环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征

徐广平[1], 李艳琼[1], 沈育伊[2], 张德楠[1], 孙英杰[1], 张中峰[1], 周龙武[1], 段春燕[3]
(1. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质研究与利用重点实验室, 桂林 541006; 3. 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541004)

摘要: 选择桂林会仙喀斯特湿地不同水位梯度下9种植物群落的土壤为研究对象, 通过研究0~30 cm不同深度的土壤理化性质、土壤有机碳(SOC)、轻组有机碳(LFOC)、重组有机碳(HFOC)、易氧化有机碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、微生物生物量碳(MBC)含量等变化趋势, 以揭示水位梯度下不同植物群落土壤有机碳组分的分布特征及其影响因子. 结果表明: ① 会仙湿地土壤0~30cm LFOC、HFOC占SOC的质量分数分别为11.10%, 88.90%, 土壤轻组分分配比相对较低, 重组分分配比较高; ② 各群落土壤DOC, EOC; POC和MBC(除铺地黍群落外)含量均随土层深度的增加而减少; 与SOC含量变化趋势基本一致, 各群落DOC、EOC、POC占SOC的比例随土层变化均呈减小趋势; ③ 华克拉莎群落的SOC、LFOC、HFOC、MBC、DOC、EOC、POC含量在各土层中均为最高, 且显著高于其它植物群落; ④ SOC、全氮(TN)与土壤有机碳各组分含量显著正相关($P<0.01$), 土壤pH与LFOC、HFOC、DOC和POC显著正相关, 土壤容重与LFOC、HFOC、DOC、EOC和POC显著负相关($P<0.01$), 黏粒含量与LFOC、HFOC、DOC、POC和MBC显著负相关; ⑤土壤全氮、砂粒含量、pH和土壤含水量对HFOC含量的主要贡献均表现为通过影响其它因子而产生的间接作用效应; 土壤TN对EOC、DOC和POC含量具有较强的直接正作用效应; 土壤含水量对MBC含量的直接负作用最大. 土壤理化特征因子之间的相互作用共同影响着LFOC、HFOC及有机碳各组分含量的变化.

关键词: 喀斯特湿地; 植物群落类型; 土壤有机碳; 活性有机碳; 水位梯度
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1491-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201806205

Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin

XU Guang-ping[1], LI Yan-qiong[1], SHEN Yu-yi[2], ZHANG De-nan[1], SUN Ying-jie[1], ZHANG Zhong-feng[1], ZHOU Long-wu[1], DUAN Chun-yan[3]
(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals Research and Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to reveal the effect of vegetation type and soil physicochemical properties on the distribution of soil organic carbon and its components, a field survey was carried out on nine different plant communities along a water table gradient in the Huixian wetland with samples of soil at 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm in depth. The soil organic carbon (SOC), light fraction organic carbon (LFOC), heavy fraction organic carbon (HFOC), easily oxidized organic carbon (EOC), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), and microbial biomass carbon (MBC) were measured. The correlations among soil organic carbon components and soil physicochemical properties were also examined. The results showed that: ① The average proportion of LFOC and HFOC to SOC at 0-30 cm soil depth was 11.10% and 88.90%, respectively. The distribution ratio of the heavy component was much higher than of the light component in soils. ② The content of SOC, DOC, EOC, POC, and MBC (except in the *Panicum repens* community) and the values of DOC/SOC, EOC/SOC, and POC/SOC all decreased with increase of the soil depth. ③ Among the nine different plant communities, the contents of SOC, LFOC, HFOC, MBC, DOC, EOC, and POC of *Cladium chinense* were significantly higher than for other communities in same soil layers. ④ There were significantly positive correlations among soil organic carbon components (SOC) and soil total nitrogen (TN). LFOC, HFOC, DOC, and POC were also positively correlated with soil pH. The soil bulk density was significantly negative correlated with LFOC, HFOC, DOC, EOC, and POC, and the content of clay was also

收稿日期: 2018-06-25; **修订日期**: 2018-09-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(31760162, 41361057, 41603079); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(17-259-23); 广西科技攻关计划项目(桂科攻14124004-3-5); 国家科技支撑计划项目(2012BAC16B01); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFJA130264, 2017GXNSFBA198037); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业17012)
作者简介: 徐广平(1977~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤生态学与全球变化, E-mail: xugpgx@163.com

negatively correlated with LFOC, HFOC, DOC, POC, and MBC. ⑤ Path analysis showed that TN, soil pH, soil sand content, and soil water content (SWC) has indirect effects on HFOC by influencing other soil factors. Soil TN had strong positive effects on EOC, DOC, and POC, and SWC also has the largest direct negative effect on MBC. This showed that there were close interactions between soil physicochemical properties and soil organic carbon components. This study may provide a reference base for sustainable development and scientific predictions regarding the Huixian Karst wetland.

Key words: Karst wetland; vegetation community types; soil organic carbon; labile organic carbon; water table gradient

湿地生态系统是处于水体与陆地生态系统间的重要组成部分，尽管其面积仅占陆地面积的5% ~ 8%，但是湿地土壤中却储存了C约550 Pg，占陆地土壤C库的20% ~30%，是陆地生态系统极其重要的碳库之一[1]. 湿地土壤由于长期处于被淹、缺氧的环境下，土壤有机碳(SOC)分解速度缓慢，使得土壤中能够积累更多的活性有机碳，活性有机碳对气候变化的响应也极为敏感，因而成为相关研究的热点[2]. 土壤活性有机碳是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化、易矿化，并对植物和土壤微生物活性较高的那部分不稳定的有机碳[3]，根据分离及测定方法的不同，土壤活性有机碳有多种表征形式:可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)、微生物量碳(MBC)、颗粒有机碳(POC)、轻组有机碳(LFOC)等[4,5]. 虽然土壤有机碳活性组分占SOC比重小，但这些组分变化比SOC更加敏感，可以很大程度上表征土壤SOC含量的变化[5]，因而对土壤碳库平衡、土壤生物化学和土壤肥力保持具有重要的意义. 在不同的植被覆盖、水分变化等自然环境因素下[6]，加之不同程度人为活动干扰，活性有机碳在土壤的分布会存在差异[7].

随着对湿地“碳汇”功能认识的加深，近年来有学者先后对不同区域湿地土壤碳库及其组分进行了研究，如张文菊等[8]研究了洞庭湖湿地土壤有机碳垂直分布特征，表明有机碳不同组分含量及其占SOC的比例特征可有效地反映该有机碳库对于环境因子变化的敏感性. 董洪芳等[9]在黄河三角洲碱蓬湿地的研究结果表明，土壤重组有机碳(HFOC)是土壤有机碳的主要组成部分，土壤有机碳中非稳定性组分较低，碳库相对稳定. 张文敏等[10]在杭州湾湿地的研究结果表明，不同植被类型下土壤有机碳活性组分含量变化各异，受土壤有机碳及诸多环境因素共同影响，均能从不同角度反映滩涂湿地土壤有机碳的动态特征. 侯翠翠等[11]的研究结果表明不同水分条件对小叶章湿地土壤SOC及其活性组分含量具有显著影响. 在闽江口湿地[12]，土壤SOC含量很大程度决定了有机碳活性组分的含量，水淹频率、pH、TN和全磷(TP)是影响闽江口鳝鱼滩湿地SOC及其活性组分的主要因子. 以上多从植被类型、土地利用方式等角度对湿地碳库进行了研究，表明在区域尺度上，受水热条件的影响，不同湿地类型土壤碳库大小及各碳库组分差异显著；即使在同一区域，由于湿地淹水频率、养分、植物群落类型等不同，亦导致土壤有机碳及活性碳组分的分布存在差异[13,14]. 由此可见，不同植物群落类型对土壤有机碳组分的影响比较复杂，还需要开展更多的实验来丰富其研究.

桂林会仙喀斯特湿地是中国最大的岩溶湿地，在调节地区气候、涵养水源、生物多样性保护等方面发挥着重要作用. 近年来，由于受到气候变化和人类活动的影响，导致会仙湿地面积逐渐萎缩，区域内优势植物群落的面积也在不断地减少，可能会进一步影响到湿地生态系统的物质循环等. 目前，会仙湿地在沉积物地球化学元素变化[15]、湿地稻田与旱地土壤微生物量和酶活性的比较[16]、土壤养分和微生物学特征[17]及其湿地垦殖影响[18]等方面开展了相关研究，而对能够指示土壤有机碳早期变化的活性有机碳特征的研究还未见报道. 因此，探讨桂林会仙喀斯特湿地不同水位梯度下9种优势植物群落的不同有机碳组分特征及其影响因子，旨在为桂林市国家可持续发展议程创新示范区和桂林会仙喀斯特国家湿地公园建设提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于桂林市临桂区会仙镇，东至雁山区，西至四塘乡，地理坐标为北纬25°01′30″ ~ 25°11′15″，东经110°08′15″ ~ 110°18′00″，海拔150 ~160 m，总面积约120 km^2，是以草本沼泽和湖泊为主的喀斯特湿地，是国内为数不多的中低海拔大型喀斯特湿地之一，现已规划为我国最大的喀斯特湿地公园(图1). 该区属亚热带季风气候区，年均气温16.5 ~20.5℃，极高温度达38.80℃，极低温度为 -3.30℃，年均降雨量为1 890.4 mm. 降雨时空分布不均，多集中在每年的3 ~8月，形成了春夏雨多而集中，秋冬少雨干旱的特点. 土壤以红黄壤和红壤为主，集中分布于洼地、平原和缓坡，土壤层薄甚至基岩裸露. 湿地植被以挺水植被和沉水植被为主，植物种类较多，且生长茂盛，盖度常可达80% ~ 95%，主要建群种有芦苇(*Phragmites*

communis）、华克拉莎（*Cladium chinense*）、五刺金鱼藻（*Ceratophyllum demersumvar. oryzelorum*）、石龙尾（*Limnphila sessiliflora*）等.

