

# 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

侯翠翠<sup>1,2</sup>, 宋长春<sup>1\*</sup>, 李英臣<sup>1,2</sup>, 郭跃东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**通过野外试验与室内分析,考察了三江平原生长季内不同水分条件小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)湿地表层 0~20 cm 土壤有机碳(SOC)、轻组有机碳(LFOC)与微生物生物量碳(MBC)的季节变化动态。结果表明,不同水分条件小叶章湿地表土 SOC 及各组分含量季节变化明显。季节性积水条件对表土活性有机碳组分驱动机制更为显著;冻融过程降低了小叶章沼泽化草甸土壤 SOC 和活性有机碳组分含量,其中 SOC、LFOC、MBC 含量分别降低了 74.53%、80.93%、83.09%,并导致土壤重组与轻组有机质含碳量显著下降。生长季内小叶章沼泽化草甸土壤 LFOC 比例(13.58%)高于小叶章湿草甸(11.96%),但 MBC 平均含量低于后者,分别为 1 397.21 mg·kg<sup>-1</sup>、1 603.65 mg·kg<sup>-1</sup>,表明淹水条件限制了微生物对有机质分解,并增加了轻组有机质的积累。湿地表层土壤微生物对环境具有一定适应机制,生长季中期小叶章沼泽化草甸表土 MBC 明显增加,由 337.56 mg·kg<sup>-1</sup> 上升为 1 829.21 mg·kg<sup>-1</sup>,微生物熵上升了 1.51 倍,表明微生物对有机质利用增强。研究结果还表明,小叶章湿地表土 LFOC 含量与 SOC 含量呈显著正相关关系( $r=0.816$ ),其中季节性积水小叶章湿地表土 LFOC 与 MBC 具有显著正相关关系( $r=0.95$ ),说明 LFOC 与土壤碳蓄积关系密切,并且淹水条件下可利用性碳源对微生物活性的制约性较大。

**关键词:**湿地;水分条件;轻组有机碳;微生物量碳;微生物熵

中图分类号:X142 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)01-0290-08

## Seasonal Dynamics of Soil Organic Carbon and Active Organic Carbon Fractions in *Calamagrostis angustifolia* Wetlands Topsoil Under Different Water Conditions

HOU Cui-cui<sup>1,2</sup>, SONG Chang-chun<sup>1</sup>, LI Ying-chen<sup>1,2</sup>, GUO Yue-dong<sup>1</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The experiment was carried in Sanjiang Plain in the northeast of China during the growing season in 2009. Soil organic carbon (SOC), as well as the soil active organic carbon fractions in the 0–20 cm soil layer of *Calamagrostis angustifolia* wetland under different water conditions were on monthly observation. Based on the research and indoor analysis, the seasonal dynamics of light fractions of soil organic carbon (LFOC) and microbial biomass carbon (MBC) were analyzed. The results indicated that the SOC contents had significantly seasonal dynamics, and the hydrological circle had apparently driving effect on LFOC and MBC during the growing season, especially under the seasonal flooded condition. The freeze-thaw process reduced the SOC, LFOC, MBC contents, with the decreases of 74.53%, 80.93%, 83.09%, while both carbon contents of light and heavy fractions were reduced at the same time. The result also showed that the seasonal flooding condition increased the proportion of LFOC in topsoil, which was larger in marsh meadow (13.58%) than in wet meadow (11.96%), whilst the MBC in marsh meadow (1 397.21 mg·kg<sup>-1</sup>) was less than the latter (1 603.65 mg·kg<sup>-1</sup>), proving that the inundated environment inhibited the mineralization and decomposition of organic matter. But the microbial activity could be adaptive to the flooding condition. During the growing season the MBC soared to 1 829.21 mg·kg<sup>-1</sup> from 337.56 mg·kg<sup>-1</sup> in July, and the microbial quotient was 1.51 times higher than that in June, indicating the high microbial efficacy of soil organic matter. Meanwhile, there was a significant correlation between the contents of LFOC and SOC ( $r=0.816$ ), suggesting that higher LFOC content was favorable to the soil carbon accumulation. Moreover, in the seasonal flooded *Calamagrostis angustifolia* wetland the soil LFOC content was significantly correlated with MBC ( $r=0.95$ ), implying that the available carbon source had more severe restriction on the microbial activity under the flooding environment.

**Key words:** wetland; water condition; light fraction organic carbon (LFOC); microbial biomass carbon (MBC); microbial quotient

湿地是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,由于湿地特殊的水文条件促使其土壤中有有机质大量积累。湿地土壤有机碳储量受到水分条件变化、地表植被组成、温度变化等环境因素的综合影响。水文条件是湿地重要的生态属性,水分条件变化如土

收稿日期:2010-01-27;修订日期:2010-03-17

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB421103);国家自然科学基金重点项目(40930527,40771189);中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-JC301)

作者简介:侯翠翠(1986~),女,博士研究生,主要研究方向为湿地碳循环,E-mail:houcuicui0902@126.com

\* 通讯联系人,E-mail:songcc@neigae.ac.cn

壤含水量、水位波动等都会影响湿地大气-植被-土壤之间碳的生物地球化学过程各环节的方向与强度<sup>[1]</sup>。因此探讨水分条件变化下湿地土壤碳循环动态变化,成为当今研究的热点。

