DOI: 10.5846/stxb201405060894

肖烨,黄志刚,武海涛,吕宪国.三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异.生态学报,2015,35(23): - . . Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, Lu X G.Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, Northeast China. Acta Ecologica Sinica,2015,35(23): - .

三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量 差异

肖 烨^{1,2},黄志刚³,武海涛¹,吕宪国^{1,*}

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室,长春 130102
2 中国科学院大学,北京 100049
3 南阳师范学院生命科学与技术学院,南阳 473061

摘要:土壤活性有机碳对土壤干扰的反应较快,是土壤有机碳早期变化的敏感性指标。近年50年来,三江平原湿地土壤有机碳 库受农事活动影响较大。为了探讨不同湿地类型土壤活性有机碳主要组分土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、 微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳(Easily oxidized organic carbon, EOC)的分布差异及主要影响因子, 本研究选择了三江平原洪河自然保护区4种典型的湿地类型(小叶章+沼柳湿地、小叶章湿地、毛苔草湿地和芦苇湿地)为研究 对象。文中分析了不同湿地类型土壤可溶性有机碳,微生物量碳和易氧化有机碳在 0—30 cm 土层内的分布特征和分配比例及 其与有机碳、土壤养分和酶活性指标(蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶)之间的相关关系。结果表明:(1)4种湿地类型土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量均随土层深度的增加而减少。不同湿地类型之间土壤活性有机碳含量在 0—30 cm 土层内存在显著性 差异(P<0.05),相对于长期淹水的毛苔草湿地和芦苇湿地而言,未淹水的小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地具有较高的 DOC, MBC和EOC含量。(2)土壤DOC、MBC和EOC占有机碳比例分别为0.27%-0.63%,1.27%-5.94%和19.63%-41.25%。土 壤 DOC 所占比例呈先增后减的变化趋势,最大的比例均出现在 10-20 cm。MBC 所占比例在土壤剖面上则未表现出一致的变 化规律,而 EOC 所占比例则随土层深度的增加而逐渐减少。(3) 土壤 DOC 占 SOC 比例以小叶章湿地最高, MBC 和 EOC 占 SOC 的比例则以小叶章+沼柳湿地最高。而长期淹水的毛苔草湿地和芦苇湿地则具有更低的 DOC, MBC 和 EOC 比例。(4) 综 合分析表明,4 种湿地类型土壤 DOC, MBC 和 EOC 两两之间存在极显著相关性关系,它们除了与碳氮比相关性不显著外,与土 壤有机碳,全氮,全磷养分和酶活性指标间相关性均达到极显著水平,尤其是与有机碳和全氮的相关性系数更高,此外 DOC 与 纤维素酶,MBC与过氧化氢酶相关性更大。由此可见,土壤碳氮磷养分和酶活性是影响土壤活性有机碳组分分布的重要因素。 关键词:土壤活性有机碳;酶活性;湿地;三江平原

Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, Northeast China

XIAO Ye^{1,2}, HUANG Zhigang³, WU Haitao¹, LU Xianguo^{1,*}

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Department of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

Abstract: Soil active organic carbon (AOC) fractions are good indicators of soil carbon stock change because of their rapid response to soil disturbances in natural ecosystems. Agricultural activities in the last 50 years have greatly influenced the soil

收稿日期:2014-05-06; 网络出版日期:2015- -

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05050508)和国家自然科学基金项目(31100320,41171047)联合资助