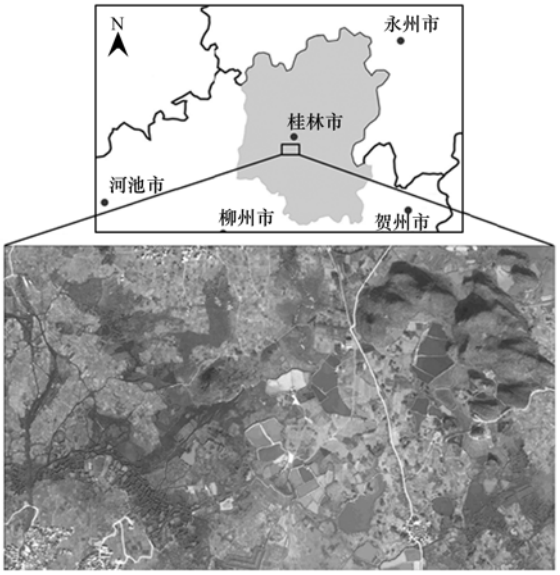


图 1　桂林会仙喀斯特湿地区位

Fig. 1　Location map of Huixian Karst wetland in Guilin

1.2　实验方法

1.2.1　取样方法

2014 年 10 月，基于会仙喀斯特湿地水位梯度的变化，从河岸附近到深水区设置采样区，选取 9 个不同植物群落，分别为柳叶箬群落（*Isachne globosa*），LYR，河岸附近；铺地黍群落（*Panicum repens*），PDS，河岸附近；田间鸭嘴草群落（*Ischaemum rugosum var. segetum*），YZC，浅水区；菰群落（*Zizania caduciflora*），G，浅水区；芦苇群落（*Phragmites communis*），LW，浅水区；长苞香蒲群落（*Typha angustata*），CBXB，积水沼泽；华克拉莎群落（*Cladium chinense*），HKLS，积水沼泽；水毛花群落（*Scirpus triangulatus*），SMH，深水区；莲群落（*Nelumbo nucifera*），L，深水区. 记录样地植被类型、植被覆盖状况、水位深度等.

每个群落类型选择 3 块约 20 m×20 m 的样地，作为 3 个重复，按照 S 型方法分别在各样地中选取 5～8 个代表性样点采集土壤样品，按 0～10、10～20 和 20～30 cm 这 3 个层次用土壤取样器（直径 5 cm）分层取土，同层土壤混匀为 1 个土样. 将采集的土壤样品装在无菌自封袋中，迅速置于密封冰袋容器中冷藏后带回实验室于 4℃ 冰箱中保存，然后备 2 份处理（1 份鲜样，1 份风干样）. 鲜样用于土壤可溶性有机碳（DOC）和土壤微生物生物量碳（MBC）等的分析；剩余样品常规处理，过 2mm 筛后装密封瓶保存，用于其它土壤理化性质分析. 同时采集环刀土，称取鲜重，带回实验室烘干称重后计算土壤含水量（SWC）和土壤容重（ρ）.

1.2.2　分析方法

土壤有机碳（SOC）采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法，处理好的样品用总有机碳 TOC 仪（岛津 5000A，日本）测定 SOC 含量，全氮（TN）通过德国 Vario ELIII 元素分析仪测定. 土壤轻组有机碳（LFOC）和重组有机碳（HFOC）采用 NaI 密度分离法[19]，称取过 2 mm 土壤筛的风干土 6.00 g，放置在 50 mL 的离心瓶中，加入 30 mL 浓度为 1.70 $g\cdot cm^{-3}$ 的 NaI 重液，用玻璃棒搅拌，振荡 5 min，超声波分离 10 min，然后在 4 200 $r\cdot min^{-1}$ 下离心 10 min. 用虹吸法收集悬浮物，再重复加重液，超声波振荡，离心，重复操作 3 次. 用 0.45 μm 滤膜真空抽滤，所得样品用 100 mL 0.01 $mol\cdot L^{-1}$ $CaCl_2$ 溶液洗涤，再用 200 mL 蒸馏水反复冲洗至无 Cl^{-1} 反应（用 $AgNO_3$ 溶液检验），得到轻组. 剩余部分为重组，采用同样的 $CaCl_2$ 洗涤液和蒸馏水反复冲洗重组. 测定样品重量回收率，所得回收率均在 95% 以上. 收集滤膜上的样品至烧杯中，然后在 60℃ 下烘干 24 h 称重. 取烘干好的轻组与重组分别过 0.25 mm 土壤筛，用 Multi N/C 3100 TOC 仪（德国耶拿）测定其有机碳含量，即为轻组有机碳和重组有机碳. 土壤易氧化态碳（EOC）采用高锰酸钾氧化-比色法测定[20]，称 1.5 g 过 100 目筛的风干土样品，装入 100mL 离心瓶中，加入 25 mL 浓度为 333 $mmol\cdot L^{-1}$ K_2MnO_4，在 25 $r\cdot min^{-1}$ 摇床振荡 1 h，然后在 4 000 $r\cdot min^{-1}$ 下离心 5 min，取上清液用去离子水按 1∶250 稀释后，用 Beckman Du-650 紫外可见分光光度计（美国贝克曼公司）比色，根据 K_2MnO_4 的消耗量计算土壤 EOC 含量.

土壤可溶性有机碳（DOC）采用 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ K_2SO_4 浸提法[21]，将新鲜的土样过 2mm 筛，去除可见的植被根系等杂物，称 10 g（干土重）的新鲜土壤置于 250 mL 的烧瓶中，加入 40 mL 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ K_2SO_4 浸提，振荡 30 min，然后在 8 000 $r\cdot min^{-1}$ 下离心 20 min，取上清液过 0.45 μm 滤膜. 用总有机碳 TOC 仪（岛津 5000A，日本）测定浸提液有机碳浓度，得到 DOC. 土壤颗粒有机碳（POC）采用六偏磷酸钠分散法测定[22]，称取 10 g 过 2 mm 筛的风干土样，并加入 30 mL 浓度为 5 $g\cdot L^{-1}$ 的六偏磷酸钠 $(NaPO_3)_6$ 溶液中，在振荡器上振荡 15 h. 然后取土壤悬液过 53 μm 滤膜，再用蒸馏水反复冲洗，并将留在滤膜上物质在 60℃ 下烘干 12 h，得到土壤中颗粒态碳组分. 采用 Multi N/C 3100 TOC 仪

(德国耶拿)测定其有机碳含量，即为 POC. 土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸浸提法测定[23]. 将采集的新鲜土壤仔细剔除动植物残体，自然风干后过 2 mm 土壤筛，用英国 Malvern 公司 Mastersize 2000 型激光粒度仪测定土壤粒径组成. 按照土壤粒径分级标准将土壤分为 3 个等级：黏粒(clay，<0.002 mm)、粉粒(silt，0.002 ~ 0.05 mm)、砂粒(sand，0.05 ~ 2 mm). 研究区各样点基本信息见表 1，其中群落的地上、地下生物量(0 ~ 50 cm)为各群落生长旺盛期的生物量.