土壤活性有机碳是指在一定的时空条件下受植物、微生物影响强烈,在土壤中不稳定,易矿化分解,并且其形态和空间位置对植物和微生物有较高活性的那部分土壤碳素<sup>[2]</sup>,与土壤有机碳含量相比,其对于表征土壤中有机碳的时空动态更具有敏感性。轻组有机碳(LFOC)是土壤中重要的活性有机碳组分<sup>[3]</sup>,其含量组成主要取决于有机物的输入和分解过程,与重组相比具有较高的分解速率,但有关研究多集中于土地管理方式改变对土壤有机碳含量和组成的影响<sup>[4,5]</sup>。土壤微生物量碳(MBC)是土壤有机质中最活跃和最易变化的部分<sup>[6]</sup>,同时也是土壤中易于利用的养分库及有机物分解的动力<sup>[3]</sup>,研究MBC对于了解土壤养分转化过程以及了解土壤中微生物动态具有重要意义。土地利用及水分条件变化会对土壤中团聚体结构与稳定性产生影响,从而作用于土壤有机碳(SOC)分解与积累平衡,土壤活性有机碳组分作为重要的敏感性指标,其时空变化动态与SOC变化具有较强的相关关系<sup>[7,8]</sup>,而在湿地土壤碳循环研究中,关于活性碳组分动态变化与水分条件的相互关系却鲜有报道。本研究选取土壤LFOC与MBC作为有机碳季节动态指标,分析了不同小叶章湿地表层土壤SOC及活性有机碳组分的季节动态,以期揭示湿地水文周期对湿地土壤生物地球化学过程的影响机制提供理论依据。

## 1 研究地点与实验方法

### 1.1 研究区域概况

本研究地点位于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(47°35'N,133°29'E)以东野外试验场内。试验站所处地区属于温带大陆性季风气候,本区海拔50~60 m<sup>[9]</sup>,总坡降万分之一左右。年降水量500~700 mm,年气温较低,空气湿度大。试验区内地貌主要为三江平原沼泽发育最为普遍的碟形洼地,主要植被由洼地边缘向中心分布有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)、毛果苔草(*Carex lasiocapa*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)等。

试验样地为以小叶章为主要建群种的湿地类型,由于水分条件差异小叶章湿地发育为小叶章湿草甸湿地(XW)和小叶章沼泽化草甸湿地(XM)。

小叶章湿草甸全年无积水,生长季地表过湿,含水量在95%以上,小叶章总盖度为80%左右,主要伴生种有千屈菜(*Lythrum salicaria*)、毛水苏(*Stachys baicalensis*)等;小叶章沼泽化草甸季节性积水,生长季内积水水位在0~15 cm之间波动,小叶章优势度降低,伴生有乌拉苔草、驴蹄草(*Caltha palustris*)、球尾花(*Lysimachia thyrsiflora*)等。

### 1.2 样品采集与测定方法

分别于2009年5~9月每月25日采集表层0~20 cm深度土壤,取土时小叶章湿草甸去除地表枯落物,沼泽化草甸去除明显草根层,每次采样设定3个重复。样品采集好后马上带回实验室充分混合,一部分鲜土过2 mm筛,于4℃保存待测;另一部分风干以测定土壤SOC与LFOC。

土壤LFOC测定采用密度分离法,称取3.00~5.00 g风干土,按1:5比例放入密度为1.70 g·cm<sup>-3</sup>的NaI重液<sup>[10]</sup>,手摇振荡5 min,超声波分离10 min,然后再4 200 r·min<sup>-1</sup>下离心10 min,收集上层悬浮物,重复加入重液,分离、离心,共收集3次。将所得样品过0.45 μm滤膜真空抽滤,然后用100 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup>的CaCl<sub>2</sub>溶液洗涤,再用200 mL蒸馏水反复冲洗至无Cl<sup>-</sup>反应(AgNO<sub>3</sub>检验)。收集滤膜上样品至烧杯中50℃烘干测定有机碳含量。剩余部分为重组,用100 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液洗涤,再用200 mL蒸馏水反复冲洗,收集重组。测定样品重量回收率,所得回收率均在95%以上。

土壤MBC测定采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法,熏蒸和未熏蒸的样品分别用0.5 mol·L<sup>-1</sup>的K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提30 min,用岛津TOC-V<sub>CPH</sub>仪测定浸提液有机碳浓度,然后用以下公式计算微生物量碳<sup>[11]</sup>:

$$M_c = E_c / 0.38$$

式中, $M_c$ 为土壤微生物量碳, $E_c$ 为熏蒸和未熏蒸土壤样品中浸提液有机碳含量的差值。

土壤SOC测定采用重铬酸钾外热法。

### 1.3 统计分析

利用Excel 2003与Origin 7.5进行统计分析与作图,Origin 7.5进行显著性检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验区降水量季节变化