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luxg@ neigae.ac.cn

organic carbon (SOC) of natural wetlands on Sanjiang Plain, China. The main objective of this study was to assess differences in the distribution of soil AOC fractions, including dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), and easily oxidized organic carbon (EOC), and the main influencing factors in four different types of wetlands in the Honghe National Natural Reserve of Sanjiang Plain. The contents and allocation ratios of soil DOC, MBC, and EOC were investigated at three soil depths (0-10, 10-20, and 20-30 cm) in four types of wetlands: (1) a mixed Calamagrostis angustifolia and Salix brachypoda wetland (CSW), (2) a C. angustifolia wetland (CAW), (3) a Carex lasiocarpa wetland (CLW), and (4) a Phragmites australis wetland (PAW). The relationships among the three soil AOC fractions and soil nutrient contents (SOC, total nitrogen [TN], total phosphorus [TP]) and enzyme activity (sucrase, cellulase, and catalase) were also analyzed. The results showed that DOC, MBC, and EOC content gradually decreased with increasing soil depth in the 0-30 cm soil layer of all four wetlands. However, significant differences (P < 0.05) were noted for the soil AOC fractions among the four wetlands. The DOC, MBC, and EOC content was significantly higher in non -flooding CSW and CAW compared to long-term flooding CLW and PAW. In the four wetlands, the ratios of soil DOC, MBC, and EOC to SOC content at the three soil depths ranged from 0.27% to 0.63%, 1.27% to 5.94%, and 19.63% to 41.25%, respectively. In addition, the trend in the changes of soil DOC to SOC ratios initially increased, followed by a decrease along the soil profiles, with peak values being documented for the 10 - 20 cm soil layer. No specific trend was noted for MBC to SOC ratios, but EOC to SOC ratios decreased with soil depth. The highest DOC to SOC ratio was obtained for CAW, whereas the highest MBC and EOC to SOC ratios were obtained for CSW. In contrast, lower DOC, MBC, and EOC to SOC ratios were observed in the long-term flooding CLW and PAW. Furthermore, positive correlations were observed among DOC, MBC, and EOC in all four wetlands. Our results showed that DOC, MBC, and EOC content was strongly correlated with SOC, TN, and TP content as well as with the enzyme activity indicators in the four wetland soils, but no significant correlation was noted for the C/N ratio. A higher correlation coefficient was observed between these three AOC fractions with SOC and TN content. Furthermore, highly significant relationships were observed between DOC content and cellulase activity, as well as between MBC content and catalase activity. In conclusion, the soil AOC fractions were mainly influenced by soil nutrient content (SOC, TN, and TP) and enzyme activity, which are associated with the C cycle.

Key Words: Soil organic carbon; enzyme activity; wetland; Sanjiang Plain

湿地是重要的碳转化场所,湿地土壤碳库的源、汇转化对气候变化的响应极为敏感。土壤碳库变化主要 发生在活性碳库中,土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快、易矿化分解,对植物和土壤微生物来 说活性较高的那部分有机碳^[1],其中土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳(Easily oxidized organic carbon, EOC)是其重要的表征指 标^[2]。一些研究结果显示,土壤活性有机碳库对温室气体排放有较大的贡献,对气候变化的响应更为敏 感^[1],其含量的高低直接影响到土壤微生物的活性,从而影响土壤固碳能力及温室气体的排放^[3],因此研究 湿地土壤活性有机碳对土壤碳库平衡及其对气候变化的响应均具有重要意义。

三江平原是我国最大的淡水沼泽分布区,洪河湿地保护区位于三江平原的东北部,因蕴涵丰富的动植物物种而被誉为"三江平原野生生物特有基因库",2002 年被列入国际重要湿地名录,成为 Ramsar 湿地保护热点地区,受到国际组织和国内外众多科研机构的广泛关注。然而近 50 年来,由于大量开挖沟渠,河流截弯取直,导致洪河保护区湿地缺水十分严重,极大的影响了湿地的碳"汇"功能^[4]。近年来,许多学者就水分梯度^[5,6]、外源营养输入^[7]、CO₂浓度^[8]和不同土地利用方式^[9]等外部环境因素对湿地土壤活性有机碳的影响进行了研究,并取得了大量成果。然而有关土壤养分和酶活性与湿地土壤活性有机碳变化的相关性方面的研究却鲜见报道。本研究通过对比分析不同植被类型的天然湿地土壤活性有机碳主要组分的分布特征,探讨了土壤养分和酶活性与土壤活性有机碳变化的影响因子提供

基础数据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

洪河保护区位于黑龙江省三江平原东北部的同江市与抚远县交界处(47°42′18″— 47°52′07″ N, 133°34′ 38″— 133°46′29″ E),总面积 2.81×10⁴ hm²。该区域属于温带湿润半湿润季风气候,年平均气温为 1.5—2.0 ℃,极端最高气温 36.6 ℃,极端最低气温-41 ℃;年平均降水量 600 mm 左右,蒸发量 565 mm;空气湿度大,属 于三江平原最湿润地区,冻结期 5 个月,最深冻层 1.9 m 左右,无霜期 130 d。沼泽地貌类型为河漫滩及阶地 洼地,成土母质中细砂含量较大,地表沉积物质主要为冲积-沼泽相淤泥亚粘土和淤泥质粘土^[10]。

