

DOI: 10.5846/stxb201212141802

杭子清, 王国祥, 刘金娥, 王刚, 王会. 互花米草盐沼土壤有机碳库组分及结构特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4175-4182.

Hang Z Q, Wang G X, Liu J E, Wang G, Wang H. Characterization of soil organic carbon fractions at *Spartina alterniflora* saltmarsh in North Jiangsu. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4175-4182.

互花米草盐沼土壤有机碳库组分及结构特征

杭子清¹, 王国祥¹, 刘金娥^{1,*}, 王刚², 王会³

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 盐城 224002;

3. 盐城国家级珍禽自然保护区, 盐城 224057)

摘要:在江苏盐城互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼建立以下样地:光滩(Mudflat)、互花米草建群 1a(*S. alterniflora* flat 2011)、5a(*S. alterniflora* flat 2007)、12a(*S. alterniflora* flat 2000)、23a(*S. alterniflora* flat 1989)以及碱蓬(*Suaeda salsa* flat 1989),采集表层土壤样品,分析土壤中的活性有机碳(可溶性有机碳、微生物量碳)特征,并利用核磁共振波谱法测定土壤总有机碳的结构图谱,研究互花米草盐沼土壤有机碳库组分及结构特征。结果表明:(1)互花米草建群后,盐沼表层土壤有机碳含量显著增加($P < 0.05$),在 0.82—7.6 g/kg 之间,各样地表层土壤有机碳含量为:互花米草滩(5.57 g/kg) > 碱蓬滩(2.4 g/kg) > 光滩(1.05 g/kg);可溶性有机碳含量为:互花米草滩(36.08 mg/kg) > 碱蓬滩(17.43 mg/kg) > 光滩(6.92 mg/kg);微生物量碳含量为:互花米草滩(52.51 mg/kg) > 碱蓬滩(18.27 mg/kg) > 光滩(13.56 mg/kg)。互花米草建群后,土壤中活性碳库含量显著增加($P < 0.05$)。(2)土壤有机碳结构以烷氧碳和芳香碳为主,其中芳香碳的平均比例(35.85%)最高,其次为烷氧碳(32.83%)和羧基碳(20.62%),烷基碳的平均比例(10.36%)最低,其中建群 5a 的互花米草样地(SAF2007)土壤芳香碳、烷氧碳、烷基碳含量最高,建群 23a 的互花米草样地(SAF1989)土壤羧基碳含量最高。(3)互花米草盐沼土壤中烷基碳/烷氧碳为:SAF2007(0.44) > SSF1989(0.43) > SAF2000(0.28) > SAF2011(0.27) > SAF1989(0.22);疏水碳/亲水碳为:SAF2007(0.97) > SSF1989(0.87) > SAF2000(0.85) > SAF2011(0.83) > SAF1989(0.81)。烷基碳/烷氧碳在建群 5a 后达到最高值 0.44,烷基化程度最高;疏水碳/亲水碳达到最高值 0.97,土壤碳库稳定性高于其它样地。

关键词:互花米草;土壤有机碳库;核磁共振;海滨湿地;有机碳结构

Characterization of soil organic carbon fractions at *Spartina alterniflora* saltmarsh in North Jiangsu

HANG Ziqing¹, WANG Guoxiang¹, LIU Jin'e^{1,*}, WANG Gang², WANG Hui³

1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 College of Urban and Resource Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China

3 Yancheng National Nature Reserve, Yancheng 224057, China

Abstract: *Spartina alterniflora* was introduced into China in 1979, and the first plantation of *S. alterniflora* was successfully constructed in Jiangsu province in 1982. Since it expanded quickly on coastal wetlands, great attentions were paid to its positive and negative effects on native ecosystems. In order to study the components and structural characteristics of soil organic carbon (SOC) pool of *S. alterniflora* saltmarsh, field observations and soil sampling work were fulfilled at permanent study sites including mudflat (MF), *S. alterniflora* salt marsh of 1-year (SAF2011), 5-year (SAF2007), 12-year (SAF2000), 23-year (SAF1989) and *Suaeda salsa* saltmarsh (SSF1989) along the coastal wetland in Yancheng, where located the largest area of *S. alterniflora* saltmarsh in China. The topsoil SOC, dissolved organic carbon (DOC) and

基金项目:国家自然科学基金(40973053, 41273082);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20123207110013)