试验场所在区域降水量季节变化如图1所示。

4、5月降水量位于20 mm以下,6月试验区降水量陡增,由5月的19.5 mm增至122.7 mm,7、8月降水量相似,8月降水量达到最大值为156.4

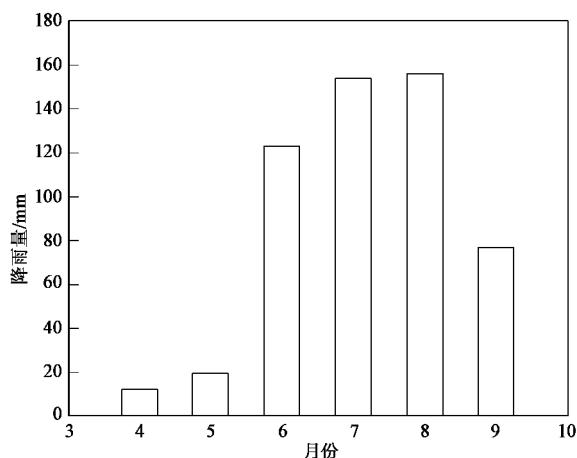


图1 试验区内降水量季节变化

Fig. 1 Seasonal dynamic changes of the rainfall during the growing period in the experiment field

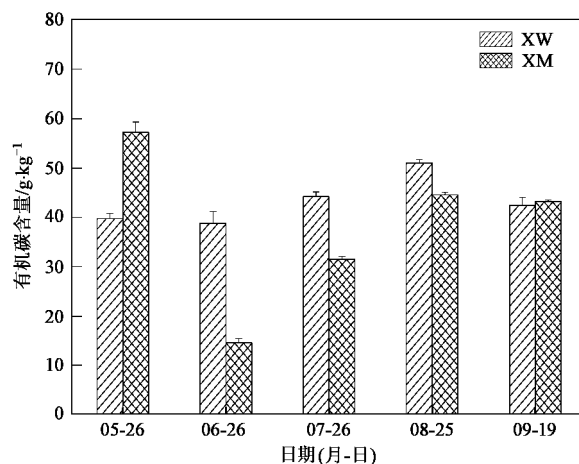
mm 9 月略有下降。

由于 6 月份降雨增强,小叶章沼泽化草甸地开始形成积水环境,并持续整个生长季。随降雨增加水位有所提高,生长季内水位在 0 ~ 15 cm 之间。

## 2.2 小叶章湿地表土 SOC 季节变化

不同水分条件下小叶章湿地表层 0 ~ 20 cm 土壤 SOC 的季节变化表现出明显差异(图 2),且各类型湿地季节变化显著( $p < 0.05$ ),生长季内 2 种湿地表层土壤 SOC 含量变异系数分别为 0.11 和 0.42,说明季节性积水对小叶章湿地表土 SOC 含量驱动更为明显。小叶章湿草甸表层 SOC 含量随生长季开始呈现平稳上升趋势,8 月底达到最大值,9 月略有下降;小叶章沼泽化草甸表层 SOC 含量在生长季初期高于小叶章湿草甸,但在 6 月急剧下降,后呈上升态势,至 9 月下旬不同湿地表层 SOC 含量相近。

小叶章沼泽化草甸土壤表层 SOC 在 6 月表现出最低值,较 5 月下降了 74.53%,其可能原因是温度上升与降水加速了土壤中的碳流失。5 月下旬 0 ~ 20 cm 湿地土壤仍处于冻结状态,且此时地表无积水,进入 6 月之后土壤温度上升<sup>[12]</sup>,沼泽化草甸表层土壤冻结层融化,降水增多促使地表形成积水环境。Lipson 等<sup>[13]</sup>研究表明春季土壤融化后水溶性有机碳(water-soluble organic carbon)明显增多,从而刺激土壤中有机碳释放,此外也有研究<sup>[14]</sup>指出,较浅积水会促进沼泽湿地中 DOC 产生与排放,导致土壤中有机碳以可溶性有机碳或者颗粒有机碳的形式进入水体或者流失。同时温度上升能提高基质可利用性,加速微生物对根系、枯落物等物质的分解作



XW:小叶章湿草甸;XM:小叶章沼泽化草甸,下同

图2 不同水分条件下小叶章湿地有机碳含量季节动态变化(表土 0 ~ 20 cm)

Fig. 2 Seasonal dynamic changes of total soil organic carbon in the *Calamagrostis angustifolia* wetlands under different water conditions

用,由于试验区地形多为发育较为典型的碟形洼地,积水环境与冻融作用共同促进有机碳释放,使沼泽化草甸表土 SOC 表现出最低值;其次,6 月为植物生长初期,部分有机碳分解矿化以满足于植物的生长发育所需,进一步降低了此时沼泽化小叶章草甸土壤 SOC 含量。7 ~ 8 月 2 种小叶章湿地表层土壤 SOC 含量逐步上升,表明随植物生长,地表枯落物输入以及植物生长促进了有机碳向土壤中的输入。小叶章沼泽化草甸地下生物量高于小叶章湿草甸<sup>[15]</sup>,并且淹水环境对微生物活性具有限制作用,其 SOC 积累速率明显高于后者。9 月植物进入生长末期,限制了土壤中的碳输入,降水减少(图 1)促进了有机碳的分解作用,使得 2 种湿地表土 SOC 含量均表现出下降,其中小叶章沼泽化草甸表土 SOC 含量减少不明显,表明此时积水群落具有持续碳输入,地下生物量仍处于快速积累阶段,与孙志高等<sup>[15]</sup>研究结论相似。综上所述,积水条件影响下,小叶章沼泽化草甸 SOC 含量受到水文周期的驱动作用更为显著,尤其是对冻融作用响应十分明显。