1.2 采样点设置与样品采集

于 2013 年 10 月初在洪河湿地核心保护区域内沿着水分增加的梯度分别采集了小叶章(Calamagrostis angustifolia)+沼柳(Salix brachypoda)湿地(CSW)、小叶章湿地(CAW)、毛苔草(Carex lasiocarpa)湿地(CLW)和芦苇(Phragmites australis)湿地(PAW)这4种具有代表性的湿地类型土壤(图1)。CSW属于全年很少淹水区,CAW 为季节性淹水区,而 CLW 和 PAW 则位于常年淹水区。每一类型湿地中随机设置 3 个 1.0 m×1.0 m 样方,共计 12 个样方。取土样时先去除样地土壤表层凋落物,然后用自制金属土壤取样器(长 50 cm,直径 5.7 cm)按 0—10、10—20 和 20—30 cm 进行分层取样,同一样方内由随机采取的 3—5 个土柱同层混合成一个土壤样品,每种湿地类型获取 3 个重复样品,4 种湿地类型共采集土样 36 份。采集的土样放入无菌塑料袋内,置于有冰袋的保鲜盒中运回实验室,挑去根系和石砾,充分混匀后分成 2 份,1 份过 4 mm 筛,保存于 4 ℃ 冰箱中备用,用于微生物量碳和可溶性有机碳的测定。另 1 份自然风干,研磨后过小于 2 mm 筛,用于土壤有机碳、易氧化有机碳、酶活性及其它理化性质的分析。



图1 洪河湿地保护区采样点示意图



CSW:小叶章+沼柳湿地(Calamagrostis angustifolia+Salix brachypoda wetland); CAW:小叶章湿地(Calamagrostis angustifolia wetland); CLW: 毛苔草湿地(Carex lasiocarpa wetland); PAW:芦苇湿地(Phragmites australis wetland).下同 The same below. 1.3 样品分析及方法

1.3.1 土壤基础性质

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(Total nitriogen, TN)采用凯氏定氮法测定;土壤全磷(Total phosphorus, TP)采用 H₂SO₄-HClO₄消煮钼锑抗比色法测定^[11]。 **1.3.2** 土壤酶活性

蔗糖酶和纤维素酶活性采用 3,5-二硝基比色法测定,蔗糖酶活性以 1g 土壤在 37 ℃下培养 24 h 后生成 的葡萄糖毫克数表示,纤维素酶活性以 1g 土壤在 37 ℃下培养 72 h 后生成的葡萄糖毫克数表示;过氧化氢酶 采用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以 1g 干土 1 h 内消耗的 0.1 N KMnO₄的毫升数表示^[12]。

1.3.3 土壤活性有机碳组分

土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K₂SO₄提取法,浸提液用可溶性碳氮分析仪(德国耶 拿,Multi N/C 3000)测定,熏蒸与未熏蒸土壤有机碳含量差值即为微生物量碳的值^[13]。

土壤可溶性有机碳(DOC)采用 TOC 仪测定,称鲜土 30.00 g,水土比为 2:1,25 ℃下恒温振荡器中振荡 30 min (250 次/min)后,离心 10 min (7 000 r/min),上清液用 0.45 μm 滤膜抽滤,滤液用岛津 TOC-Veph 有机 碳分析仪直接测定^[14]。

土壤易氧化有机碳(EOC)采用 K_2 MnO₄氧化法-比色法测定,称过 0.25 mm 筛含有 15—30 mg 碳的土壤样品,加 333 mmol/L K_2 MnO₄ 25 mL,密封振荡 1 h,离心 5 min (4 000 r/min),取上清液用去离子水稀释 250 倍,用分光光度计在波长 565 nm 处比色测定,根据高锰酸钾的消耗量,可求出易氧化土壤样品的含碳量^[15]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),LSD (P=0.05 或 0.01)比较不同植被类型湿地土壤活性有机碳各组分含量之间的差异。土壤活性有机碳各组分与土壤有机碳含量、土壤养分和酶活性的相关性分析采用 Pearson 检验法。