收稿日期:2012-12-14; **网络出版日期:**2014-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujine@nynu.edu.cn

microbial biomass carbon (MBC) were analyzed, and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy was utilized to explore the structure of soil organic carbon. The results showed that: (1) the development of *S. alterniflora* promoted the soil organic carbon sedimentation. The range of SOC was between 0.82—7.60 g/kg, which occurred as the order of *S. alterniflora* saltmarsh (5.57 g/kg) > *S. salsa* saltmarsh (2.4 g/kg) > mudflat (1.05 g/kg); the DOC occurred as the order of *S. alterniflora* saltmarsh (36.08 mg/kg) > *S. salsa* saltmarsh (17.43 mg/kg) > mudflat (6.92 mg/kg); the MBC occurred as the order of *S. alterniflora* saltmarsh (52.51 mg/kg) > *S. salsa* saltmarsh (18.27 mg/kg) > mudflat (13.56 mg/kg). These indicated that the soil active organic carbon pool was enhanced by the development of *S. alterniflora*. (2) The SOC contained more alcoxyl and aromatic carbon than other carbon fractions. The average proportion of SOC fractions occurred as the order of aromatic carbons (35.85%) > the alcoxyl carbon (32.83%) > carboxyl carbon (20.62%) > alkyl carbon (11.76%). The highest value of aromatic carbons, alcoxyl carbon and alkyl carbon occurred at the 5-year *S. alterniflora* saltmarsh (SAF2007), while the highest value of carboxyl carbon occurred at the 23-year *S. alterniflora* saltmarsh (SAF1989). (3) The ratio of alkyl carbon/ alcoxyl carbon in topsoil occurred as the order of SAF2007 (0.44) > SSF1989 (0.43) > SAF2000 (0.28) > SAF2011 (0.27) > SAF1989 (0.22); the ratio of hydrophobic carbon/hydrophilic carbon occurred as SAF2007 (0.97) > SSF1989 (0.87) > SAF2000 (0.85) > SAF2011 (0.83) > SAF1989 (0.81). The highest ratio of alkyl carbon/ alcoxyl carbon (0.44) and hydrophobic carbon/hydrophilic carbon (0.97) occurred at the 5-year *S. alterniflora* saltmarsh (SAF2007), indicating the highest degree of alkylation and stability of SOC pool.

Key Words: *Spartina alterniflora*; soil organic carbon pool; NMR; coastal wetland; structure of organic carbon

湿地土壤有机碳(SOC)是全球陆地最大的碳库之一,其碳含量是大气中CO₂碳含量的2—3倍^[1-2],兼有“碳源”与“碳汇”的双重功能,其碳循环对大气全球碳收支以及与之有关的全球气候变化有重要影响。盐城海滨湿地是我国面积最大、生态类型最齐全、冲淤演变最复杂的典型淤泥质海滨湿地^[3]。自1982年引种互花米草以来,迅速海向扩张,形成大面积的盐沼,和本地种碱蓬产生了种间竞争,未来有可能取代碱蓬^[4],植物种类的更替改变了生态系统结构和物质转化过程,影响土壤有机碳库的大小和结构^[5]。互花米草具有较长的生长季、较高的净光合作用速率以及较大的生物量,固碳作用非常显著^[6],相关研究结果亦表明互花米草的生长导致土壤有机碳含量显著增加^[7-8],随着入侵时间的增长,互花米草来源有机碳的输入显著改变了土壤有机碳组分,提高了土壤碳汇能力^[9],然而有关互花米草对土壤碳库中不同组分结构有机碳影响的研究鲜见报道。由于盐城海滨湿地滩面沉积环境以及互花米草建群时间存在差异,土壤中有有机碳在化学组成、降解难易程度以及转化速率等方面也会有所不同^[10-12]。目前分析有机碳组成结构的方法有很多种,红外光谱法可以根据红外吸收曲线的峰位、峰强及峰形来判断化合物的结构组成^[13],荧光光谱法则依据胶团中各

种荧光团的综合表现推测出腐殖质中可能存在的官能团^[14],电子自旋共振谱法可以通过谱图的不同线形和峰宽反映其内部结构^[14],其中核磁共振技术(NMR)是一种非破坏性的分析方法,在研究土壤有机碳库的化学组成结构上优势明显^[15]。因此,本研究以江苏盐城海滨湿地作为研究区域,借助核磁共振技术判别土壤中有有机碳库组成和结构,分析互花米草在入侵过程中对土壤的生物地球化学循环过程的作用,以期科学评价互花米草对有机碳库的影响提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏盐城新洋港潮滩湿地(32°34′—34°28′N, 119°48′—120°56′E),该区受海洋性与大陆性气候的共同影响,属于典型季风气候区,年平均气温13.7—14.6℃,日光辐射总量为485—506 kJ/cm²,年降水量为980—1070 mm。研究范围内人类干扰较少,植被带分布明显,由海向陆依次分布有:光滩、互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼、碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼以及芦苇(*Phragmites australis*)盐沼。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与采样方法

新洋港潮滩湿地的互花米草引种于 1989 年,此地建有永久性标志。本研究组使用手持 GPS/GIS 数据采集器对盐城海滨湿地互花米草扩张动态进行多年野外定位调查,并从 2003 年起,在互花米草扩张边缘建立永久性标志,记录互花米草种群定居时间和扩张过程。2011 年 6 月,在研究区内自海向陆选择一个剖面,根据已建立的永久性标志确定互花米草种群定居时间,按照互花米草的不同定居时间设置 6 个样地,光滩 (Mudflat)、建群 1a 互花米草盐沼