## 2.3 小叶章湿地表土轻组有机质变化动态

土壤轻组有机碳(LFOC)是指游离的(不被矿物质所结合)、颗粒态的处于不同分解状态的植物或者动植物残体<sup>[16]</sup>,包括游离态轻组(free light fraction, F-LF)与包裹态轻组(occluded light fraction, O-LF),其中 F-LF 容易被分解利用<sup>[17]</sup>,具有较高的周转速率,O-LF 中有机碳含量高于 F-LF,周转速率

位于土壤 F-LF 与重组有机碳 (HFOC) 之间<sup>[17,18]</sup>。有机质经过微生物分解转化后被土壤中黏质或者沙质颗粒固定,形成有机矿物复合体,即重组有机质 (HF),其结合了土壤中大部分的有机碳<sup>[19]</sup>。

本研究对不同水分环境下小叶章湿地表层土壤进行季节性观测,测定其土壤轻组分 (LF) 有机碳含量变化 (表 1)。由表 1 可以看出,小叶章湿草甸和小叶章沼泽化草甸表层 0~20 cm 土壤中 LF 含碳量分别在 184.56~275.89 g·kg<sup>-1</sup> 与 152.83~294.75 g·kg<sup>-1</sup> 之间, HF 含碳量分别在 35.28~47.75 g·kg<sup>-1</sup> 和 13.18~51.08 g·kg<sup>-1</sup> 之间,各组分含碳量季节变化明显 ( $p < 0.01$ )。小叶章沼泽化草甸各组分含碳量在 6 月现出极低值,轻组含碳量从 235.00 g·kg<sup>-1</sup> 下降至 152.83 g·kg<sup>-1</sup>,重组含碳量由 51.08 g·kg<sup>-1</sup> 降为 13.18 g·kg<sup>-1</sup>,且重组含碳量增加趋势缓慢。土壤中有有机碳由于其结构特性而受到来自物

理、化学或者生物学的保护<sup>[20]</sup>。Groffman 等<sup>[21]</sup>指出,冻融作用通过改变土壤物理结构而促进有机碳的矿化,对微生物活性等没有显著影响。因此笔者认为,该结果暗示了轻组中含碳量较低的游离态轻组所占比例增加,而含碳量较高的包裹态轻组减少,并对重组中矿物质结合态有机碳的释放有促进作用,说明冻融作用对土壤中团聚体稳定性具有一定影响<sup>[22]</sup>,其具体作用机制有待于进一步研究。

不同湿地表层 0~20 cm 土壤轻组含碳量均在 8 月表现出明显下降,重组含碳量略有增加,其原因可能是 8 月的持续降水造成水位上升限制了根系分解向土壤中的碳输入,较稳定性碳组分被分解木质素细菌或真菌等微生物厌氧分解在土壤剖面中转移或被矿物质结合<sup>[13]</sup>,增加了重组含碳量。9 月生长季进入结束期,降水减少,枯落物及根系等有机质输入增加,土壤各组分含碳量明显上升。

表 1 生长季内表层 0~20 cm 土壤各组分有机碳含量<sup>1)</sup> / g·kg<sup>-1</sup>

Table 1 Organic carbon contents of different fractions in the layer 0~20 cm soil during the grow season / g·kg<sup>-1</sup>

湿地类型	土壤组分	日期 (月-日)				
		05-26	06-26	07-26	08-25	09-19
XD	LF	184.56 ± 1.52	197.32 ± 3.50	244.68 ± 11.52	185.05 ± 2.24	275.89 ± 5.59
	HF	36.16 ± 0.04	35.28 ± 0.08	39.87 ± 0.26	47.75 ± 0.06	36.64 ± 0.14
XM	LF	235.00 ± 4.72	152.83 ± 4.46	294.75 ± 5.94	212.49 ± 9.52	290.39 ± 9.06
	HF	51.08 ± 0.17	13.18 ± 0.05	26.46 ± 0.11	40.72 ± 0.23	37.68 ± 0.20

1) XW: 小叶章湿草甸; XM: 小叶章沼泽化草甸; LF: 轻组有机质 (< 1.70 g·cm<sup>-3</sup>); HF: 重组有机质 (> 1.70 g·cm<sup>-3</sup>)

生长季初期 2 种小叶章湿地 LFOC 含量差异明显 [图 3 (a)], 常年湿润无积水环境下湿地表土 LFOC 含量随时间变化总体呈上升趋势, 季节性积水环境下表土 LFOC 含量在 6 月下旬达到最低值, 与表层 SOC 含量变化相同, 7~9 月 2 种小叶章湿地中 LFOC 含量变化趋势一致。不同小叶章湿地表土有机碳 LFOC 比例季节变化显著 ( $p < 0.05$ ) [图 3 (b)], 小叶章湿草甸表土 LFOC 比例在 5~8 月变化较为平稳, 至 9 月下旬明显上升。小叶章沼泽化草甸 LFOC 比例呈显著“W”型变化趋势, 6 月和 8 月表现出较低值, 生长季内均值为 13.58%, 大于小叶章湿草甸 (11.96%), 说明淹水条件下土壤有机碳在不同组分间转化过程较为复杂。本研究发现, 不同类型湿地表层土壤 LFOC 含量在 6 月均有不同程度的下降, 在小叶章沼泽化草甸中含量由 7.97 g·kg<sup>-1</sup> 降低为 1.52 g·kg<sup>-1</sup>, 减少了 80.93%, 降幅显著。此时沼泽化草甸土壤处于冻融期, 冻融作用可以促进土壤中有有机碎屑物的瓦解与 C、N 矿化<sup>[21]</sup>。LFOC 具有较高的微生物活性, 冻土融化过程中矿化速率增强释放 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>, 或者以 DOC 形式进入

水体, 使得 LFOC 含量减少。此外, 6 月各类型湿地生态系统植物地下生物量达到最低值, 根系向土壤中输入的有机质减少, 而此时小叶章湿地植物处于生长旺盛期, 易分解的轻组有机质部分分解矿化以满足于植物的生长发育所需, 也是此时土壤中 LFOC 含量下降的原因之一。

7 月 2 种小叶章湿地表土 LFOC 含量明显上升, 小叶章沼泽化草甸增幅明显, LFOC 含量与占 SOC 比例分别由 1.52 g·kg<sup>-1</sup>、10.43% 上升为 5.52 g·kg<sup>-1</sup>、17.54%, 土壤重组含碳量 (表 1) 与 SOC 含量也均有明显上升 (图 2)。6~7 月地表枯落物进入土壤, 为微生物提供可分解基质, 淹水条件下限制了有机碳的矿化, 使得有机碳以不同有机无机复合体存在于土壤中, 提高 SOC 以及各碳组分含量; 而小叶章湿草甸土壤通气状况较好, 湿润条件提高了微生物活性, 促进有机质的好氧分解。不同密度组分有机碳含量增幅不明显。本研究中 7 月沼泽化草甸表土重组含碳量较 6 月上升了近一倍, 说明此时淹水土壤中微生物具有较强的分解活性, 土壤中有有机质经微生物进一步分解后被土壤颗粒固定<sup>[19]</sup>, 形成难

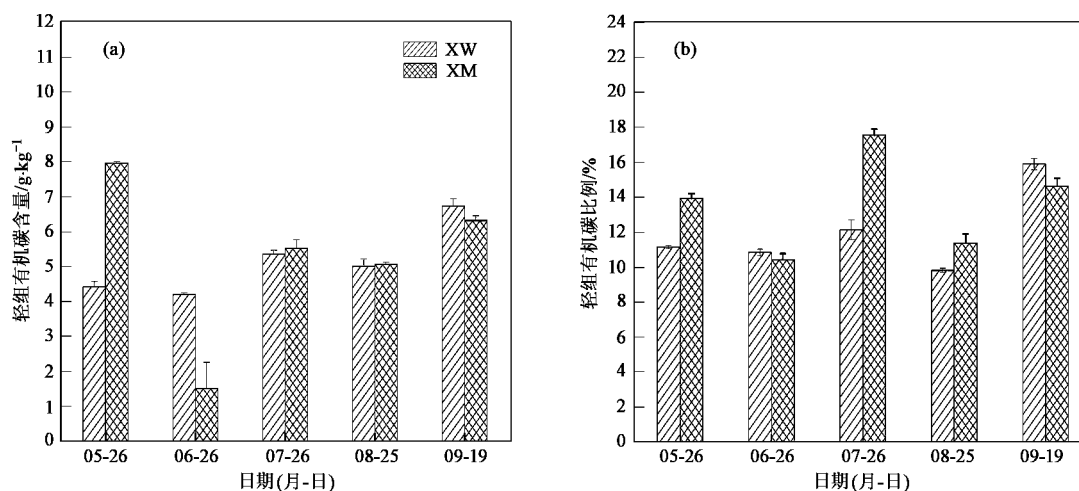


图3 不同水分条件下小叶章湿地轻组有机碳含量及比例季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of the LFOC content and proportion in the *Calamagrostis angustifolia* wetland communities under different water conditions

以被分解利用的重组有机质。

2种小叶章湿地土壤 LFOC 含量及比例在8月略有下降,至9月中旬试验结束时呈明显上升态势, LFOC 比例分别为 6.74% (XW) 和 6.32% (XM)。沼泽化草甸表层 LFOC 比例在8月出现极小值,说明此时土壤中重组有机碳积累态势较强,微生物对 LFOC 等活性有机碳进一步分解利用促使重组有机质含碳量增加。8月末开始衰老<sup>[24]</sup>,植物根系枯死进入土壤中, LFOC 比例增大。本研究中9月末湿地表层土壤 LFOC 含量及占总有机碳比例表现为小叶章湿草甸大于小叶章沼泽化草甸,而相关研究表明沼泽化草甸小叶章地下生物量明显高于小叶章湿草甸<sup>[15]</sup>,其原因可能是沼泽化草甸植物地下生物量形成较厚的草根层,进入下层土壤的枯死根系量少,较低的碳输入造成碳的低累积。小叶章沼泽化草甸表层 0~20 cm SOC 含量生长季内均值 ( $38.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 低于小叶章湿草甸 ( $43.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),但前者轻组有机碳比例均值 (13.58%) 高于后者 (11.96%),说明淹水环境下有机质的积累受到植物枯落物输入和积水条件对有机质分解的限制作用的双重影响。

生长季内小叶章沼泽化草甸 LFOC 比例呈显著 W 型变化趋势,7月不同组分含碳量变化表明了淹水条件下微生物具有较强活性,促进了不同密度组分有机质的积累。相关分析表明,土壤中 LFOC 含量与 SOC 呈显著正相关关系 ( $r=0.816$ ,  $p<0.01$ ),说明 LFOC 积累有利于 SOC 的蓄积。

#### 2.4 MBC 与微生物熵季节变化动态

微生物是生态系统重要的组成部分,参与土壤有机质的分解、矿化与积累过程,对土壤碳循环起到重要的传输作用<sup>[25]</sup>。微生物活性与种类对环境条件变化十分敏感,干旱、降水以及土壤含水量的改变都会引起土壤中微生物群落结构的变化<sup>[26-27]</sup>,微生物活性还受到底物可利用性的制约,枯落物向土壤中的碳输入是影响微生物生物量的重要因素<sup>[13]</sup>。微生物生物量碳 (MBC) 是 SOC 的重要组成部分,也是土壤重要的活性有机碳指标。Poret-Peterson 等<sup>[28]</sup>研究表明海水入侵形成淹水环境导致 MBC 减少,土壤中有机碳分解速率下降,从而增加的生态系统的碳积累。

不同水分条件下小叶章湿地 MBC 季节变化显著 ( $p<0.05$ ),且不同季节表现出明显差异。2种小叶章湿地 MBC 在6月下旬都表现出一定下降(图4),原因可能由于此时土壤温度升高,而向土壤中输入碳素较少,可利用性 C 量下降限制了微生物数量和种类<sup>[13]</sup>。小叶章湿草甸 MBC 含量8月达到最大值,9月明显下降,该变化可能与土壤温度有关,相关研究表明土壤 15 cm 温度在该时段达到最高<sup>[12]</sup>。小叶章沼泽化草甸 MBC 含量呈现明显的季节波动 ( $p<0.01$ ),5~6月地表水位从0上升为10 cm 左右, MBC 下降了 83.09%,至7月下旬 MBC 显著增大,由  $337.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  上升为  $1829.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,表明此时淹水土壤中微生物活性较强,这之前研究结果中土壤中重组有机质含碳量增加相符(表1),表现了微生物在淹水环境下一定时间内的适应机制。

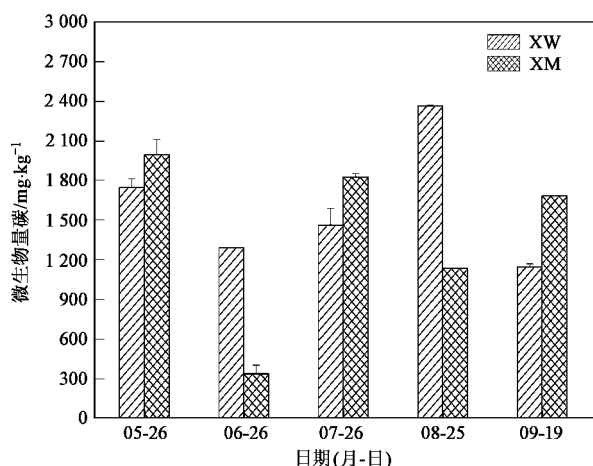


图4 不同水分条件下小叶章湿地微生物量碳季节变化动态

Fig. 4 Seasonal dynamics of the MBC content in *Calamagrostis angustifolia* wetlands under different water conditions

本研究结果显示季节性积水小叶章沼泽化草甸表层土壤生长季内 MBC 含量 ( $1397.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 低于小叶章湿草甸 MBC ( $1603.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (图4), 说明水分增加使得地表形成积水环境时, 微生物活性受到抑制, 这与杨桂生等<sup>[29]</sup>对不同水分梯度小叶章湿地微生物活性研究结果相似。MBC 在 6 月下旬表现出一定下降, 小叶章沼泽化草甸 MBC 下降幅度明显, 原因可能由于此时土壤 SOC 含量下降 (图2), 表层土壤温度升高, 土壤中有有机质被分解利用满足动植物需要或者以 DOC 形式向水体中流失, 而向土壤中输入的碳较少, 可利用性 C 量下降限制微生物数量和种类<sup>[30, 33]</sup>。此外, 冻融作用对微生物种类也有重要影响。相关研究表明, 冻融期即将结束时微生物生物量达到年际最大值<sup>[31]</sup>, 而由于可利用性碳源的限制, 在由冬季向春季过渡时期表现出明显下降<sup>[32]</sup>。经过长时间低温环境后, 秋季积累的枯落物和根系为微生物提供营养物质, 使得冻层土壤中形成耐低温的微生物种群<sup>[33]</sup>, 当土壤温度升高至  $0^\circ\text{C}$  以上冻层融化时, 环境变化将会导致具有耐寒适应特性的微生物种类数量的急剧减少<sup>[34]</sup>, 之后随土壤温度上升与土壤水分增大微生物生物量逐渐上升。

水分条件对微生物种类与数量的影响具有不确定性, 多数研究表明, 土壤中微生物量在干旱降低下有所降低反之则增加<sup>[26, 27]</sup>, 但淹水条件与极端干旱同样会对微生物活性产生抑制<sup>[28]</sup>, 因此土壤水分条件波动变化会对微生物产生选择效应, 以适应变化的环境条件<sup>[35]</sup>。本研究中小叶章沼泽化草甸土壤 7

月 MBC 达到另一峰值  $1829.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此时植物生长活动旺盛, 地表枯落物输入与根系分泌物为微生物提供营养物质满足其生存与繁殖<sup>[25]</sup>, 使得微生物表现出一定的适应机制, 8 月下旬 MBC 明显降低, 之后又呈上升趋势, 其原因可能是由于此时地下生物量积累缓慢, 向土壤中输入有机质减少, 而持续强降水造成的积水环境限制了微生物对进入土壤的枯落物等有机质的分解利用。而 9 月份降水明显下降, 水位波动不明显, 大量枯死细根等进入土壤, 为以细菌为主的微生物提供营养物质, 使得土壤中 MBC 含量明显上升<sup>[35]</sup>。小叶章湿草甸在 8 月下旬 MBC 达到最大值  $2366.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此时降水量大 (图1), 土壤温度较高<sup>[12]</sup>, 微生物在适宜的土壤温度与水分含量环境下表现出较强的活性。进入 9 月之后降雨减少, 土壤水分含量降低, 并且土壤温度下降, 低温限制了微生物活性, MBC 含量降低。相关分析表明, 小叶章沼泽化草甸土壤中 MBC 与 LFOC 含量具有显著正相关关系 ( $r = 0.95$ ,  $p < 0.05$ ), 但在小叶章湿草甸中关系不明显, 说明淹水条件下, 可利用性碳源对微生物活性的制约性更大。

土壤微生物量碳 ( $C_{\text{bio}}$ ) 与土壤总有机碳 ( $C_{\text{org}}$ ) 的比值称为微生物熵 ( $C_{\text{bio}}/C_{\text{org}}$ ), 可以用作评价土壤过程力和土壤健康变化的有效指标<sup>[19]</sup>, 对于耕地土壤质量<sup>[36]</sup>以及重金属等污染土壤<sup>[37]</sup>具有较高敏感性。Sparling<sup>[38]</sup>指出, 利用微生物量碳与微生物熵是对土壤有机质进行监测和评价, 比利用 SOC 这一单一指标更具有敏感性。相关研究表明土壤微生物熵越高越利于土壤碳的积累<sup>[39]</sup>, 也有研究指出土壤 SOC 含量与微生物熵呈显著负相关<sup>[8]</sup>, 结论不相一致。本研究表明, 小叶章湿草甸微生物熵在  $2.70\% \sim 4.40\%$  之间, 小叶章沼泽化草甸微生物熵在  $2.55\% \sim 5.81\%$  之间 (图5), 后者表土微生物熵生长季内均值二者差异不显著, 但不同季节微生物熵表现出明显差异 ( $p < 0.05$ )。小叶章沼泽化草甸 (XM) 季节变异系数 (0.38) 大于小叶章湿草甸 (0.22), 表现了水文周期对未淹水和淹水环境下微生物活性的不同驱动作用。5~6 月小叶章湿草甸微生物熵高于沼泽化草甸, 其原因可能较好的通气条件促进微生物对有机碳的利用, 7 月小叶章沼泽化草甸微生物熵表现为最大值, 较 6 月增加了 1.51 倍, 表明此时微生物对土壤中有有机碳的利用率较高。整个生长季内土壤微生物熵与微生物量碳季节变化具有较强的一致性, 说明微生物熵的季节变化主要是因为环境因素对微生物种类和数量的影响实现的。

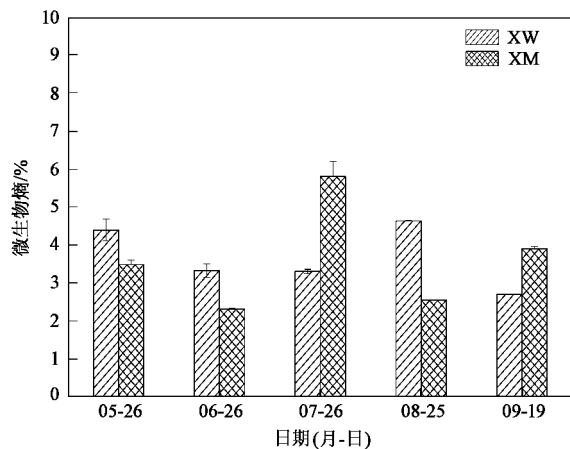


图5 不同水分条件下小叶章湿地微生物熵季节变化

Fig. 5 Seasonal dynamics of microbial quotient in *Calamagrostis angustifolia* wetlands under different water conditions

### 3 结论

(1) 水文周期对小叶章湿地表层 0~20 cm 土壤 SOC 及活性有机碳组分含量有明显驱动作用, 季节性积水环境对小叶章沼泽化草甸的驱动作用更为显著, 其中冻融过程显著降低了小叶章草甸表层土壤中 SOC、LFOC、MBC 含量以及土壤轻组与重组含碳量。

(2) 积水条件限制了土壤有机质分解, 小叶章沼泽化草甸表土 LF 含碳量与轻组有机碳比例均高于小叶章湿草甸, 土壤中轻组有机碳含量与有机碳呈显著正相关关系 ( $r = 0.816$ ,  $p < 0.01$ ), 说明轻组有机碳增多有利于土壤有机碳的蓄积。