2 结果与分析

2.1 不同湿地类型土壤 DOC 含量比较

由图 2A 可见,4 种湿地类型土壤 DOC 含量为 45.08—241.20 mg/kg,在垂直剖面上均表现为随土层深度 增加而减少的趋势。同一土层土壤 DOC 含量在不同湿地类型间存在显著性差异,以小叶章湿地最高,其次是 小叶章+沼柳湿地,二者均显著高于淹水区的毛苔草湿地和芦苇湿地(P<0.05)。毛苔草湿地和芦苇湿地同土 层中土壤 DOC 含量差异不显著。在 0—30 cm 土层内,土壤 DOC 含量的变化趋势表现为小叶章湿地>小叶章 +沼柳湿地>毛苔草湿地>芦苇湿地(P<0.05)。

2.2 不同湿地类型土壤 MBC 含量比较

由图 2B 所示,各湿地类型土壤 MBC 含量为 144.22—2717.42 mg/kg,在垂直剖面上与 DOC 的变化趋势一致。土壤 MBC 含量在 0—10 cm 土层中小叶章湿地和小叶章+沼柳湿地差异不显著,但二者均显著高于芦苇湿地和毛苔草湿地(P<0.05),在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,小叶章+沼柳湿地则显著高于其它湿地(P<0.05)。在 0—30 cm 土层内,土壤 MBC 含量变化趋势表现为小叶章+沼柳湿地>小叶章湿地>毛苔草湿地>芦苇湿地(P<0.05)。

2.3 不同湿地类型土壤 EOC 含量比较

由图 2C 可知,4 种湿地类型土壤 EOC 含量为 2.28—25.79 g/kg,显著高于土壤 DOC、MBC 含量(P< 0.05)。在同一湿地类型中,土壤 EOC 含量以表层 0—10 cm 最高,20—30 cm 最小。除毛苔草湿地各土层间 EOC 含量差异不显著外,其余湿地不同土层间均存在显著性差异(P<0.05)。不同湿地类型同土层相比较而 言,在 0—10 cm 和 20—30 cm 土层小叶章湿地与小叶章+沼柳湿地土壤 EOC 含量差异不显著,但二者均显著 高于毛苔草湿地和芦苇湿地(P<0.05);在 10—20 cm 土层,以小叶章+沼柳湿地土壤 EOC 含量最高,显著高于



图 2 不同湿地类型土壤水溶性有机碳(A)、微生物量碳(B)和易氧化有机碳(C)含量的剖面分布,不同大写字母表示同一土层不同湿地 类型之间的显著性差异(*P*<0.05);不同小写字母表示同一湿地类型不同土层之间的显著性差异(*P*<0.05) Fig. 2 Vertical distribution of soil DOC(A), MBC(B) and EOC(C) contents in different wetlands, the different capital letters meant

significant difference among the same soil layers of different wetlands at 5% level; the different lowercase letters indicate significant difference among different soil layers in the same wetland at 5% level. CSW: *Calamagrostis angustifolia+Salix brachypoda* wetland; CAW: *Calamagrostis angustifolia* wetland; CLW: *Carex lasiocarpa* wetland; PAW: *Phragmites australis* wetland

2.4 土壤活性有机碳占有机碳的比例

由图 3A 可知,4 种湿地类型土壤 DOC 含量占 SOC 的比例范围为 0.27%—0.64%,随深度增加表现出先增 后减的变化趋势,以 10—20 cm 土层所占分配比例最大。同土层以小叶章湿地土壤 DOC 含量的分配比例最 高,显著高于其它湿地(P<0.05)。在 0—30 cm 土层,4 种湿地土壤 DOC 含量的平均分配比例为:小叶章湿地 (0.53%)>小叶章+沼柳湿地(0.41%)>芦苇湿地(0.37%)>毛苔草湿地(0.30%)(P<0.05)。

