碟形湖泊沿高程梯度土壤养分及化学计量研究. 土壤, 2017, 49(1): 40-48.
- [17] 马维伟, 王跃思, 李广, 吴江琪, 罗永忠, 陈国鹏. 杂海湿地植被退化过程中植被-土壤系统有机碳储量变化特征. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3900-3906.
- [18] 李博, 刘存歧, 王军霞, 张亚娟. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2603-2607.
- [19] 严格, 葛振鸣, 张利权. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布. 应用生态学报, 2014, 25(1): 85-91.
- [20] Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 2011, 4(5): 293-297.
- [21] 刘莎, 刘存歧, 李博, 王军霞, 张亚娟, 李昂. 白洋淀芦苇台地土壤理化因子及其酶活性特征. 湿地科学, 2012, 10(1): 74-80.
- [22] 訾园园, 郗敏, 孔范龙, 李悦, 杨玲. 胶州湾滨海湿地土壤有机碳时空分布及储量. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2075-2083.
- [23] 王勇辉, 焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征. 生态学报, 2016, 36(18): 5893-5901.
- [24] 闫欣, 牛振国. 白洋淀流域湿地连通性研究. 生态学报, 2019, 39(24): 9200-9210.
- [25] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征. 水土保持学报, 2017, 31(5): 215-221.
- [26] 黄昕琦, 李琳, 吕烨, 潘高娃, 祁瑜, 段成瑜, 黄永梅. 内蒙古乌梁素海湿地土壤有机碳组成与碳储量. 湿地科学, 2015, 13(2): 252-257.
- [27] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 熊挺. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征. 生态学报, 2012, 32(12): 3656-3669.
- [28] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴. 滨海盐沼湿地有机碳的沉积与埋藏研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(7): 2040-2048.
- [29] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 李德龙, 张亚彤, 李双成. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同. 地理研究, 2020, 39(1): 79-91.
- [30] 王东升, 门彬, 张美一. 论浅水湖泊中的水固交错带与科学清淤规划——以雄安新区白洋淀为例. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1550-1559.
- [31] 卢龙辉, 陈福军, 许月卿, 黄安, 黄玲. 京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局. 自然资源学报, 2020, 35(3): 532-545.