(*S. alterniflora* flat 2011)、5a 互花米草盐沼 (*S. alterniflora* flat 2007)、12a 互花米草盐沼 (*S. alterniflora* flat 2000)、23a 互花米草盐沼 (*S. alterniflora* flat 1989) 以及碱蓬盐沼 (*S. salsa* flat 1989),每处设 3 个 1 m×1 m 的样方,采集表层 0—20 cm 的土壤样品,将所采集的 3 份土壤混合,作为该样地的土壤样品,分别用 MF、SAF2011、SAF2007、SAF2000、SAF1989、SSF1989 表示 (图 1),装入标有编号的塑料自封袋中,带回实验室后过 2 mm 筛分成 2 份土样,一份鲜土在 4 °C 下冷藏,另一份自然风干处理后待测。

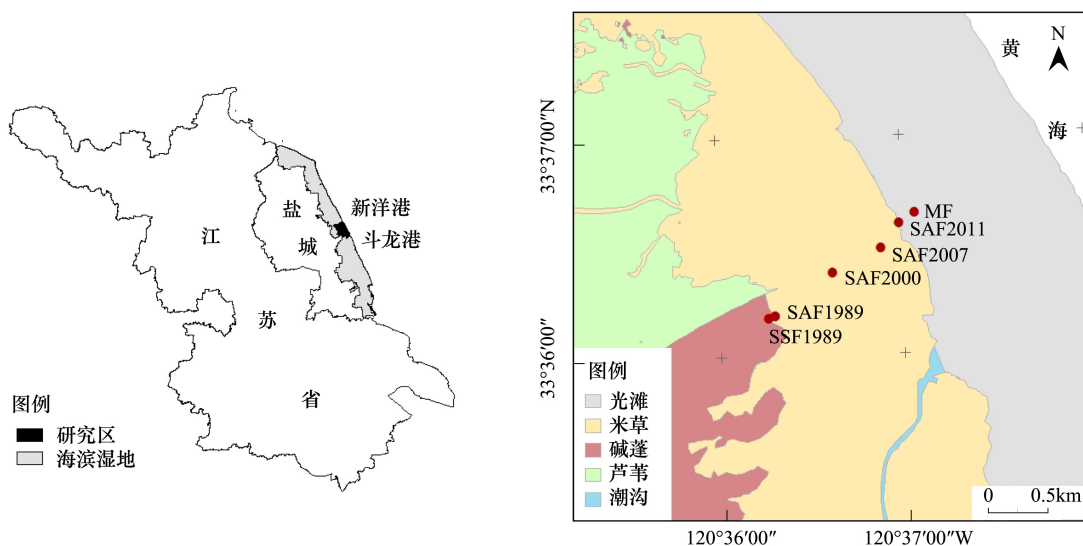


图 1 研究区域位置及采样点分布

Fig.1 Location of study area and sampling sites

1.2.2 样品处理与指标测定

(1) 可溶性有机碳 (DOC) 的测定^[16] 称取 20 g 鲜土置于盛有 100 mL 蒸馏水的三角瓶中,做 3 个重复,按照水土比 2:1 在恒温摇床振荡浸提 30 min (25 °C, 100 r/min) 后离心 10 min (5500 r/min), 将上清液过 0.45 μm 滤膜后直接上机 (TOC-L_{CSH}, 岛津公司) 测定浸提液中的有机碳含量。

(2) 微生物量碳 (MBC) 的测定^[17] 采用氯仿熏蒸提取法提取土壤微生物量碳,称取 20 g 鲜土两份,一份置于 100 mL 离心管中,另一份置于 100 mL 烧杯中,做 3 个重复,熏蒸和未熏蒸的土壤样品分别用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 浸提 30 min, TOC 仪 (TOC-L_{CSH}, 岛津公司) 测定浸提液中的有机碳含量。最后用以下公式计算 MBC:

$$\text{MBC} = (E_1 - E_2) / 0.45 \quad (1)$$

式中, E_1 和 E_2 分别为熏蒸和未熏蒸土样提取液中的有机碳含量, 0.45 为浸提系数。

土壤有机碳 (SOC) 直接采用有机碳分析仪 (TOC-L_{CSH}, 岛津公司) 进行测定。

可溶性有机碳、微生物量碳以及土壤有机碳的实际测定过程中每个土样均做 3 个重复,控制相对标准偏差 ≤ 10%。

核磁共振样品预处理与波谱分析: 为了提高固体核磁共振测定的精确度,土壤样品在进行核磁共振分析前先用氢氟酸 (HF) 进行预处理,预处理方法如下^[18]: 称量 8 g 土壤样品于 100 mL 塑料离心管中,加 50 mL HF (体积分数 10%) 溶液,摇床上振荡 1 h (25 °C, 100 r/min),离心机上 3000 r/min 离心 10 min,弃去上清液,残余物继续用 HF 溶液处理。共重复处理 8 次,摇床时间依次是:第 1—4 次 1 h,第 5—