4 种湿地类型土壤 MBC 含量占 SOC 的比例范围为 1.27%—5.94%, 随土层深度的增加,其分配比例在垂直剖面上均未表现出一致的变化规律(图 3B)。在同一土层中,小叶章+沼柳湿地与小叶章湿地土壤 MBC 含量的分配比例无显著性差异, 二者均显著高于毛苔草湿地和芦苇湿地。在 0—30 cm 土层, 4 种湿地土壤 MBC 含量的平均分配比例为:小叶章+沼柳湿地(4.42%)>小叶章湿地(3.22%)>毛苔草(1.71%)>芦苇湿地(1.66%) (*P*<0.05)。

4 种湿地类型土壤 EOC 含量占 SOC 的比例范围为 19.63%—41.25%,随深度增加呈递减的变化趋势。0—10 cm,毛苔草湿地土壤 EOC 所占比例最低,其它湿地间差异不显著;10—20 cm,小叶章+沼柳湿地和芦苇湿地土壤 EOC 含量分配比例差异不显著,但显著高于小叶章湿地和毛苔草湿地(P<0.05);20—30 cm,各湿地不同土层间 EOC 分配比例无显著性差异。在 0—30 cm 土层,4 种湿地土壤 EOC 含量的平均分配比例为:小叶章+沼柳湿地 (33.35%)>小叶章湿地(30.65%)>芦苇湿地(28.75%)>毛苔草湿地(22.86%) (P<0.05)(图 3C)。

2.5 不同湿地类型土壤养分、酶活性与活性有机碳之间的关系

从表1可见,在小叶章+沼柳湿地中,土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量与 SOC、TN、TP、蔗糖酶和纤维素酶呈



图 3 不同湿地类型土壤水溶性有机碳(A)、微生物量碳(B)和易氧化有机碳(C)含量在土壤剖面上的分配比例 Fig. 3 Vertical distribution of proportion of soil DOC, MBC and EOC in different wetlands

显著或极显著相关性;在小叶章湿地中,DOC、MBC 和 EOC 含量除与 C/N 比相关性不显著外,与其他因子呈 极显著正相关性;在毛苔草湿地中,DOC、MBC 和 EOC 含量与 C/N、DOC 与 TP 和过氧化氢酶、MBC 与 TP 之 间相关性不显著;在芦苇湿地中,3 个活性有机碳组分与土壤养分和酶活性指标间具有显著相关性。综合分析 表明,4 种湿地类型土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量两两之间具有极显著相关性(P<0.01),表明活性有机碳各组 分之间相互影响,密切联系。有机碳、全氮、全磷、蔗糖酶活性、纤维素酶活性和过氧化氢酶活性与土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量均存在极显著相关性关系,是湿地活性有机碳变化的重要影响因素。

	Table 1	able 1 Correlation analysis between soil active organic carbon and soil nutrient, enzyme activities										
湿地类型 Wetland types	指标 Indexes	可溶性 有机碳 DOC	微生 物量碳 MBC	易氧化 有机碳 EOC	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	碳氮比 C/N	蔗糖酶 Invertase	纤维素酶 Cellulase	过氧化 氢酶 Catalase	
小叶章+	DOC	-	0.877 **	0.824 **	0.875 **	0.825 **	0.834 **	0.193	0.930 **	0.800 **	0.238	
沼柳湿地	MBC	0.877 **	-	0.794 **	0.827 **	0.816 **	0.741 *	0.023	0.879 **	0.749 *	0.027	
CSW	EOC	0.824 **	0.794 *	-	0.982 **	0.990 **	0.946 **	-0.090	0.776 *	0.953 **	-0.096	
小叶章	DOC	-	0.940 **	0.926 **	0.977 **	0.963 **	0.961 **	-0.211	0.872 **	0.970 **	0.965 **	
湿地	MBC	0.940 **	-	0.892 **	0.911 **	0.894 **	0.893 **	-0.164	0.886 **	0.937 **	0.917 **	
CAW	EOC	0.926 **	0.892 **	-	0.960 **	0.987 **	0.977 **	-0.294	0.752 *	0.852 **	0.933 **	
毛苔草	DOC	-	0.944 **	0.884 **	0.881 **	0.940 **	0.501	-0.095	0.842 **	0.801 **	0.649	
湿地	MBC	0.944 **	-	0.806 **	0.822 **	0.830 **	0.555	0.001	0.800 **	0.705 *	0.686 *	
CLW	EOC	0.884 **	0.806 **	-	0.975 **	0.749 *	0.675 *	0.309	0.989 **	0.986 **	0.872 **	
芦苇湿地	DOC	-	0.897 **	0.983 **	0.936 **	0.997 **	0.877 **	-0.796 *	0.775 *	0.959 **	0.875 **	
PAW	MBC	0.879 **	-	0.829 **	0.760 *	0.874 **	0.786 *	-0.704 *	0.760 *	0.869 **	0.682 *	
EOC	0.983 **	0.829 **	-	0.931 **	0.987 **	0.855 **	-0.801 **	0.755 *	0.920 **	0.883 **		
综合分析	DOC	-	0.918 **	0.938 **	0.911 **	0.904 **	0.683 **	-0.019	0.804 **	0.948 **	0.825 **	
Comprehensive	MBC	-	-	0.907 **	0.918 **	0.904 **	0.759 **	-0.014	0.856 **	0.839 **	0.940 **	
analysis	EOC	-	-	-	0.966 **	0.980 **	0.793 **	0.001	0.845 **	0.838 **	0.862 **	