表 1 土壤采样点基本信息1)

Table 1 Characteristics of soil sampling sites

采样点	植被类型	植物群落	pH	生物量/g·m^{-2}		全氮/g·kg^{-1}	含水量/%	容重/g·cm^{-3}	土壤机械组成(质量分数)/%		
				地上	地下				黏粒	粒粒	砂粒
河岸附近	湿生	PDS	5.90e	80.58d	149.67d	1.53de	18.34f	1.58a	27.64a	55.92bc	16.44cd
河岸附近	湿生	LYR	6.47d	52.98e	76.21e	1.35f	20.96e	1.58a	28.00a	55.12c	16.88cd
浅水区	挺水	YZC	7.02d	66.32e	97.85e	1.55de	23.76de	1.53ab	19.72b	59.61b	20.67c
浅水区	挺水	G	7.68a	2 136.78a	5 284.92a	2.27bc	60.72b	1.32d	19.92b	48.09d	31.99b
浅水区	挺水	LW	7.26c	1 526.65b	3 131.26b	2.16c	25.88d	1.50b	19.58b	65.15a	15.27d
积水泽沼	挺水	CBXP	7.35c	1 234.94b	2 598.14b	2.57ab	36.84c	1.42c	20.94b	64.18a	14.88d
积水泽沼	挺水	HKLS	7.51b	2 295.17a	5 544.85a	2.85a	32.18c	1.44c	21.60b	64.08a	14.32d
深水区	挺水	SMH	7.77a	353.96c	831.16c	1.80de	100.70a	1.33d	22.32b	32.67e	45.00a
深水区	挺水	L	7.55a	1 026.82b	738.53c	1.93cd	106.14a	1.24e	22.61b	36.15e	41.24a

1)同列不同小写字母表示不同植物群落间差异显著($P<0.05$)

1.3 数据分析

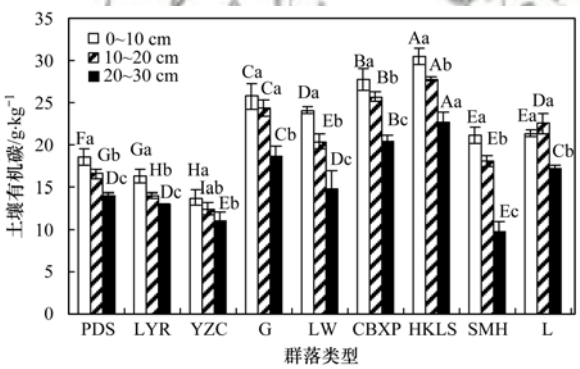
对不同植物群落各土层土壤指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较($\alpha=0.05$)，所有数据经 K-S 检验均符合正态分布，统计检验使用 Duncan's 检验，数据未符合方差齐性的条件下使用 Dunnett's T3 检验，对土壤各理化性质与碳组分指标等进行 Pearson 相关性分析. 物理因子包括土壤含水量(SWC)、土壤容重 ρ 和土壤机械组成(黏粒、粉粒和砂粒百分比)，土壤化学因子包括土壤 pH、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN). 采用逐步回归分析方法建立土壤因子对各有机碳组分含量的多元回归方程，对各有机碳组分含量的显著性影响因子进行识别，然后根据回归分析结果对识别出的显著性影响因子进行通径分析，比较各因子对各有机碳组分的影响程度和相对贡献，数据处理和分析在 Excel 2003 和 SPSS 18.0 上进行.

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳及各组分含量

2.1.1 土壤有机碳分布特征

不同植物群落下土壤有机碳(SOC)分布如图 2 所示. 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤有机碳的最低值出现在田间鸭嘴草群落(YZC)，20 ~ 30 cm 土壤有机碳最低值分布在水毛花群落(SMH)；华克拉莎(HKLS)群落的土壤有机碳含量在各土层中最高，均显著高于其它各植物群落($P<0.05$). 除莲群落(L)外，各群落的土壤有机碳含量均随土层深度的增加呈下降趋势，且不同土层间差异显著($P<0.05$). 在 0 ~ 30 cm 土层内，土壤有机碳含量的变化趋势为 HKLS > CBXP > G > L > LW > PDS > SMH > LYR > YZC($P<0.05$).



不同大写字母表示不同群落同一土层间差异显著，
不同小写字母表示同一群落不同土层间差异显著($P<0.05$)，下同

图 2 会仙湿地不同植物群落有机碳分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of SOC content in different plant communities in the Huixian wetland

2.1.2 土壤有机碳组分特征

不同植物群落下土壤轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC)分布如图 3 所示. 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤轻组和重组有机碳，20 ~ 30 cm 土壤轻组有机碳的最低值均出现在田间鸭嘴草群落(YZC)，20 ~ 30 cm 重组有机碳最低值则分布在水毛花群落(SMH). 华克拉莎(HKLS)群落的土壤轻组和重组有机碳含量在各土层中均为最高，且显著高于其它各植物群落($P<0.05$). 除 LYR、LW、SMH 群落外，其它群落的土壤轻组有机碳含量均随土层深度的增加呈下降趋势，且不同土层间差异显著($P<0.05$). 除莲群落(L)外，其它群落的土壤重组有机碳含量均随土层深度的增加呈显著下降

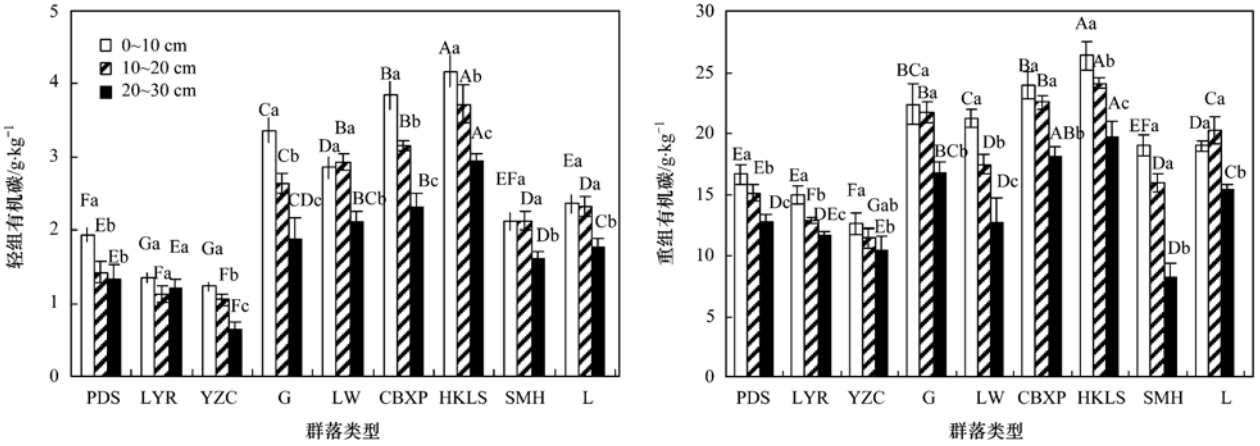


图 3　会仙湿地不同植物群落土壤轻组及重组有机碳分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of soil LFOC and HFOC content in different plant communities in the Huixian wetland

趋势($P<0.05$). 在 0 ~ 30 cm 土层内, 土壤轻组有机碳含量的变化趋势为 HKLS > CBXP > LW > G > L > SMH > PDS > LYR > YZC($P<0.05$), 土壤重组有机碳含量的变化趋势为 HKLS > CBXP > G > L > LW > PDS > SMH > LYR > YZC($P<0.05$).

2.1.3　土壤活性有机碳组分

不同植被类型下土壤可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)和土壤微生物生物量碳(MBC)的分布如图 4 所示. 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层 DOC 和 POC 最低值出现在田间鸭嘴草群落(YZC), 20 ~ 30 cm 土层 DOC 和 POC 最低值分布在柳叶箬群落(LYR). 0 ~ 10 cm 土层 EOC 最低值出现在田间鸭嘴草群落(YZC), 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层 EOC 最低值分布在水毛花群落(SMH). 华克拉莎(HKLS)群落的 DOC 和 EOC 含量在各土层中均为最高, 其 POC 含量在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层最高, 而长苞香蒲群落(CBXP)的 POC 含量在 20 ~ 30 cm 土层最高, 均显著高于其它植物群落类型($P<0.05$). 各土层的 MBC 最高值出现在华克拉莎群落(HKLS), MBC 最低值出现在水毛花群落(SMH), 且群落间差异显著($P<0.05$). 各群落 DOC 和 EOC 含量均随土层深度的增加而减少; 除铺地黍(PDS)和田间鸭嘴草(YZC)群落外, 其它群落 POC 含量均随土层深度