7次12 h,最后1次24 h。处理过后的残余物用蒸馏水清洗后以除去其中的 HF 溶液,方法如下:加 50 mL 蒸馏水,振荡 10 min,离心 10 min(3000 r/min),去掉上清液,整个过程重复 4 次。残余物在 40 ℃ 的烘箱中烘干,过 60 目筛后置于密实袋中,备 NMR 上机测定。

处理后的样品用固体核磁共振仪(AVANCE III 400MHz,布鲁克公司)进行测定,采用交叉极化魔角自旋(CPMAS)技术,测定参数分别是:光谱频率为 100.63 MHz,魔角自旋频率为 5 kHz,接触时间为 2 ms,迟滞时间为 0.5 s,采样时间为 0.01 s,扫描次数为 140000 次,各类型碳相对含量用该区间化学位移积分面积的百分数表示,由机器自动给出。

1.3 数据统计分析

试验数据的计算与分析工作在 Excel 2003、Origin 8.0 上进行,使用统计软件 SPSS17.0 单因素方差分析法对数据进行显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 互花米草盐沼土壤有机碳库组分分析

土壤可溶性有机碳(DOC)是指能溶解于水,并且能通过 0.45 μ m 滤膜的含碳有机物,它们极易被土壤微生物所分解,是土壤微生物直接利用的土壤碳源^[19]。各样地表层土壤可溶性有机碳含量(图 2)表现为 SAF2007 > SAF1989 > SAF2000 > SSF1989 > SAF2011 > MF,平均值分别为 50.67、46.22、39.12、17.43、8.31、6.92 mg/kg。相关性分析表明,土壤可溶性有机碳与土壤有机碳极显著相关($P < 0.01$)(图 3),这说明土壤有机碳很有可能决定了土壤中可溶性有机碳的含量。各样地(MF、SAF2011、SAF2007、SAF2000、SAF1989)的 DOC/SOC 比值分别为 0.66%、1.01%、0.67%、0.62%、0.61%,互花米草建群该比值没有明显变化。

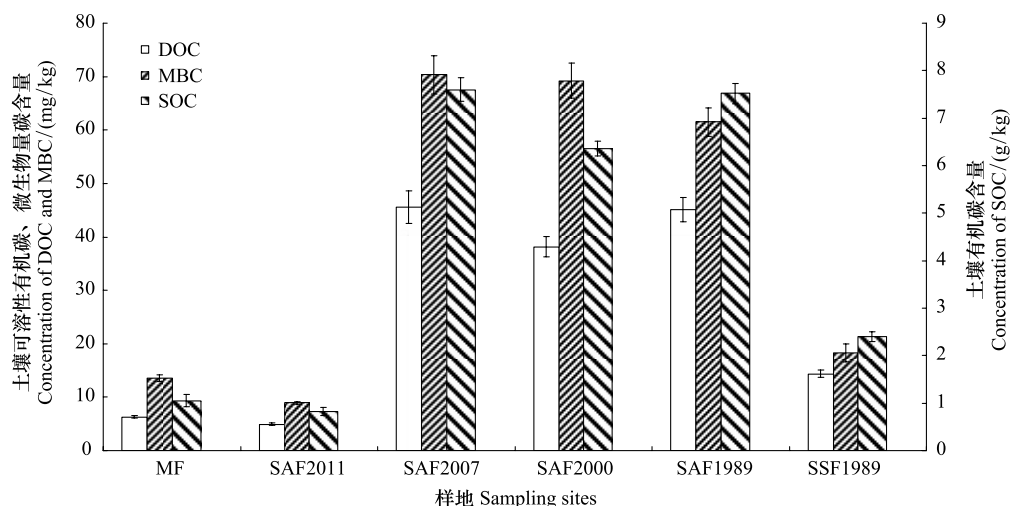


图2 土壤 DOC、MBC 及 SOC 含量
Fig.2 Concentration of DOC、MBC and SOC

土壤微生物量碳(MBC)是土壤有机碳库中活性很强的一部分,尽管占总有机碳的比例很小,但常被作为评价土壤有机碳库周转速率的指标之一^[20]。各样地表层土壤微生物量碳含量(图 2)表现为 SAF2007 > SAF1989 > SAF2000 > SSF1989 > SAF2011 > MF,平均值为 70.34、69.24、61.55、18.27、13.56、8.92 mg/kg。相关性分析表明,土壤微生物量碳与土壤有机碳极显著相关($P < 0.01$)(图 3)。

由互花米草盐沼土壤有机碳的含量(图 2)变化可知,在建群初期,随着互花米草建群时间的增加,

土壤有机碳含量显著增加($P < 0.01$),在 SAF2007 处达到最大,对照样点 MF 仅为 13.8%。但是随着互花米草盐沼进一步的扩张发育,滩面高程增加,盐沼内水分盐度等环境条件变化梯度更加显著,影响土壤有机碳积累和分解过程,土壤有机碳含量有波动。互花米草盐沼各样点含量为 0.82—7.60 g/kg,平均值为 4.29 g/kg,总体高于碱蓬盐沼和光滩。不同植被类型表层土壤有机碳含量表现为:互花米草盐沼(5.57 g/kg) > 碱蓬盐沼(2.40 g/kg) > 光滩(1.05 g/kg)。