表1 土壤活性有机碳与土壤养分、酶活性的相关分析

"**"表示极显著相关 P<0.01, "*"表示显著相关 P<0.05, "-"表示存在自相关关系, 不宜进行相关分析;

CSW: Calamagrostis angustifolia + Salix brachypoda wetland; CAW: Calamagrostis angustifolia wetland; CLW: Carex lasiocarpa wetland; PAW: Phragmites australis wetland

3 讨论

3.1 不同湿地类型土壤活性有机碳组分含量的差异

土壤 DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源^[16],具有一定的溶解性,在土壤中移动较快,易分解矿 化,因而极易流失,是 SOC 损失的重要途径之一^[17]。本研究中小叶章湿地属于季节性淹水区,干湿交替更有 利于可溶性有机碳的释放,因此小叶章湿地土壤 DOC 含量高于其它湿地。而毛苔草湿地和芦苇湿地由于长 期淹水,其厌氧环境使得土壤微生物活性很低也不利于可溶性有机碳的累积^[18]。虽然有研究表明淹水可提 高土壤有机碳的溶出和导致团聚体的分散进而增加可溶性有机碳量^[19],但由于研究区位于河漫滩,土壤含 沙量较大,使得土壤吸附 DOC 的能力较低,因而土壤 DOC 易随季节性洪水而流失。

土壤 MBC 是土壤有机碳中最活跃的组分,与土壤碳的转化有密切关系,其含量高低是衡量土壤肥力的重要指标,地上植被类型被认为是影响土壤微生物活动的重要因子^[20]。由于小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地位于非淹水区,土壤通透性好,植被生长茂盛,且较多的凋落物,能为土壤微生物提供大量碳源物质,促进了微生物的繁殖,因而能显著增加土壤微生物量碳含量^[21]。而长期淹水的毛苔草湿地和芦苇湿地地表枯落物难以直接归还土壤,其厌氧环境抑制了土壤微生物活性,导致活性碳库周转速率低^[22],因此它们的土壤 MBC 的含量显著低于小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地。

土壤 EOC 是土壤有机碳中周转最快的组分^[23],是土壤养分的潜在来源及土壤微生物活动的重要能源, 也是土壤有机质动态变化的敏感性指标^[24]。4种湿地类型土壤 EOC 与 MBC 具有一致的变化趋势,说明位于 陆地上的小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地因土壤通透性好,微生物活性高而具有较快的土壤有机碳周转 速率。

由于土壤活性有机碳主要来源于植物凋落物、土壤腐殖质、微生物和根系及其分泌物,而表层根系和凋落物分布较多能够为微生物提供更多的 C、N 能源基质,有利于微生物生长和繁殖。然而随着土层的加深,土壤容重增加,土壤有机质含量急剧下降,地下生物量也随着减少,因而土壤活性有机碳明显降低^[25]。