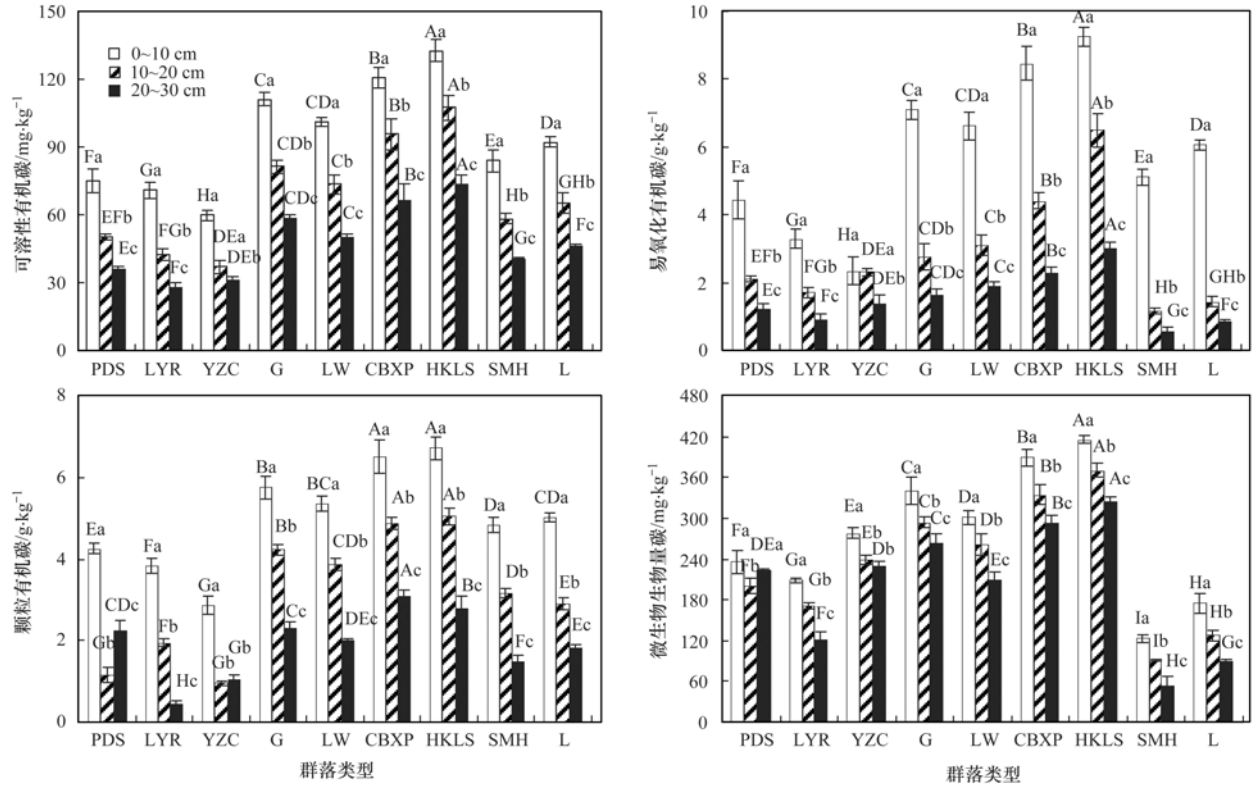


图 4　会仙湿地不同植物群落土壤可溶性有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of soil DOC, EOC, POC, and MBC content in different plant communities in the Huixian wetland

的增加呈下降趋势；除铺地黍群落(PDS)外，其它群落 MBC 含量均随土层深度的增加而显著减少($P<0.05$)．在 0～30 cm 土层内，土壤 DOC 和 POC 含量的变化趋势一致为：HKLS > CBXP > G > LW > L > SMH > PDS > LYR > YZC($P<0.05$)；土壤 EOC 含量的变化趋势为：HKLS > CBXP > LW > G > L > PDS > SMH > YZC > LYR($P<0.05$)；土壤 MBC 含量的变化趋势为：HKLS > CBXP > G > LW > YZC > PDS > LYR > L > SMH($P<0.05$)．总体上，积水沼泽区域华克拉莎群落和长苞香蒲群落的各活性有机碳组分表现最高．

从表 2 可见，各群落 LFOC 占 SOC 的比例变化范围为 7.79%～13.56%，HFOC 占 SOC 的比例在 86.44%～92.21%，二者所占比例随土层变化并无明显规律．各群落 EOC 占 SOC 的比例在 12.06%～22.32%，DOC 占 SOC 的比例变化范围为 0.32%～0.38%，二者占比随土层变化均呈减小趋势．各群落 POC 占 SOC 的比例在 12.57%～19.19% 波动，除铺地黍和田间鸭嘴草群落外，POC/SOC 随土层变化呈减小趋势．各群落 MBC 占 SOC 的比例在 0.55%～2.00% 波动，MBC/SOC 随土层变化并无明显规律．

表 2 土壤有机碳不同组分所占比例[1)](平均值±标准差)/%

Table 2 Percentage of different components of soil organic carbon(mean ± SD)/%

群落类型	土层/cm	LFOC/SOC	HFOC/SOC	EOC/SOC	DOC/SOC	POC/SOC	MBC/SOC
PDS	0～10	10.43±0.20CDEa	89.57±0.20BCa	23.84±2.15Ca	0.40±0.02Aa	22.94±0.74Aa	1.28±0.16Fa
	10～20	8.64±1.05Fa	91.36±1.05Aa	12.83±0.41Eb	0.30±0.01Db	6.98±0.95Cc	1.21±0.07Fb
	20～30	9.51±1.71Da	90.49±1.71Ba	8.62±1.35BCc	0.26±0.01DEc	15.97±1.57Ab	1.59±0.03DEa
	均值	9.53DE	90.47BC	15.10AB	0.32A	15.30AB	1.36D
LYR	0～10	8.29±1.05Fa	91.71±1.05Aa	20.21±0.98Da	0.44±0.03Aa	23.60±1.99Aa	1.28±0.06Ga
	10～20	8.03±0.63Fa	91.97±0.63Aa	12.27±1.30Eb	0.30±0.01Db	13.95±0.76Bb	1.22±0.01Gb
	20～30	9.35±0.93Da	90.65±0.93Ba	7.03±1.16CDc	0.22±0.02Ec	3.38±0.46Ec	0.93±0.08Fc
	均值	8.56EF	91.44AB	13.17B	0.32A	13.65AB	1.15E
YZC	0～10	8.95±0.38EFa	91.05±0.38ABb	17.02±2.67Dab	0.44±0.04Aa	20.88±3.13Aa	2.02±0.18Ea
	10～20	8.50±1.13Fa	91.50±1.13Ab	18.56±2.12BCa	0.30±0.02Db	7.63±0.22Cb	1.91±0.07Eb
	20～30	5.92±1.40Eb	94.08±1.40Aa	12.43±3.24Ab	0.28±0.01CDb	9.22±0.97Db	2.06±0.25Db
	均值	7.79F	92.21A	16.00AB	0.34A	12.57B	2.00CD
G	0～10	13.09±1.19ABa	86.91±1.19EFa	27.64±2.55ABa	0.43±0.02Aa	22.41±2.27Aa	1.32±0.02Ca
	10～20	10.79±0.15DEb	89.21±0.15BCa	11.27±1.21Eb	0.33±0.02BCDb	17.38±1.16Ab	1.21±0.08Cb
	20～30	10.03±1.01Db	89.97±1.01Bb	8.78±1.09BCb	0.31±0.01BCb	12.38±0.24BCc	1.41±0.03Cc
	均值	11.30BC	88.70DE	15.90AB	0.36A	17.39AB	1.31B
LW	0～10	11.85±1.61BCb	88.15±1.61DEa	27.55±2.08ABa	0.42±0.01Aa	22.26±1.06Aa	1.25±0.06Da
	10～20	14.36±0.39Aa	85.64±0.39Fb	15.24±0.78Db	0.36±0.01ABCb	19.00±1.54Ab	1.28±0.03Db
	20～30	14.46±1.30ABa	85.54±1.30DEb	13.10±2.52Ab	0.34±0.04Bb	13.79±2.11ABc	1.43±0.16Ec
	均值	13.56A	86.44F	18.63AB	0.37A	18.35AB	1.32C
CBXP	0～10	13.83±0.40Aa	86.17±0.40Fa	30.51±3.15Aa	0.44±0.03Aa	23.44±2.50Aa	1.40±0.10Ba
	10～20	12.25±0.45BCb	87.75±0.45DEa	17.15±1.29CDb	0.37±0.03ABa	18.99±0.91Ab	1.30±0.03Bb
	20～30	11.29±1.11CDb	88.71±1.11BCb	11.20±0.73ABc	0.33±0.04BCb	15.13±0.53Ac	1.43±0.06Bc
	均值	12.46AB	87.54EF	19.62AB	0.38A	19.19A	1.38A
HKLS	0～10	13.70±1.03Aa	86.30±1.03Fa	30.29±1.01Aa	0.43±0.03Aa	22.02±1.14Aa	1.36±0.06Aa
	10～20	13.39±1.00ABa	86.61±1.00EFa	23.32±1.55Ab	0.39±0.02Ab	18.18±0.86Ab	1.33±0.04Ab
	20～30	13.00±0.78BCa	87.00±0.78CDa	13.34±1.32Ac	0.33±0.02BCc	12.30±1.79BCc	1.43±0.09Ac
	均值	13.36A	86.64F	22.32A	0.38A	17.50AB	1.37A
SMH	0～10	10.00±0.11DEb	90.00±0.11BCa	24.24±0.89BCa	0.40±0.03Aa	22.89±0.95Aa	0.58±0.01Ia
	10～20	11.76±0.94CDb	88.24±0.94CDa	6.40±0.67Fb	0.32±0.02CDb	17.53±1.20Ab	0.50±0.02Ib
	20～30	16.54±2.53Aa	83.46±2.53Eb	5.54±0.74Db	0.41±0.04Aa	15.11±1.86Ab	0.56±0.10Hc
	均值	12.77AB	87.23EF	12.06B	0.38A	18.51AB	0.55G
L	0～10	11.06±0.81CDa	88.94±0.81CDa	28.43±0.58Aa	0.43±0.001Aa	23.65±0.89Aa	0.82±0.07Ha
	10～20	10.27±0.21Ea	89.73±0.21Ba	6.36±0.86Fb	0.29±0.03Db	12.93±1.07Bb	0.56±0.01Hb
	20～30	10.33±0.41Da	89.67±0.41Ba	5.12±0.33Db	0.27±0.001Db	10.49±0.21CDc	0.52±0.02Gc
	均值	10.55CD	89.45CD	13.30B	0.33A	15.69AB	0.64F
群落平均		11.10	88.90	16.23	0.35	16.46	1.23