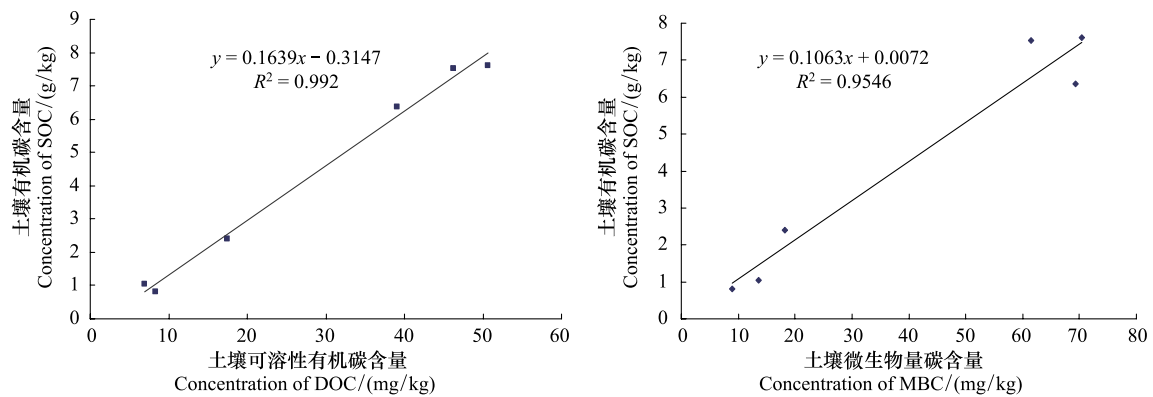


图3 土壤 DOC、MBC 与 SOC 的关系

Fig.3 The relationship among DOC、MBC and SOC

2.2 土壤有机碳组成结构特征分析

土壤有机碳固态 NMR 碳谱主要可划分为以下 4 个共振区域^[17], 烷基碳 (Alkyl C) 区, 0—45 $\mu\text{mol/mol}$; 烷氧碳区 (Alcoyl C) 区, 45—110 $\mu\text{mol/mol}$; 芳香碳 (Aromatic C) 区, 110—160 $\mu\text{mol/mol}$; 羧基碳 (Carboxyl C) 区, 160—200 $\mu\text{mol/mol}$ 。根据已有的研究报道^[10,17,19-20], 烷基碳区内, 可以在 $\delta 21-22$ 、 $25-26$ 、 31 、 33 和 $43-44\mu\text{mol/mol}$ 等处观察到吸收峰, 其中 $\delta 30$ 处的吸收峰最为明显; 烷氧碳区内, $\delta 50-60$ 处的吸收峰为甲氧基碳, $\delta 60-110$ 处的吸收峰为碳水化合物碳; 芳香碳区内, $\delta 110-145$ 处的吸收峰是芳香碳, $\delta 145-160$ 处的吸收峰为被 O 取代的酚基碳; 羧基碳区内, $\delta 172-174$ 处的吸收峰为羧基、酰胺和脂碳。

互花米草盐沼土壤中的有机碳形态以烷氧碳和芳香碳为主(图 4), 芳香碳的平均比例 (35.85%) 最高, 其次为烷氧碳 (32.83%) 和羧基碳 (20.62%), 烷基碳的平均比例 (10.36%) 最低。互花米草建群初期, 土壤有机碳中烷基碳有增加趋势, 在 SAF2007 处出现最大值 (11.84%) 后逐渐下降, 低于碱蓬盐沼 (SSF1989 处) 土壤烷基碳含量 (12.2%)。烷氧碳与烷基碳的变化趋势相反, 在 SAF2007 处出现最小值 27.2% 后逐渐增加至 SAF1989 处的 37.73%。有机碳中芳香碳含量变化不大, 碱蓬盐沼 (SSF1989 处) 的芳香碳含量低于互花米草盐沼; 羧基碳与烷基碳的变化趋势一致, 在 SAF2007 处出现最大值 (23.45%), 普遍低于碱蓬盐沼 (SSF1989 处) 土壤的羧基碳含量 (25.13%)。

脂肪族碳 (烷基碳+烷氧碳) 与芳香碳比值表现

为 SAF2000 (1.29) > SAF1989 (1.27) > SAF2011 (1.24) > SSF1989 (1.19) > SAF2007 (1.04), 该比值在互花米草建群 12a (SAF2000 处) 达到最大值 1.29 后下降, 高于碱蓬盐沼 (SSF1989 处); 烷基碳与烷氧碳的比值在 SAF2007 处达到最大值, 和碱蓬盐沼 (SSF1989 处) 相近。

烷基碳与烷氧碳的比值表现为 SAF2007 (0.44) > SSF1989 (0.43) > SAF2000 (0.28) > SAF2011 (0.27) > SAF1989 (0.22), 呈先上升后下降的趋势, 其中 SAF2007 样地比值最高。