3.2 不同湿地类型土壤活性有机碳组分占有机碳比例的差异

土壤活性有机碳组分占土壤有机碳含量的比例总体上不高,但对维持土壤肥力及土壤碳贮量变化方面具 有重要的作用^[26]。本研究中,4种湿地类型土壤 DOC 占有机碳比例为 0.27%—0.64%,与其他土壤的相应值 相近(0.08%—0.95%)^[27],在剖面上均呈先增后减的变化趋势,表明土壤 DOC 主要富集在根系较多的 10—20 cm 土层。毛苔草和芦苇湿地长期淹水,使土壤 DOC 更容易进入水体而流失,导致其土壤 DOC 占有机碳比率 较低。

土壤 MBC 与 SOC 的比值——微生物熵(microbial quotient)反映了土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率,可以反映生物活性有机碳库的周转速率^[28]。通常情况下,微生物熵变大说明土壤碳库正在积累,微生物对土壤碳库的利用效率提高,土壤质量得到改善^[29]。本研究土壤微生物熵值以小叶章+沼柳湿地最高,其次是小叶章湿地,说明这两处湿地土壤微生物活性高,对有机碳分解转化速率快,致使累积的土壤微生物量碳较多,因此微生物熵值较大,表明淹水频率少的湿地更有利于土壤微生物量碳的累积。

土壤 EOC 占 SOC 比率越高,说明养分循环速率越快,不利于土壤有机质的积累;土壤全碳中 EOC 所占比 例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差^[30]。本研究中土壤 3 种土壤活性有机碳组分占有机碳的比例以 土壤 EOC 最大(19.63%—41.25%),小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地土壤 EOC 含量的分配比例显著高于淹水 区的芦苇湿地和毛苔草湿地,表明淹水频率少的湿地土壤有机碳活性大、易转化。

3.3 土壤养分和酶活性对土壤活性有机碳组分含量的影响

湿地对碳、氮和磷等营养元素具有较强的截留和过滤作用,因此对土壤活性有机碳库具有重要的影响。 从表1可以看出,土壤 DOC、MBC和 EOC含量两两间的相关性均达到了极显著水平。各组分与 SOC 的相关 性也达到了极显著水平,说明土壤活性有机碳很大程度上依赖于有机碳含量^[31]。各组分均与土壤全氮含量

35 卷

呈极显著相关,这与曾从盛等人的研究结果一致^[32],这可能是因为土壤有机质中氮的含量会影响到微生物对 其分解和利用速度^[33],含氮量高的有机质易被微生物分解,迁移、转化速度快,从而对土壤有机碳的含量产生 一定影响。本研究中土壤活性有机碳组分与土壤碳、氮、磷养分含量显著相关的结论与李淑芬等^[34]、马少杰 等^[35]的研究结果相似。因此,改善土壤养分水平是提高土壤活性有机碳累积的关键。

土壤酶活性来源于土壤中动物、植物和微生物细胞的分泌物及其残体的分解物^[12],并且酶活性可以控制 养分的释放而影响植物和微生物生长^[36]。土壤中许多酶与微生物呼吸、微生物种类及数量、有机碳含量之间 存在显著相关关系^[37]。因此,土壤酶活性必然影响土壤活性有机碳的转化循环过程。本研究中,土壤活性有 机碳与蔗糖酶、过氧化氢酶和纤维素酶活性存在极显著相关性关系(表1),与万忠梅等^[38]的研究结果类似。

4 结论

不同湿地类型土壤水溶性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳含量均随土层深度的增加而减少。相对于 淹水区的毛苔草湿地和芦苇湿地而言,淹水频率少的小叶章+沼柳湿地和小叶章湿地具有较高的土壤活性有 机碳含量和分配比例。相关性分析表明,土壤活性有机碳各组分与 TOC、TN、TP、蔗糖酶活性、纤维素酶活性 和过氧化氢酶活性均具有极显著相关性关系。说明土壤养分和微生物活性因子是影响土壤活性有机碳的关 键因素。

致谢:感谢中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站对野外工作的支持。感谢管强硕士在野外采样过程中的 帮助。

参考文献(References):