1)同列不同大写字母表示同一土层不同植物群落间差异显著($P<0.05$)；同列不同小写字母表示同一植物群落不同土层间差异显著($P<0.05$)

2.2　土壤因子与土壤有机碳组分之间关系

2.2.1　土壤有机碳与土壤因子的相关分析

土壤有机碳组分与其它土壤因子的相关性分析结果显示(表 3)，土壤 pH 与 LFOC、HFOC、DOC、POC 呈显著正相关($P<0.01$，$P<0.05$)．各碳组分均与 SOC 和 TN 呈显著正相关($P<0.01$)，而土壤容重和土壤黏粒则相反，总体上均呈显著负相关($P<0.01$)．土壤含水量与 MBC 呈显著负相关($P<0.01$)，与 POC 显著正相关($P<0.05$)．土壤粉粒含量与 MBC 呈显著正相关($P<0.05$)，砂砾与 MBC 显著负相关($P<0.01$)．表明会仙喀斯特湿地土壤有机碳组分与土壤因子关系密切，且相互影响．

表 3　会仙湿地土壤有机碳组分与其它土壤因子之间的相关性[1)]

Table 3　Bivariate correlation of soil organic carbon components and other soil factors in the Huixian wetland

土壤因子	LFOC	HFOC	DOC	EOC	POC	MBC
pH	0.39**	0.32**	0.28*	0.14	0.28*	0.05
SOC	0.92**	1.00**	0.92**	0.80**	0.86**	0.68**
SWC	0.17	0.19	0.19	0.07	0.24*	−0.46**
TN	0.83**	0.83**	0.92**	0.95**	0.93**	0.68**
ρ	−0.45**	−0.49**	−0.49**	−0.34**	−0.51**	0.05
clay	−0.27*	−0.30**	−0.29**	−0.18	−0.31**	−0.29**
silt	0.19	0.11	0.11	0.17	0.06	0.68**
sand	−0.07	0.01	0.003	−0.10	0.07	−0.54**

1) * 表示 $P<0.05$；** 表示 $P<0.01$

2.2.2　土壤因子对有机碳各组分影响的效应分解

由于土壤因子之间存在较强的相关性，在进行回归分析时可能出现共线性现象[24]，并且各土壤因子的数量变化范围不同，因此采用逐步回归分析还不能直观地体现各环境因子对土壤有机碳组分含量的贡献大小，而通过标准化回归系数的方法计算通径系数，并将相关系数分解为直接通径系数与间接通径系数，可以较直观地反映各环境因子对土壤有机碳各组分的影响作用．通过逐步回归分析得到各有机碳组分与其它土壤因子的统计回归模型见公式(1)～(6)：

$$\mathrm{LFOC} = -1.626 + 0.114\ \mathrm{SOC} + 0.214\ \mathrm{TN} + 0.212\ \mathrm{pH} - 0.028\ \mathrm{sand} + 0.007\ \mathrm{SWC} \quad (1)$$

$$\mathrm{HFOC} = 1.626 + 0.886\ \mathrm{SOC} - 0.214\ \mathrm{TN} - 0.212\ \mathrm{pH} + 0.028\ \mathrm{sand} - 0.007\ \mathrm{SWC} \quad (2)$$

$$\mathrm{EOC} = -4.558 + 3.226\ \mathrm{TN} + 0.067\ \mathrm{clay} \quad (3)$$

$$\mathrm{DOC} = -16.973 + 23.831\ \mathrm{TN} + 2.027\ \mathrm{SOC} \quad (4)$$

$$\mathrm{POC} = -1.629 + 1.713\ \mathrm{TN} + 0.080\ \mathrm{SOC} \quad (5)$$

$$\mathrm{MBC} = 759.262 + 5.090\ \mathrm{SOC} + 1.255\ \mathrm{silt} + 38.752\ \mathrm{TN} - 2.661\ \mathrm{SWC} - 446.345\rho \quad (6)$$

从表 4 可知，土壤 SOC、砂粒含量和土壤含水量对 LFOC 的直接通径系数均大于其间接通径系数，表明三者对 LFOC 含量的主要贡献表现为直接作用效应；而土壤 TN、pH 的间接通径系数大于其直接通径系数，表明二者对 LFOC 含量的主要贡献表现为通过影响其它因子而产生的间接作用效应．SOC 对 HFOC 的直接通径系数大于其间接通径系数，说明 SOC 对 HFOC 含量的主要贡献为直接正作用效应．相反，土壤全氮、pH、砂粒含量和土壤含水量的间接通径系数大于其直接通径系数，说明四者对 HFOC 含量的主要贡献均表现为通过影响其它因子而产生的间接作用效应．土壤因子与 LFOC、HFOC 含量的相关性依次为：SOC > TN > pH > SWC > sand．SOC 对 LFOC 和 HFOC 的直接正作用最大，TN 对 LFOC 和 HFOC 主要是通过 SOC 起间接正作用；土壤砂粒含量主要通过土壤含水量和土壤 pH 对 LFOC 和 HFOC 产生间接正效应；对于土壤 pH，主要通过土壤容重和 SOC 对 LFOC 和 HFOC 起间接正作用．土壤理化特征因子之间的相互作用，共同影响 LFOC 和 HFOC 含量．

土壤 TN 对 EOC 含量的直接作用明大于间接作用，且表现为正效应；而土壤黏粒含量对 EOC 含量的主要贡献表现为通过影响其它因子而产生的间接作用效应．在影响 DOC 和 POC 含量的显著性土壤因子中，土壤 TN 对 DOC 和 POC 的直接通径系数均大于其间接通径系数，并且表现为正效应，表明 TN 对 DOC 和 POC 含量的主要贡献均表现为直接作用效应，SOC 则相反，SOC 的间接通径系数较大，表明 SOC 对 DOC 和 POC 主要表现为间接作用效应．土壤因子与 MBC 含量的相关性依次为：土壤有机碳 > 土壤粉粒含量 > 土壤全氮 > 土壤含水量 > 土壤容重．土壤含水量对 MBC 含量的直接作用最大，并且表现为负效应，其次为土壤容重的负效应；而土壤有机碳、土壤全氮和土壤粉粒含量对 MBC 的直接正作用相对较小．各土壤因子中，土壤容重对 MBC 的间接作用最大，主要是通过土壤含水量对 MBC 起间接正作用；其次是土壤粉粒含量，

主要通过土壤含水量和土壤容重对 MBC 产生间接效应；土壤有机碳和土壤全氮含量对 MBC 的间接正作用大于其直接效应. 总体上，SOC、TN、土壤粉粒含量和容重对 MBC 含量的主要贡献均表现为通过影响其它因子而产生的间接作用效应，土壤理化特征因子之间的相互作用共同影响着 MBC 含量.

同时，所选土壤因子对 HFOC 含量的决定系数 $R^2 = 0.992$，剩余因子的通径系数 $e = 0.089$，该值较小，说明其它因素对 HFOC 含量影响较小. 而不同的是，对 LFOC 和 DOC 含量的决定系数 $R^2 = 0.792$，剩余因子的通径系数 $e = 0.456$；对 EOC 含量的决定系数 $R^2 = 0.783$，剩余因子的通径系数 $e = 0.466$；对 POC 含量的决定系数 $R^2 = 0.297$，剩余因子的通径系数为 $e = 0.838$；对 MBC 含量的决定系数 $R^2 = 0.314$，剩余因子的通径系数为 $e = 0.828$. 这些剩余因子的通径系数 e 值都相对较大，表明还有对 LFOC、EOC、DOC、POC 和 MBC 含量影响较大的一些其它因素，有待进一步深入探讨研究.