烷基碳+芳香基碳为疏水碳, 烷氧碳+羧基碳为亲水碳。各样地疏水碳含量/亲水碳含量表现为: SAF2007 (0.97) > SSF1989 (0.87) > SAF2000 (0.85) > SAF2011 (0.83) > SAF1989 (0.81)。

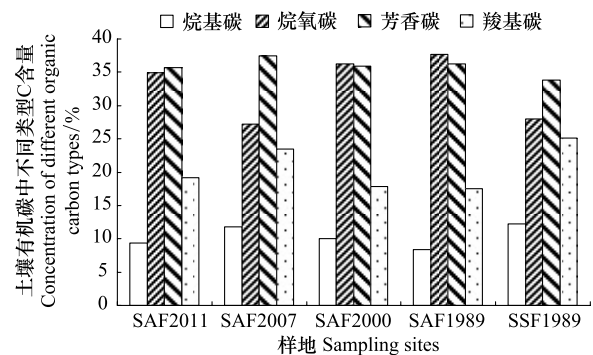


图4 土壤有机碳中不同类型 C 含量分布

Fig.4 Concentration of different organic carbon types

3 讨论

3.1 互花米草对土壤有机碳库组分的影响

有机碳是土壤的重要组成部分, 其含量大小可

以反映土壤肥力及初级生产力^[21]。相关研究表明互花米草海向扩张提高了 SOC 含量,这是海源输入、植物输入以及潮沟、洼地、水分等因素共同作用于分解过程的结果,随着建群时间的增长,有机碳库周转率降低,生物可利用性减小, SOC 质量提高^[7,11,22]。王刚等^[9]研究表明,入侵 12 a 的互花米草样地表土年均碳汇积累速率为 1.8 t/hm²,如此多的有机物输入到土壤中是土壤有机碳增加的主要原因。本研究中,在互花米草定居盐城海滨湿地 1—23a 后,表层土壤的有机碳含量与光滩相比显著增加 ($P<0.05$),这说明互花米草入侵盐城海滨湿地促进了土壤碳汇。

土壤可溶性有机碳 (DOC) 和微生物量碳 (MBC) 是用来表征土壤活性碳库的重要指标,尽管它们只在土壤碳库中占很小的部分,却在土壤物质转化和养分循环中发挥着重要作用^[4]。土壤可溶性有机碳 (DOC) 主要来源于光合产物、表层有机质的淋溶或分解和土壤有机质的微生物过程。植被变化首先改变了土壤的植被条件、理化性质等,从而影响土壤微生物活性的变化,引起土壤各组分一系列的连锁变化^[18]。江苏大丰王港口湿地互花米草滩可溶性有机碳的含量介于 20.3—27.2 mg/kg 之间^[7], DOC 与 SOC 呈显著正相关 ($P<0.05$),本研究也表明,DOC 有与 SOC 相同的变化趋势,究其原因可能有:1) 互花米草样地凋落物和根系分泌物较多,有机碳含量较大,淋溶作用以及分解形成的 DOC 含量也较多;2) 互花米草样地 DOC 中的富啡酸和酚类物质较多,可以抑制土壤微生物的活动^[18],使得微生物可利用的 DOC 减少,土壤中的 DOC 含量增加。

和其他自然湿地生态系统相比较而言,盐沼湿地土壤的微生物量碳 (MBC) 含量相对较小,虽然互花米草的生长可以促进土壤微生物量碳增加,但是与淡水湿地土壤微生物量碳相比仍要小一个数量级^[23],如三江平原湿地的土壤 MBC 含量分别达到 2035.5、1729.8、1035.2 mg/kg^[23],与本研究的测定结果差异很大,这可能主要是与海滨潮滩湿地的特殊生境有关。相关研究表明^[24],互花米草在滨海潮间带的大面积生长,为土壤微生物提供了不同的碳源,改变了土壤微生物功能群。江苏海滨湿地土壤含盐量达到 1.17%,大大抑制了非耐盐微生物的生长与繁殖,且营养元素的普遍缺乏是限制潮间带湿地植

被生长的一个重要因素。因此,互花米草在潮滩湿地扩张生长,为该处土壤微生物提供了种类不同的碳源,改变了土壤微生物群落生理功能结构,对海滨湿地生态系统的碳循环具有重要意义。本研究中,各样地 MBC 含量介于 8.92—70.34 mg/kg 之间,显著高于 DOC 含量 ($P<0.05$),且两者增加趋势相同, MBC 增加的原因在于互花米草适应能力强,拥有发达的根系,而地下根系是微生物活动的能源机制,改变了土壤理化性质以及根系分泌物,从而可以影响微生物的数量和活性^[10]。