- [1] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展. 土壤通报, 2004, 35(4): 502-506.
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, Monreal C M, Voroney P R, Beyaert R P. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26: 88-94.
- [3] Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36(4): 559-610.
- [4] 段云海,边延辉,邓国立.湿地生态系统保护与修复探讨——以洪河自然保护区为例.环境科学与管理,2007,32(9):152-153.
- [5] 万忠梅,宋长春,郭跃东,王丽,黄靖宇.毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应.生态学报,2008,28(12): 5980-5986.
- [6] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 郭跃东. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态.环境科学, 2011, 32(1): 290-297.
- [7] 刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响. 中国环境科学, 2008, 28(9): 769-774.
- [8] 赵光影,刘景双,王洋,窦晶鑫. CO₂浓度升高对三江平原典型湿地土壤活性有机碳的影响. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(1): 84-86, 90-90.
- [9] 钟春棋,曾从盛, 仝川. 不同土地利用方式对闽江口湿地土壤活性有机碳的影响. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(4): 64-70.
- [10] 赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京:农业出版社, 1986: 274-300.
- [13] 吴金水,林启美,黄巧云,贺纪正,肖和艾.土壤微生物生物量测定方法及其应用.北京:气象出版社,2006.
- [14] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [15] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [16] Guggenberger G, Kaiser K. Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation. Geoderma, 2003, 113(3-4): 293-310.
- [17] Maize N, Watanabe A, Kimura M. Chemical characteristics and potential source of fulvic acids leached from the plow layer of paddy soil.

Geoderma, 2004, 120(3-4): 309-323.

- [18] 王艮梅,周立祥.陆地生态系统中水溶性有机物动态及其环境学意义.应用生态学报, 2003, 14(11): 2019-2025.
- [19] Wang F L, Bettany J R. Influence of Freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4): 709-714.
- [20] Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Fertility evolution of red soil derived from quaternary red clay in low-hilly region in middle subtropics II. Evolution of soil chemical and biological fertilities. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2); 203-217.
- [21] 薛萐,刘国彬,戴全厚,李小利,吴瑞俊. 黄土丘陵区人工灌木林恢复过程中的土壤微生物生物量演变. 应用生态学报, 2008, 19(3): 517-523.
- [22] 万忠梅,宋长春,杨桂生,黄靖宇,王丽丽,李英臣.三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系.环境科学学报, 2009, 29(2):406-412.
- [23] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, Yang X D, Sha L Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigationincubation procedure. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [24] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应.生态学杂志,1999,18(3):32-38.
- [25] 沈玉娟,赵琦齐,冯育青,王琳菲,陆华兵,余杏生,阮宏华.太湖湖滨带土壤活性有机碳沿水分梯度的变化特征.生态学杂志,2011, 30(6):1119-1124.
- [26] Blair G J, Lefroy R D B, Singh B P, Till A R. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate // Cadisch G, Giller K E. Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition. Wallingford: CAB International, 1997: 273-281.
- [27] 倪进治,徐建民,谢正苗.土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究.植物营养与肥料学报,2001,7(1):56-63.
- [28] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504.
- [29] 黄宇,汪思龙,冯宗炜,高洪,王清奎,胡亚林,颜绍馗.不同人工林生态系统林地土壤质量评价.应用生态学报,2004,15(12): 2199-2205.
- [30] 朱志建,姜培坤,徐秋芳.不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较.林业科学研究,2006,19(4):523-526.
- [31] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21 (4): 471-479.
- [32] 曾从盛,王维奇,徐欢欢.艾比湖湿地土壤活性有机碳及其对厌氧条件下碳分解的影响.亚热带资源与环境学报,2011,6(2):10-15.
- [33] 徐侠,陈月琴,汪家社,方燕鸿,权伟,阮宏华,徐自坤.武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化.应用生态学报, 2008, 19(3): 539-544.
- [34] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系. 浙江林学院学报, 2003, 20(2): 119-123.
- [35] 马少杰,李正才,王斌,刘荣杰,格日乐图,王刚.不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异.生态学报,2012,32(8):2603-2611.
- [36] Roldán A, Salinas-García J R, Alguacil M M, Caravaca F. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 11-20.
- [37] 刘骅,林英华,张云舒,谭新霞,王西和.长期施肥对灰漠土生物群落和酶活性的影响.生态学报,2008,28(8):3898-3904.
- [38] 万忠梅, 宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系. 湿地科学, 2008, 6(2): 250-257.