表 4 会仙湿地土壤有机碳组分与土壤因子的简单相关系数分解

Table 4 Simple correlation coefficient decomposition between soil organic carbon fractions and other soil factors in the Huixian wetland

项目	指标	相关系数	直接通径系数	间接通径系数									决策系数 R^2
				SOC	TN	pH	sand	SWC	clay	silt	ρ	合计	
LFOC	SOC	0.922	0.682		0.142	0.050	0.001	0.048				0.240	0.792
	TN	0.833	0.167	0.578		0.040	0.001	0.047				0.666	0.251
	pH	0.390	0.148	0.229	0.046		−0.173	0.140				0.242	0.093
	sand	−0.073	−0.372	−0.001	−0.001	0.069		0.232				0.299	−0.084
	SWC	0.167	0.261	0.127	0.030	0.080	−0.330					−0.094	0.019
HFOC	SOC	0.997	1.044		0.142	0.050	0.001	0.048				0.240	0.992
	TN	0.834	−0.033	0.578		0.040	0.001	0.047				0.666	−0.056
	pH	0.319	−0.029	0.229	0.046		−0.173	0.140				0.242	−0.019
	sand	0.013	0.073	−0.001	−0.001	0.069		0.232				0.299	−0.004
	SWC	0.186	−0.051	0.127	0.030	0.080	−0.330					−0.094	−0.022
EOC	TN	0.915	0.682						−0.055			−0.055	0.783
	clay	−0.179	0.167		−0.222							−0.222	−0.088
DOC	TN	0.952	0.614	0.338								0.338	0.792
	SOC	0.919	0.399		0.520							0.520	0.574
POC	TN	0.929	0.177	0.020								0.020	0.297
	SOC	0.859	0.023		0.150							0.150	0.039
MBC	SOC	0.678	0.297		0.251			−0.174		0.019	0.286	0.382	0.314
	silt	0.677	0.159	0.036	0.040			0.811			−0.368	0.518	0.190
	TN	0.676	0.296	0.251				−0.168		0.021	0.276	0.380	0.312
	SWC	−0.455	−0.939	0.055	0.053					−0.138	0.514	0.484	−0.028
	ρ	0.051	−0.587	−0.145	−0.139			0.822		0.100		0.638	−0.404

3 讨论

3.1 会仙湿地土壤有机碳及其组分特征

土壤有机碳含量取决于土壤、植被、人为活动干扰等多种因素综合影响下有机碳输入与输出的动态平衡，因此不同植被类型下土壤有机碳的动态平衡存在差异[25]. 本研究表明，在 0 ~ 30 cm 土层土壤有机碳含量在沼泽区域的华克莎拉群落最高，鸭嘴草群落最低，而两个群落的地上、地下生物量也分别为最高和较低($P < 0.05$)，并且与土壤有机碳含量显著正相关($P < 0.05$，未发表数据)，进一步说明会仙喀斯特沼泽湿地土壤有机碳含量相对较高[18]. 反映出植物群落的生长发育过程对土壤有机碳有着重要作用，植被茂盛生长下的土壤相对淤积，植被凋落物等回归进入土壤，有利于土壤营养物质的保存和湿地土壤有机碳的累积. 土壤轻组有机碳主要来源于不同分解阶段的植物残体，对土壤有机质周转有重要作用，是植物养分的短期储存库，是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分[9]. 会仙湿地不同植物群落土壤 0 ~ 30 cm LFOC、HFOC 占总有机碳平均比例分别为：11.10%、88.90%(表 2)，土壤有机碳和重组有机碳含量的变化趋势一致为：HKLS > CBXP > G > L > LW > PDS > SMH > LYR > YZC($P < 0.05$)，说明其土壤碳库以较稳定的重组有机碳为主，轻组有机碳比例低于川西若尔盖[26]以及东北三江[13,27]等高海拔寒冷地区，稍高于黄河三角洲碱蓬湿地(< 10.0%)[9]和鄱阳湖湿地(7.1%)[28]区域. 本研究区土壤轻组有机碳分配比相对较低，重组有机碳分配比较高，这主要是由于会仙湿地地处亚热带，湿热的气候条件有利于 LFOC 的分解，同时，植物凋落物以及凋落物的分解速率也可能影响到轻组有机质的含量. 水毛花和芦苇群落地下生物量相对也较高，植物残体分解及沉淀导致 10 ~ 20 cm 土壤 LFOC 分配比较高.

此外，会仙喀斯特湿地水文系统具有的地表、地下双重空间结构，湿地的水情多变，地表径流可能加大了对植物枯落物和残体的冲刷作用，造成 LFOC 的流失以至于 LFOC 的富集量较少.

会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤有机碳的主要组成部分是重组有机碳，属于分解速度较慢的有机碳库，土壤碳库比较稳定，这类似于黄河三角洲碱蓬湿地[9]和鄱阳湖湿地[28]的研究结果. 重组有机碳含量决定了土壤碳库的稳定性和土壤质量，重组有机碳可作为反映土壤有机碳稳定性的监测因子. 积水沼泽区(华克拉莎，长苞香蒲群落)土壤有机碳及重组有机碳含量高于其它区域，尤其华克拉莎(HKLS)群落各土层中的土壤有机碳、土壤轻组有机碳和重组有机碳含量均最高，且显著高于其它各植物群落($P<0.05$)，除了受土壤和地上植被的影响之外，可能还有外源物输入的影响，如水流带来营养物质的堆积导致. 从河岸附近到深水区，随水位的增加，会仙喀斯特湿地土壤有机碳表现为先增大后减小的变化趋势，这与宋红丽[29]在黄河三角洲湿地的研究结果相似. 尽管水分会对土壤有机碳及其不同组分的分布格局产生影响，但会仙喀斯特湿地表现出植物群落是影响湿地土壤有机碳及重组有机碳、轻组有机碳分布的驱动因子，水位梯度变化则更多地通过影响地表植被群落类型从而间接地影响土壤有机碳及其不同组分. 本研究 SOC 含量与靳振江等[16]关于会仙岩溶湿地有机碳质量分数较高的研究结果接近，稍高于张莹等[30]在会仙岩溶湿地 SOC 和养分的研究结果，这主要是由于植物群落类型、实验地点和取样方法存在差异，反映出喀斯特环境中碳酸盐的溶蚀作用致使土壤中 HCO_3^-、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量升高，HCO_3^-、Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间的相互作用促进了会仙喀斯特湿地土壤有机碳的相对稳定[18,30].

研究区不同群落间的 SOC、HFOC、LFOC 差异显著(图 1 和图 2)，且 LFOC、HFOC 与 SOC 含量均呈显著正相关($P<0.01$). 不同群落类型下土壤 LFOC 和 HFOC 含量同 SOC 含量变化趋势基本一致. 除个别群落外，在同一群落的不同土层间，HFOC、LFOC 含量都表现出表层高于底层的趋势. 然而 HFOC 和 LFOC 在不同土层中所占 SOC 的比例却无明显规律，出现个别群落底层 HFOC 分配比例高于表层，这可能是由于会仙湿地部分植物的根系主要分布于表层，表层有机碳含量较丰富，致使底层 SOC 含量有所降低. SOC、LFOC 含量随着土层显著降低，而 HFOC 含量随土层增加下降的幅度相对较小，所以形成铺地黍群落、田间鸭嘴草群落、菰群落、长苞香蒲群落、华克拉莎群落和莲群落植物群落下层 HFOC 分配比例高于表层的现象，这与金奇等[28]在鄱阳湖湿地的研究结果相一致.

3.2　会仙湿地土壤活性碳组分的影响因素

土壤 DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源，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[31]. 会仙湿地 9 种植物群落不同土层土壤 DOC 占有机碳比例为 0.32% ~ 0.38%，与其它土壤的相应值类似(0.08% ~ 0.95%)[32]，接近但小于鄱阳湖湿地(0.16% ~2.16%)[28]的范围，明显低于杭州湾湿地(1.01% ~1.97%)[10]. DOC 在 0 ~ 30 cm 土层呈逐渐递减趋势，与霍莉莉等[33]在三江平原沼泽湿地的研究一致，表明会仙湿地土壤 DOC 主要富集在根系较多的表土层. 本研究中华克拉莎群落(HKLS)处于积水沼泽区，季节性淹水导致的干湿交替更有利于 DOC 的释放，因此其土壤 DOC 含量显著高于其它群落. 而水毛花(SMH)和莲(L)群落由于长期淹水，表层(0 ~ 10 cm)DOC 含量较河岸边区域(LYR、PDS)高，但下层(10 ~ 30 cm)DOC 含量相对较低，这是因为虽然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表层可溶性有机碳量，但其厌氧环境(尤其是下层土壤)使得土壤微生物活性很低也不利于可溶性有机碳的累积[34]，且长期淹水使得土壤 DOC 可能更容易进入水体而流失，导致其土壤 DOC 含量较低. 土壤 EOC 占 SOC 比例越高，说明有机碳活性越强，被分解矿化的潜力越大，养分循环速率越快，不利于土壤有机碳的积累[14]. 会仙湿地不同植物群落土壤 EOC 占有机碳的比例较大(12.06% ~22.32%)，河岸附近及积水沼泽区群落的土壤 EOC 含量的分配比例显著高于深水区的水毛花和莲群落，表明淹水频率少的河岸区域植物群落土壤有机碳活性大、易转化. EOC 与 TN 相关性较大，可能与河岸附近及积水沼泽区域凋落物和细根碳输入较高有关. 因为细根周转量较大，更有利于植物生长，促进了土壤氮含量增加，进而影响土壤中 EOC 含量[35]. EOC 含量的差异性反映了不同植物群落土壤有机碳的氧化稳定性不同，积水沼泽区 EOC 占比高，说明华克拉莎和长苞香蒲群落土壤有机碳被分解矿化的潜力大，稳定性相对较差，这也反映出会仙湿地人为旅游活动的干扰对土壤有机碳稳定性有一定的影响；而深水区的分配比例最小，表明水毛花和莲群落的土壤有机碳活度低，有利于碳的积累. 可见，保护湿地完整性对于减少碳排放、维护湿地的碳汇功能具有重要的作用[29]，随着会仙喀斯特湿地国家公

园生态补水措施的实施，将在一定程度上有利于其土壤碳库稳定性的提高.