(3) 地表积水降低了小叶章湿地微生物活性。淹水条件下微生物对环境具有一定适应机制, 生长季中期 MBC 与微生物熵显著增加, 但降水持续增加明显降低了 MBC 含量; 而地表无积水时, 降水对 MBC 含量具有一定促进作用。

(4) 小叶章沼泽化草甸表层土壤中微生物量碳与轻组有机碳含量具有显著正相关关系 ( $r = 0.95$ ,  $p < 0.05$ ), 但在小叶章湿草甸中关系不明显, 说明季节性积水提高了可利用性碳源对微生物活动的制约性。

参考文献:

[1] Ström L, Christensen T R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**: 1689-1698.  
 [2] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应 [J]. 生态学杂志, 1999, **18**(3): 32-38.  
 [3] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 513-519.

[4] Lima A M N, Silva I R, Neves J C L, et al. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil [J]. Forest Ecology and Management, 2006, **235**: 219-231.  
 [5] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system [J]. Soil and Tillage Research, 2009, **103**: 412-418.  
 [6] 王晶, 解宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述 [J]. 生态学杂志, 2003, **22**(6): 109-112.  
 [7] Yang C M, Yang L Z, Zhu O Y. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes [J]. Geoderma, 2005, **124**: 133-142.  
 [8] Jiang H M, Jiang J P, Jia Y, et al. Soil carbon pool and effects of soil fertility in seeded alfalfa fields on the semi-arid Loess Plateau in China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**: 2350-2358.  
 [9] 曾建平, 孙光友, 王春鹤, 等. 三江平原地貌与沼泽的形成与分布 [A]. 见: 黄锡畴. 三江平原沼泽 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 97.  
 [10] 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**: 350-360.  
 [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 231-233.  
 [12] 刘吉平, 杨青, 吕宪国. 三江平原环型湿地土壤温度梯度的研究 [J]. 湿地科学, 2005, **3**(1): 42-47.  
 [13] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**: 441-448.  
 [14] Briggs S V, Maher M T, Tongway D J. Dissolved and particular organic carbon in two wetlands in southwestern New South Wales, Australia [J]. Hydrobiologia, 1993, **264**: 13-19.  
 [15] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原小叶章湿地种群生物量结构动态与生长速率分析 [J]. 草业学报, 2006, **15**(2): 21-29.  
 [16] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: Vertical distribution and seasonal patterns [J]. Soil Science, 1983, **135**: 79-87.  
 [17] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerradol Oxisol [J]. Soil and Tillage Research, 2003, **70**: 107-119.  
 [18] 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): 858-859.  
 [19] Post W M, Kowon C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000, **6**: 317-328.  
 [20] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展 [J]. 生态学报, 2007, **27**(6): 2642-2650.  
 [21] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, et al. Effects of mild

- winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**:191–213.
- [22] Lehesch G A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability [J]. *Soil Science*, 1998, **163**(1):63–70.
- [23] Unger I M, Kennedy A C, Muzika R M. Flooding effects on soil microbial communities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**(1):1–8.
- [24] 杨永兴, 王世岩, 何太蓉, 等. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究 [J]. *中国草地*, 2002, **24**(1): 1–7.
- [25] Lu Y H, Murase J, Watanabe A, *et al.* Linking microbial community dynamics to rhizosphere carbon flow in a wetland rice soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **48**:179–186.
- [26] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Hydrological effects on the diversity of phenolic degrading bacteria in a peatland: implications for carbon cycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**:1277–1287.
- [27] Kraigher B, Stres B, Hacin J, *et al.* Microbial activity and community structure in two drained fen soils in the Ljubljana Marsh [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2762–2771.
- [28] Poret-Peterson A T, Ji B M, Engelhaupt E, *et al.* Soil microbial biomass along a hydrologic gradient in a subsiding coastal bottomland forest: Implications for future subsidence and sea-level rise [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 641–645.
- [29] 杨桂生, 宋长春, 王丽, 等. 水位梯度对小叶章湿地土壤微生物活性的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(2):444–449.
- [30] 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2008, **24**(3): 1–6.
- [31] Schadt C W, Martin A P, Lipson D A, *et al.* Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils [J]. *Science*, 2003, **301**: 1359–1361.
- [32] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, *et al.* Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2843–2851.
- [33] Lipson D A, Schadt C W, Schmidt S K. Changes in soil microbial community structure and function in an alpine dry meadow following spring snowmelt [J]. *Microbial Ecology*, 2002, **43**: 307–314.
- [34] DeLuca T H, Keeney D R, McCarty G W. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1992, **14**:116–120.
- [35] Rinklebe J, Langer U. Microbial diversity in three floodplain soils at the Elbe River (Germany) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**:2144–2151.
- [36] Saggar S, Yeates G W, Shepherd T G. Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol soils in New Zealand [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, **58**(1–2): 55–68.
- [37] Aceves M B, Ansorena C G J, Dendooven L, *et al.* Soil microbial biomass and organic C in a gradient of zinc concentrations in soils around a mine spoil tip [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(6):867–876.
- [38] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter [J]. *Australian Journals of Soil Research*, 1992, **30**: 195–207.
- [39] Singh J S, Reghbanshi A S, Singh R S, *et al.* Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. *Nature*, 1989, **338**: 499–500.