3.2 互花米草对土壤有机碳库组成结构特征的影响

土壤有机碳是由具有不同保留时间的组分形成的复杂系统^[25],研究表明,土壤有机碳主要是由可识别的生物分子组成,其中 71%—79% 是以碳水化合物、氨基化合物、脂类、酚类的结构形式存在的^[26]。脂肪族碳/芳香碳的比值可以用来表示物质分子结构的复杂程度,该比值越高反应物质中芳香结构越少、脂肪族侧链越多、缩合程度越低、分子结构越简单。本研究中 SAF2007 样地比值最低,为 1.04,SAF2011、SAF2000、SAF1989 这 3 个样地比值分别为 1.24、1.29、1.27,4 个样地差异并不显著 ($P>0.05$),这说明互花米草随着定居时间的增长,有机碳组分的分子结构变化有限。

Mathers 等^[27]研究表明,土壤有机碳中烷基碳所占的比例最大;商素云等^[28]报道,天然灌木林改造成板栗林后土壤有机碳中的烷氧碳和羰基碳比例显著下降,而烷基碳和芳香碳比例显著增加。从本试验结果来看,互花米草盐沼土壤中的有机碳以芳香碳 (35.85%) 和烷氧碳 (32.83%) 为主,互花米草建群 5a 后,土壤中烷基碳含量达到 11.84,而烷氧碳含量在建群 23a 后达到 37.73,不同研究中各种不同形态的有机碳所占比例差别较大,这与植物种类、土壤类型以及水文气候等因素有关。

烷基碳/烷氧碳比值反应了物质烷基化程度的高低。一般认为,烷基碳来自于微生物代谢产物和木栓质、角质等植物生物聚合物^[29-30],难以降解,较为稳定。烷氧碳则相对易于分解,因此烷基碳/烷氧碳的比值可以反映土壤有机碳库稳定性。由结果可知 SAF2007 样地最高,这表明互花米草入侵 5a 后,土壤烷基化程度增加,难分解有机碳的比例增多,其原因可能在于互花米草入侵样地后,凋落物残体以

及互花米草自身的固碳作用使得大量的有机碳进入土壤,提高了土壤微生物对土壤中活性有机碳的利用程度,对土壤中烷氧碳的利用程度增加,使烷基碳相对富集,导致烷基碳/烷氧碳比值增加,从而有助于提高土壤有机碳的稳定性。SSF1989 样点比值达到 0.43,高于 SAF1989 样点的 0.22,这说明碱蓬盐沼土壤有机碳稳定程度高于附近的互花米草盐沼。

另外有研究表明,疏水碳和亲水碳的比值能够反映土壤有机碳和团聚体结合的稳定性。本研究中两者比值在 0.81—0.97 之间,且在 SAF2007 样点出现最大值 0.97,这说明该样点有机碳稳定性较高,也与上述分析一致。

4 结论

(1)互花米草建群后,盐沼表层土壤有机碳、活性碳库含量显著增加($P < 0.05$),各样地表层土壤有机碳、可溶性有机碳以及微生物量碳含量均表现为互花米草滩>碱蓬滩>光滩。

(2)互花米草土壤有机碳结构以烷氧碳和芳香碳为主,其中芳香碳的平均比例最高,烷基碳的平均比例最低;建群 5a 的互花米草样地土壤芳香碳、烷氧碳、烷基碳含量最高,建群 23a 的互花米草样地土壤羧基碳含量最高。

(3)在建群 5a 后,互花米草盐沼土壤中烷基碳/烷氧碳和疏水碳/亲水碳均达到最高值;土壤有机碳烷基化程度和土壤碳库稳定性高于其它样地。

References:

- [1] Jenkinson D S. Soil organic matter and its dynamics// Wild A, ed. Russell's Soil Conditions and Plant Growth. 11th ed. New York: Longman, 1988, 564-607.
- [2] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, DeAngelis D L. The global carbon cycle. American Scientist, 1990, 78: 310-326.
- [3] Wang Y, Zhang Z K, Zhu D K, Yang J H, Mao L J, Li S H. River-sea interaction and the north Jiangsu plain formation. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 301-320.
- [4] Chen Z Y, Wang G X, Liu J E, Xuan Y, Xu W W, Qiu L, Wang G. Relative competitive ability of *Spartina alterniflora* patches to native species in tidal zone ecotone of north Jiangsu. Ecology and Environment, 2011, 20(10): 1436-1442.
- [5] Zhang Y H, Zhang F C, Zhou X D, Xie X J, Wang X W, Li Q, Lei J. Effects of plant invasion along a *Spartina alterniflora* chronosequence on organic carbon dynamics in coastal wetland in north Jiangsu. China Environmental Science, 2011, 31(2): 271-276.
- [6] Qin P, Li S Y. Positive and negative effects of the non-native plant, *Spartina alterniflora* and its ecological control. Journal of Biosafety, 2012, 21(3): 167-176.
- [7] Ren L J, Wang G X, He D, Mao Z G, Liu J E. Spatial distributions of soil organic matter in different vegetation zones of the Yancheng tidal flat. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 54-62.
- [8] Zhang Y H, Wang Y L, Li R Y, Zhu H X, Zhang F C, Huang B B, Peng X D. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on active soil organic carbon in the coastal marshes. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 102-106.
- [9] Wang G, Wang G X, Yang W B, Liu J E, Hang Z Q. The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution. Acta Ecologica Sinica, 2013.
- [10] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(1): 282-291.
- [11] Huang Z Q, Xu Z H, Chen C R, Boyd S. Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia. Forest Ecology and Management, 2008, 254(1): 46-55.
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [13] Schnitzer M, Schuppli P. Method for the sequential extraction of organic matter from soils and soil fractions. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(5): 1418-1424.
- [14] Senesi N. Molecular and quantitative aspects of the chemistry of fulvic acid and its interactions with metal ions and organic chemicals; Part II. The fluorescence spectroscopy approach. Analytica Chimica Acta, 1990, 232: 77-106.
- [15] Chen M J, Wang M K, Chia C Y. Determination of low molecular weight dicarboxylic acids and organic functional groups in *Tsuga* and *Yushania* rhizosphere and bulk soils in the Saddle of Ta-Ta-Chia. Soil and Environment, 1999, 2(2): 159-170.
- [16] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.
- [17] Mathers N J, Xu Z H, Berners-Price S J, Senake Perera M C, Saffigna P G. Hydrofluoric acid pre-treatment for improving ¹³C CPMAS NMR spectral quality of forest soils in south-east Queensland, Australia. Australian Journal of Soil Research, 2002, 40(4): 665-674.
- [18] Ros G H, Tschudy C, Chardon W J, Temminghoff E J M, van der Salm C, Koopmans G F. Speciation of water-extractable organic nutrients in grassland soils. Soil Science, 2010, 175(1): 271-276.

- 15-26.
- [19] Xue J F, Gao Y M, Wang J K, Fu S F, Zhu F C. Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 247-250.
- [20] Jiang P K, Xu Q F, Xu Z H, Cao Z H. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(1): 30-36.
- [21] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, Zentner R P. Labile soil organic-matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [22] Mao Z G, Wang G X, Liu J E, Ren L J. Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 293-297.
- [23] Wan Z M, Song C C, Yang G S, Huang J Y, Wang L L, Li Y C. The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the San jiang Plain. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 406-412.
- [24] Zhou J, Xiao W, Qin P. Effect of an alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microbial biomass and functional groups in salt marshes. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2007, 43(5): 494-500.
- [25] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(4): 449-458.
- [26] Martens D A, Reedy T E, Lewis D T. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 65-78.
- [27] Mathers N J, Xu Z H. Solid-state¹³ C NMR Spectroscopy characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia. *Geoderma*, 2003, 114(1/2): 19-31.
- [28] Shang S Y, Li Y F, Jiang P K, Zhou G M, Liu J, Wu J S, Lin L. Effects of the conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 659-665.
- [29] Dou S, Zhang J J, Li K. Effect of organic matter applications on¹³ C-NMR spectra of humic acids of soil. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(3): 532-539.
- [30] Ussiri D A N, Johnson C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by¹³ C NMR Spectroscopy and chemical methods. *Geoderma*, 2003(1/2), 111: 123-149.

参考文献:

- [3] 王颖, 张振克, 朱大奎, 杨競红, 毛龙江, 李书恒. 河海交互作用与苏北平原成因. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 301-320.
- [4] 陈正勇, 王国祥, 刘金娥, 宣勇, 徐伟伟, 仇乐, 王刚. 苏北潮滩群落交错带互花米草斑块与土著种竞争关系研究. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1436-1442.
- [5] 张耀鸿, 张富存, 周晓冬, 谢晓金, 王小巍, 李强, 雷俊. 互花米草对苏北滨海湿地表土有机碳更新的影响. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 271-276.
- [6] 钦佩, 李思宇. 互花米草的两面性及其生态控制. *生物安全学报*, 2012, 21(3): 167-176.
- [7] 任丽娟, 王国祥, 何聘, 毛志刚, 刘金娥. 盐城潮滩湿地不同植被带土壤有机质空间分布特征. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 54-62.
- [8] 张耀鸿, 王艳玲, 李仁英, 朱红霞, 张富存, 黄宾宾, 彭晓丹. 互花米草入侵对潮滩土壤活性有机碳组分的影响. *土壤通报*, 2012, 43(1): 102-106.
- [9] 王刚, 王国祥, 杨文斌, 刘金娥, 杭子清. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布影响. *生态学报*, 2013, 33(8): 2474-2783.
- [15] 陈孟君, 王明光, 邱志郁. 塔塔加鞍部铁杉林及玉山箭竹之根圈与本体土壤低分子量有机酸含量和有机碳官能基之测定. *土壤与环境*, 1999, 2(2): 159-170.
- [22] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 任丽娟. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 293-297.
- [23] 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.
- [24] 周军, 肖炜, 钦佩. 互花米草入侵对盐沼土壤微生物生物量和功能群的影响. *南京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(5): 494-500.
- [28] 商素云, 李永夫, 姜培坤, 周国模, 刘娟, 吴家森, 林琳. 天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 659-665.