华克拉莎群落和苞香蒲群落位于季节性淹水的积水沼泽区，植被生长茂盛，较多的凋落物为土壤微生物提供大量碳源，且土壤通透性相对较好，促进了微生物的繁殖，因而能显著增加土壤 MBC 含量. 而位于深水区的水毛花和莲群落因长期淹水，地表枯落物难以直接归还土壤，加之一般厌氧环境会抑制土壤微生物活性而导致活性碳库周转速率低[36]，因此水毛花和莲群落的土壤 MBC 含量显著低于其它群落. 土壤 MBC 与 SOC 的比值——微生物熵(qMB)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，该值越高，土壤碳活性越大[37]. 相对于喀斯特陆地生态系统[38]，会仙湿地 9 种植物群落土壤的微生物熵较低，土壤碳活性较小，说明会仙湿地浅水区和沼泽区域的淹水频率较少，随着植被恢复，大量凋落物输入使得可供微生物利用的碳增多，土壤碳处于逐渐积累状态，微生物对土壤碳库的利用效率在逐渐提高，土壤质量逐渐得到改善. 土壤 POC 含量反映了土壤中非保护性有机碳的数量，颗粒有机碳比例则反映了土壤中非稳定性有机碳或非保护性有机碳的相对数量，颗粒有机碳的比例越高，有机碳中不稳定部分越高. 研究表明，森林(0 ~ 35 cm)的颗粒有机碳分配比例为 55% ~ 68%[39]；0 ~ 110 cm 土层颗粒有机碳分配比例农田为 27%，牧草地为 22%[40]；黄河三角洲碱蓬湿地(0 ~ 60 cm)土壤颗粒有机碳平均分配比例为 15.24% ~20.26%[9]. 会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤(0 ~ 30 cm)POC 平均占比为 12.57% ~ 19.19%，接近黄河三角洲碱蓬湿地，土壤中非稳定性有机碳的相对数量较低，由于植物群落不同，植物根系分布、水分状况、pH 值和土壤有机碳含量等的差异，土壤颗粒有机碳分配比例在土层的分布也不同，且均随着土壤深度的增加其分配比趋于降低. 各群落土壤中 DOC、EOC、MBC(除铺地黍群落外)含量均随土层深度的增加而减少，与 SOC 含量变化趋势一致. 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，根系产生的分泌物以及根系脱落物会增加 SOC 含量[41]，同时表层根系和凋落物分布较多能够为微生物提供更多的碳源，有利于微生物生长和繁殖. 随着土层的加深，土壤有机碳含量急剧下降，地下生物量也随着减少，因而土壤活性有机碳明显降低[42]. 不同活性有机碳组分占比反映了不同植物群落对会仙湿地有机碳含量及其组分特征有较大的影响.

3.3 土壤理化性质与土壤有机碳组分的相互关系

相关分析表明，会仙喀斯特湿地土壤有机碳各组分与 SOC 的相关性均达到了显著水平($P < 0.01$)，说明土壤活性有机碳很大程度上依赖于有机碳含量. 其它不同湿地类型的研究中也发现 MBC、DOC 含量与有机碳含量呈显著正相关关系[13,14]. 土壤 DOC、EOC、POC 和 MBC 含量两两间的相关性也达到了显著水平($P < 0.01$)，表明各活性碳相互之间关系密切，但同时，不同有机碳组分与 SOC 之间关联性的强弱存在差异，土壤 SOC 与 DOC 的正相关性大于与其它活性有机碳的相关性，说明 DOC 对会仙湿地土壤有机碳变化最敏感. 虽然 DOC、EOC、POC 和 MBC 等各组分的测定方法不同，但结果均可以反映出土壤有机碳的变化情况，LFOC，HFOC、DOC 等活性碳组分与 SOC 变化大体上趋势一致. 与本研究结果不同的是，高俊琴等[26]在若尔盖湿地研究结果表明，活性有机碳组分的变化不一定与有机碳的变化一致. 唐国勇等[43]在云南干热河谷生态脆弱地区研究表明，EOC 含量变化可以敏感地指示 SOC 动态，但 MBC、DOC 含量变化则不能反映 SOC 动态. 造成这些差异的原因主要是不同生态系统的植被类型、土壤类型等环境因子不同所致. 各组分与土壤全氮含量也呈显著相关($P < 0.01$)，其原因可能是土壤氮含量会影响到微生物对有机碳的分解效率，含氮量高的有机碳易被微生物分解，转化速度相对快，进而影响土壤有机碳的含量，这与肖烨等[44]和曾从盛等[45]的研究结果相似，说明会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤有机碳组分含量与土壤中氮素含量密切关联. 因此，通过改善土壤养分水平是提高土壤活性有机碳累积的关键措施之一[45].

土壤 pH 与 LFOC、HFOC、DOC 和 POC 显著正相关，说明 pH 可以影响土壤中微生物种类、数量及活性，从而影响部分碳组分的周转速率，这反映出与会仙喀斯特湿地土壤偏碱性的地质背景有关，也暗示 pH 的减小可能会降低土壤有机碳及其部分组分含量，从侧面也支持了课题组前期的研究结果：垦殖干扰导致了会仙喀斯特湿地土壤呈现偏酸性和养分含量降低的趋势[18]. 但与张文敏等[10]在杭州湾湿地报道的土壤 pH 与土壤有机碳及活性组分呈负相关的研究结果不一致，其认为 pH 的适当降低有提高土壤有机碳及其部分组分含量的趋势. 土壤容重与 LFOC、HFOC、DOC、EOC 和 POC 显著负相关($P < 0.01$)，黏粒含量与 LFOC、HFOC、DOC、POC 和 MBC 也显著负相关($P < 0.01$)，表

明土壤粒径组成结构影响着土壤有机碳组分的分配. 在影响 MBC 含量的显著性土壤因子中，土壤含水量对 MBC 含量的直接负作用最大，这与积水沼泽区的华克拉莎群落和苞香蒲群落 MBC 较高，而位于深水区的水毛花和莲群落 MBC 较低的趋势相吻合，说明与好氧微生物的活性受到了水分(水淹)条件的抑制有关[11,18]. 土壤容重对 MBC 的间接作用最大，主要是通过土壤含水量对 MBC 起间接正作用. 会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤理化因子间的相互作用共同影响着土壤有机碳各组分含量的变化，这与其它学者[12,46]的研究结果相近，水文条件可以通过土壤碳输入与输出直接影响 SOC 及其活性组分，也可以通过作用于含水量、容重、pH、TN 等理化性质间接影响 SOC 及其活性组分[47].

4　结论

(1)沿水位梯度的增加，会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤有机碳及其碳组分表现为先增大后减小的变化趋势. 积水沼泽区域有较高的 SOC、LFOC、HFOC、DOC、EOC、MBC 和 POC，表现出有较强的碳截存能力. SOC 的主要组分是 HFOC，土壤碳库相对稳定，HFOC 含量决定了土壤质量，HFOC 可作为反映土壤有机碳稳定性的监测因子. LFOC、HFOC 与 SOC 变化趋势一致，表现为土壤表层较高.

(2)SOC、砂粒含量和土壤含水量对 LFOC 的主要贡献表现为直接作用效应，TN 和土壤 pH 则表现为间接作用效应. SOC 对 HFOC 的主要贡献为直接作用效应，而 TN、砂粒含量、pH 和土壤含水量均表现为间接作用效应. TN 对 EOC 含量的直接作用较大，土壤黏粒含量对 EOC 含量的间接作用较大. TN 对 DOC 和 POC 含量的主要贡献表现为直接作用效应，而 SOC 则表现为间接作用效应. 土壤含水量对 MBC 的直接负作用最大，容重、土壤粉粒、SOC 和 TN 对 MBC 含量的主要贡献均表现为间接正作用效应.

(3)不同植被类型下土壤有机碳组分含量变化存在显著差异，但一致反映了会仙喀斯特湿地土壤有机碳的动态特征. 土壤活性有机碳组分含量很大程度上依赖于 SOC、TN 含量的变化，各活性碳组分间关系密切. 水位梯度下不同植物群落的差异性和土壤养分含量间的相互作用，是驱动会仙喀斯特湿地土壤有机碳及其组分含量变化的重要因素.

致谢：感谢田垒、于倩倩、李翠玲、蒋玉龙、刘建春等在实验样品分析方面提供的帮助！

参考文献：

[1] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, *et al*. Wetlands, carbon, and climate change[J]. Landscape Ecology, 2013, **28**(4): 583-597.

[2] Abril G, Martinez J M, Artigas L F, *et al*. Amazon river carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands[J]. Nature, 2014, **505**(7483): 395-398.

[3] 李睿, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3429-3437.
Li R, Jiang C J, Hao Q J. Impact of land utilization pattern on distributing characters of labile organic carbon in soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3429-3437.

[4] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, **528**(7580): 60-68.

[5] 张国, 曹志平, 胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(7): 1921-1930.
Zhang G, Cao Z P, Hu C J. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farmland ecosystem research: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, **22**(7): 1921-1930.

[6] Knox R G, Longo M, Swann A L S, *et al*. Hydrometeorological effects of historical land-conversion in an ecosystem-atmosphere model of Northern South America[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**(1): 241-273.

[7] Crow S E, Reeves M, Schubert O S, *et al*. Erratum to: optimization of method to quantify soil organic matter dynamics and carbon sequestration potential in volcanic ash soils[J]. Biogeochemistry, 2016, **127**(1): 155.

[8] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 56-60.
Zhang W J, Peng P Q, Tong C L, *et al*. Characteristics of distribution and composition of organic carbon in Dongting Lake Floodplain[J]. Environmental Science, 2005, **26**(3): 56-60.

[9] 董洪芳, 于君宝, 管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 288-292.
Dong H F, Yu J B, Guan B. Distribution characteristics of soil organic carbon and its composition in Suaeda salsa wetland in the Yellow River Delta[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 288-292.

[10] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤学报, 2014, **51**(6): 1351-1360.
Zhang W M, Wu M, Wang M, *et al*. Distribution characteristics of organic carbon and its components in soils under different types of vegetation in wetland of Hangzhou Bay[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(6): 1351-1360.

[11] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 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[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 290-297.
Hou C C, Song C C, Li Y C, *et al*. Seasonal dynamics of soil organic carbon and active organic carbon fractions in Calamagrostis angustifolia wetlands topsoil under different water conditions[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 290-297.

[12] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 水淹频率增加对闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 974-980.
Gao D Z, Zeng C S, Zhang W L, *et al*. Effects of increasing

flooded frequency on soil organic carbon and its active composition in the Min River estuarine wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 974-980.

[13] Wang J Y, Song C C, Wang X W, *et al*. Changes in labile soil organic carbon fractions in wetland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China[J]. Catena, 2012, **96**: 83-89.

[14] Xiao Y, Huang Z G, Lu X G. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 381-389.

[15] 沈德福, 李世杰, 蔡德所, 等. 桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析[J]. 高校地质学报, 2010, **16**(4): 517-526.
Shen D F, Li S J, Cai D S, *et al*. Element geochemistry of lake sediments from Sihu Lake in Guilin Karst wetland region and its environmental effect [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, **16**(4): 517-526.

[16] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 335-341.
Jin Z J, Zeng H H, Li Q, *et al*. Comparisons of microbial numbers, biomasses and soil enzyme activities between paddy field and dryland origins in Karst Cave wetland [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 335-341.

[17] 李艳琼, 黄玉清, 徐广平, 等. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤养分及微生物活性[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(1): 64-74.
Li Y Q, Huang Y Q, Xu G P, *et al*. Characteristics of soil nutrients and microbial activities of reed vegetation in the Huixian Karst wetland, Guilin, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(1): 64-74.

[18] 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 等. 垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1813-1823.
Huang K C, ShenY Y, Xu G P, *et al*. Effects of reclamation on soil nutrients and microbial activities in the Huixian Karst wetland in Guilin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1813-1823.

[19] Zhang J B, Song C C, Wang S M. Dynamics of soil organic carbon and its fractions after abandonment of cultivated wetlands in northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, **96**(1-2): 350-360.

[20] 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[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.

[21] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(5): 991-999.

[22] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(3): 777-783.

[23] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[24] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 环境因素对密云水库上游流域土壤有机碳和全氮含量影响的通径分析[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(8): 1378-1383.
Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Path analysis on environmental factors controlling soil organic carbon and total nitrogen contents in the upstream watershed of Miyun Reservoir, North China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(8): 1378-1383.

[25] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 1025-1034.
Xiang C H, Luan J W, Luo Z S, *et al*. Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(4): 1025-1034.

[26] 高俊琴, 徐兴良, 张锋, 等. 水分梯度对若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(3): 126-131.
Gao J Q, Xu X L, Zhang F, *et al*. Distribution characteristics of soil labile carbon along water table gradient of alpine wetland soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **22**(3): 126-131.

[27] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2005, **42**(5): 857-859.
Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Effect of cultivation on organic carbon composition in a histosol in the Sanjiang Plain, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(5): 857-859.

[28] 金奇, 吴琴, 钟欣孜, 等. 鄱阳湖湿地水位梯度下不同植物群落类型土壤有机碳组分特征[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(5): 1180-1187.
Jin Q, Wu Q, Zhong X Z, *et al*. Soil organic carbon and its components under different plant communities along a water table gradient in the Poyang Lake wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, **36**(5): 1180-1187.

[29] 宋红丽, 刘兴土, 王立志, 等. 不同干扰程度下黄河三角洲植被群落有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(1): 190-196, 203.
Song H L, Liu X T, Wang L Z, *et al*. Spatial and temporal distribution of soil organic carbon in vegetation communities of the Yellow River Delta under different disturbance levels[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(1): 190-196, 203.

[30] 张莹, 刘畅, 宋昂, 等. 基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J]. 中国岩溶, 2016, **35**(1): 11-18.
Zhang Y, Liu C, Song A, *et al*. Relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian Karst wetland system based on canonical correspondence analysis [J]. Carsologica Sinica, 2016, **35**(1): 11-18.

[31] Maize N, Watanabe A, Kimura M. Chemical characteristics and potential source of fulvic acids leached from the plow layer of paddy soil[J]. Geoderma, 2004, **120**(3-4): 309-323.

[32] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(1): 56-63.
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. The size and characterization of biologically active organic carbon pool in soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, **7**(1): 56-63.

[33] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 283-287.
Huo L L, Zou Y C, Guo J W, *et al*. Effect of reclamation on the vertical distribution of SOC and retention of DOC [J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 283-287.

[34] 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[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 2019-2025.
Wang G M, Zhou L X. Dynamics of dissolved organic matter in terrestrial ecosystem and its environmental impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(11): 2019-2025.

[35] Hu Y L, Zeng D H, Ma X Q, *et al*. Root rather than leaf litter input drives soil carbon sequestration after afforestation on a marginal cropland[J]. Forest Ecology and Management, 2016, **362**: 38-45.

[36] 万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 等. 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[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(2): 406-412.
Wan Z M, Song C C, Yang G S, *et al*. The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(2): 406-412.

[37] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3223-3230.
Zhao T, Jiang Y L, Yan H, *et al*. Effects of different aspects on soil microbial biomass and dissolved organic carbon of the Loess Hilly Area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3223-3230.

[38] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 等. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 240-247.
Liao H K, Li J, Long J, *et al*. Effects of land use and abandonment on soil labile organic carbon in the Karst region of Southwest China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 240-247.

[39] 吴建国, 艾丽, 田自强, 等. 祁连山中部土壤颗粒组分有机质碳含量及其与海拔和植被的关系[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2358-2365.
Wu J G, Ai L, Tian Z Q, *et al*. The soil particulate organic carbon in different elevation and its relationship with vegetation in Qilian Mountain[J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(6): 2358-2365.

[40] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学, 2002, **38**(4): 19-29.
Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, *et al*. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, **38**(4): 19-29.

[41] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 661-668.
Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, *et al*. Effects of land use change on soil active organic carbon in deep soils in hilly loess plateau region of northwest China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 661-668.

[42] 沈玉娟, 赵琦齐, 冯育青, 等. 太湖湖滨带土壤活性有机碳沿水分梯度的变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(6): 1119-1124.
Shen Y J, Zhao Q Q, Feng Y Q, *et al*. Variation characteristics of soil active organic carbon along a soil moisture gradient in a riparian zone of Taihu Lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **30**(6): 1119-1124.

[43] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1365-1371.
Tang G Y, Li K, Song Y Y, *et al*. Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley[J]. Environmental Science, 2010, **31**(5): 1365-1371.

[44] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1842-1848.
Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, *et al*. Soil microorganism characteristics and soil nutrients of different wetlands in Sanjinag plain, Northeast China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1842-1848.

[45] 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[J]. 亚热带资源与环境学报, 2011, **6**(2): 10-15.
Zeng C S, Wang W Q, Xu H H. Soil active organic carbon and its effects on anaerobic carbon decomposition in the Ebinur Lake wetlands[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011, **6**(2): 10-15.

[46] 郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系[J]. 林业科学, 2014, **50**(10): 8-15.
Guo Z H, Zhang L, Guo Y R, *et al*. Soil carbon sequestration and its relationship with soil pH in Qinglangang Mangrove wetlands in Hainan island[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(10): 8-15.

[47] Spohn M, Babka B, Giani L. Changes in soil organic matter quality during sea-influenced marsh soil development at the North Sea coast[J]. Catena, 2013, **107**: 110-117.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS