DOI: 10.5846/stxb201211191623
张静,马玲,丁新华,陈旭日,马伟.扎龙湿地不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化.生态学报,2014,34(13):3712-3719.
Zhang J, Ma L, Ding X H, Chen X R, Ma W.Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in different habitats in Zhalong Wetland.Acta Ecologica Sinica,2014,34(13):3712-3719.

# 扎龙湿地不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化

张 静[1,2],马 玲[2,*],丁新华[2,3],陈旭日[2],马 伟[4]
(1. 黑龙江农业经济职业学院, 牡丹江 157041; 2. 东北林业大学, 哈尔滨 150040;
3. 新疆农垦科学院, 石河子 83200; 4. 黑龙江中医药大学, 哈尔滨 150040)

**摘要**:为从土壤微生物生物量角度分析扎龙湿地不同生境的土壤肥力状况,对扎龙芦苇生境和草甸生境不同土层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm)微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)季节变化进行监测,并分析了土壤微生物生物量碳氮与土壤环境因子的关系。结果表明:两种生境土壤 MBC、MBN 含量均表现出明显的垂直分布特征,即 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm,且草甸生境显著大于芦苇生境。在整个生长季节内,两种生境土壤微生物量碳、氮均大致呈现出“W”型变化格局,其变化幅度均随着土层的加深而减小,且草甸生境的变化幅度显著大于芦苇生境。相关分析表明:芦苇生境土壤 MBC 与土壤含水率呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$),MBN 与土壤含水率、有机碳、水解性氮呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$);草甸生境土壤 MBC 则均与土壤含水率、有机碳、有效磷、水解性氮呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$),MBN 则均与土壤含水率、有效磷呈极显著正相关($P < 0.01$),与有机碳呈显著正相关($P < 0.05$)。

**关键词**:土壤微生物生物量碳;土壤微生物生物量氮;季节变化;扎龙湿地

# Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in different habitats in Zhalong Wetland

ZHANG Jing[1,2], MA Ling[2,*], DING Xinhua[2,3], CHEN Xuri[2], MA Wei[4]
1 *Heilongjiang Agricultural Economy Vocational College*, *Mudanjiang* 157041, *China*
2 *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*
3 *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science*, *Shihezi* 83200, *China*
4 *Heilongjiang University of Chinese Medicine*, *Harbin* 150040, *China*

**Abstract**: Soil microbe activity is the most important decomposer in forest ecosystems and is a sensitive indicator of environmental changes. It plays a crucial role in wetland carbon and nitrogen cycles. However, few studies on soil microbial biomass carbon and nitrogen have been conducted in the Zhalong wetland, especially studies of the seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in different habitats. In this study, in order to investigate the soil fertility of different habitats based on the soil microbial biomass, the soil microbial biomass C and N were observed in three soil layers (0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm) of a reed habitat and meadow habitat in the Zhalong wetland. Meanwhile, the relationships between the soil microbial biomass and soil environmental factors were also analyzed. The experimental design included two habitat types with three 20 m × 20 m plots in each habitat type. In each plot, we took random soil samples in three soil layers (0—10 cm, 10—20 cm, and 20—30 cm) from five spots every month from May to September, 2010. The samples in each plot were mixed to produce a combined sample for soil microbial biomass carbon and nitrogen determination. All soil

**基金项目**:学术名师支持计划; 国家自然科学基金项目(30870394)
**收稿日期**:2012-11-19; **网络出版日期**:2014-02-25
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Maling63@163.com

samples were stored at 2 ℃ before analysis within one week of sampling. The results showed that the microbial biomass C and N for different habitats displayed a vertical distribution in decreasing order of 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm. In addition, the microbial biomass C and N in the meadow habitat was greater than that of the reed habitat. During the whole growing season, the microbial biomass C and N in the two habitats showed a "W" shaped variation pattern. The variation profiles of the two habitats decreased with soil depth, but the variation in meadow habitat was significantly larger than that in the reed habitat. However, the correlation analysis showed the soil microbial biomass C in the reed habitat had an extremely significant positive correlation with the soil water content ($P < 0.01$) and had an extremely significant negative correlation with soil pH value ($P < 0.01$). The soil microbial biomass N in the reed habitat had an extremely significant positive correlation with soil water content, organic carbon and hydrolysable nitrogen ($P < 0.01$) and had an extremely significant negative correlation with soil pH value ($P < 0.01$). The soil microbial biomass C in the meadow habitat had an extremely significant positive correlation with soil water content, organic carbon, available phosphorus, hydrolysable nitrogen ($P < 0.01$) and had a significant positive correlation with soil pH value ($P < 0.05$). The soil microbial biomass N in the meadow habitat had an extremely significant positive correlation with soil water content and available phosphorus ($P < 0.01$) and had a significant positive correlation with organic carbon ($P < 0.05$). We concluded that the variations in litterfall amount and composition, and the soil physical and chemical properties among the different habitat types mainly contributed to the differences in the seasonal dynamics of the soil microbial biomass C and N in the Zhalong Wetland.

**Key Words**: soil microbial biomass C; soil microbial biomass N; seasonal dynamics; Zhalong wetland

土壤微生物量是指土壤中体积< 5000 $\mu m^3$的生物总量,但获得植物体如植物根系等不包括在内,它是活的土壤有机质部分[1]。土壤微生物在土壤有机质分解、矿化和营养循环等方面起着重要作用,是植物营养元素的一个重要的源和库,对土壤养分起很大的调控作用[2],并能够作为土壤环境质量的灵敏生物指标[3]。

在湿地生态系统中,以土壤微生物量作为评价土壤肥力状况势必要考虑其季节变异,土壤水分、pH值和土壤养分等生态因子的季节变化都可能引起土壤微生物生物量的变化,研究这些因子对土壤微生物生物量的影响极其重要[4-5]。扎龙湿地拥有我国面积最大、相对原始和完整的淡水芦苇沼泽湿地[6],由于上游农业灌溉等人为影响,扎龙湿地水资源严重缺乏,湿地退化现象比较严重[7],湿地面积不断萎缩。近年来,土壤微生物生物量已成为国际土壤生物学、土壤生态学以及全球变化生物学等研究领域的热点问题之一[8]。国内外学者对其季节动态在碳氮循环及养分释放等方面作了大量研究,但多集中于对森林、草原以及农田等生态系统的研究[9-11],而对于湿地特别是天然湿地土壤微生物生物量的研究较少[12-13],特别是不同生境土壤微生物生物量季节动态及其影响因子的研究鲜有报道。

因此,本研究选取扎龙湿地不同生境进行土壤微生物碳氮的季节动态研究以期达到如下目的:(1)了解不同生境土壤微生物生物量碳、氮含量及其季节变化,从土壤微生物生物量角度分析不同生境土壤肥力状况;(2)探讨影响土壤微生物生物量碳氮季节变化的主要土壤环境因子,为扎龙湿地的保护与管理提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

扎龙湿地位于黑龙江省西部乌裕尔河下游的齐齐哈尔、大庆交界地域,属中温带大陆性季风气候,冬寒漫长,春干风大,夏热多雨,秋凉霜早。年平均降水量 420 mm,6—8 月降水量约占全年的 67%,年平均气温 2.3 ℃,无霜期 200 d。芦苇沼泽、季节性湿草甸、明水面为其 3 种典型生境。

扎龙湿地 1992 年被列入国际重要湿地名录,其地理位置独特、生态环境典型,是丹顶鹤等多种珍稀水禽全球迁徙、繁殖的重要基地,在世界珍稀水禽保护与繁育中占有重要地位[14]。近年来,随着区域内经济的快速发展,特别是湿地重要水源补给的乌裕尔河上游沿线工农业大力发展,用水量猛增,自然来水量不断下降,致使湿地连年干旱,面积大为萎缩。

此外,由于保护区各功能区域内人为干扰愈加严重,极大地破坏了湿地的原有生态格局,导致湿地典型生境严重退化。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置及土样的采集

本试验于 2010 年 5 月—9 月选取扎龙湿地芦苇生境和草甸生境为研究对象,样地概况见表 1。在两种生境内分别设置 3 个 20 m×20 m 的样方,土壤样品的收集采用挖剖面法,每个样点分 0—10 cm 层、10—20 cm 层和 20—30 cm 层分别收集,每次取样是在每个样地相同的样点进行的,即在前一个样点附近取样,尽量保持土壤样本的均一性。每个固定样方随机选取 5 个点进行分层采样,将采集到的 5 个点混合作为 1 个样品,每一样品均进行两个重复,共采集样品 180 个。于当日带回实验室置于 2 ℃低温储存,并在 1 周内完成有关土壤微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)的测定。

**表 1 样地基本情况**

**Table 1 Basic information of the sampling plots**

| 生境类型 Habitat types | 地理坐标 Coordinates | 海拔/m Altitude | 植被类型 Vegetation types | 土壤类型 Soil types | 人为干扰 Human disturbance |
|---|---|---|---|---|---|
| 芦苇生境 Reed habitat | 46°52′—47°32′N, | 139.6 | 芦苇 | 沼泽土 | 放牧、刹草 |
| 草甸生境 Meadow habitat | 123°47′—124°37′E | 139.6 | 羊胡子 | 草甸土 | 放牧、刹草 |

#### 1.2.2 土壤微生物生物量碳和氮测定

去除新鲜土样中的石块、植物根系等,采用氯仿熏蒸浸提法测定 MBC 和 MBN[15],其中熏蒸处理为 25 ℃真空条件下培养 24 h,提取过程所用浸提液为 0.5 mol/L $K_2SO_4$溶液(土液比 1∶2.5)。浸提液中有机碳和全氮的测定采用 Multi N/C 3000 分析仪进行。MBC (mg/kg) 和 MBN (mg/kg) 分别由下式求得[16-17]:

$$MBC = E_C \times 2.22$$

$$MBN = E_N \times 2.22$$

式中,$E_C$、$E_N$分别为熏蒸与未熏蒸土样浸提液中有机碳、全氮的差值;2.22 为校正系数。

#### 1.2.3 土壤环境因子测定

土壤养分采用常规方法测定[18-19],含水率用烘干恒重法(105 ℃)测定;pH 值采用 1∶2.5 水土比电位法测定;有机碳用重铬酸钾外加热法测定;水解性氮用碱解扩散法测定;有效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定。

### 1.3 数据分析

数据处理采用 SPSS 17.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行统计分析,分别取芦苇生境和草甸生境 3 块样地的平均值比较不同季节、不同土层土壤微生物量碳、氮的差异。土层土壤微生物量碳、氮与土壤环境因子的相关分析采用 Pearson 检验,用不同采样时间、不同土层的样本混合进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生境土壤微生物生物量碳的季节动态

从图 1 可看出,两种生境表层(0—10 cm)土壤 MBC 含量的季节动态均大致呈现"W"型分布格局,且均维持较高水平,但两者也存在一定差异,秋季(9 月)芦苇生境表层土壤 MBC 含量持续降低,与草甸生境此时的增大趋势相反。在整个生长季内,两种生境表层土壤 MBC 含量变幅较大,芦苇生境为 580.96—1205.57 mg/kg,草甸生境则为 797.00—1540.62 mg/kg,草甸生境是芦苇生境的 1.28—1.37 倍。

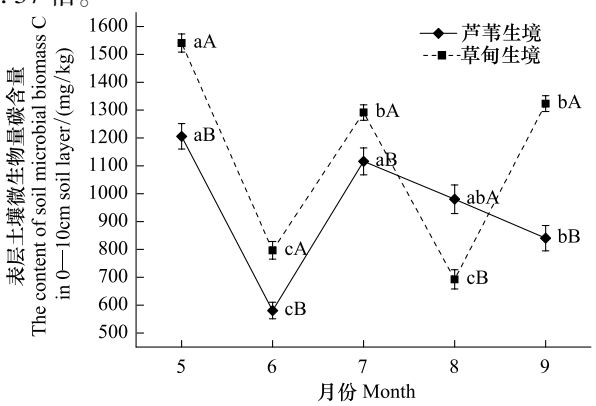



**图 1 表层(0—10 cm)土壤微生物量碳的季节动态**

**Fig.1 Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon in 0—10 cm soil layer**

同一生境不同季节不同小写字母表示季节差异显著($P<0.05$),不同生境不同大写字母表示生境差异显著($P<0.05$)

从图 2 可看出,两种生境中层(10—20 cm)土壤 MBC 含量的变化具有显著的季节动态,在整个生长季内,草甸生境中层土壤 MBC 含量持续降低,9 月略有上升。芦苇生境中层土壤 MBC 含量变化趋势与表层大体一致,其中 7 月份与表层有所差异,表现为持续下降。在整个生长季内,两种生境中层土壤 MBC 差异显著,其含量变幅均较大($P < 0.05$),芦苇生境中层土壤 MBC 含量为 420.98—622.16 mg/kg,草甸生境则为 273.39—786.93 mg/kg,草甸生境是芦苇生境的 0.65—1.26 倍。

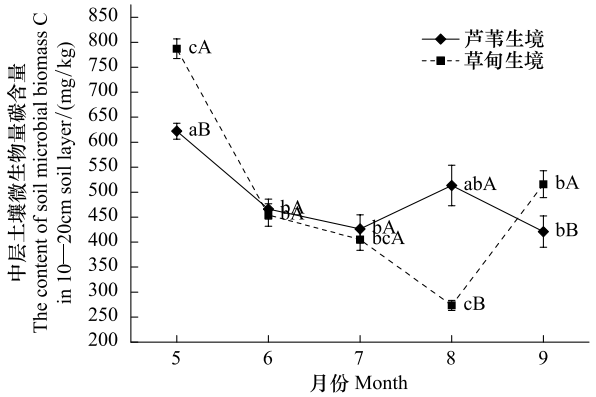



**图 2　中层(10—20 cm)土壤微生物量碳的季节动态**

**Fig.2　Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon in 10—20 cm soil layer**

从图 3 可看出,两种生境底层(20—30 cm)土壤 MBC 含量的变化具有显著的季节动态,在整个生长季内,草甸生境底层土壤 MBC 季节变化与表层一致,呈"W"型变化趋势,芦苇生境底层土壤 MBC 的季节变化与中层一致。在整个生长季内,两种生境底层土壤 MBC 含量差异显著($P < 0.05$),其含量变幅均较大,且均维持在较低水平。芦苇生境底层土壤 MBC 含量为 140.33—207.39 mg/kg,草甸生境则为 106.93—332.59 mg/kg,草甸生境是芦苇生境的 0.76—1.60 倍。

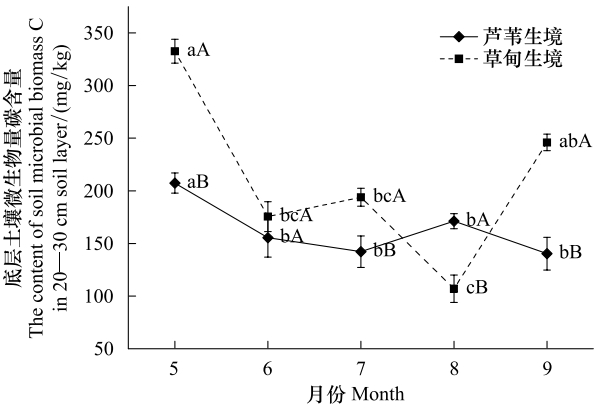



**图 3　底层(20—30 cm)土壤微生物量碳的季节动态**

**Fig.3　Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon in 20—30 cm soil layer**

## 2.2　不同生境土壤微生物生物量氮的季节动态

从图 4 可看出,两种生境表层(0—10 cm)土壤 MBN 含量的季节动态均呈现"W"型分布格局,其中草甸生境最大峰值出现在 5 月,芦苇生境则在 7 月,最低值均出现在 8 月。在整个生长季内,两种生境表层土壤 MBN 含量变幅均较大,芦苇生境为 27.88—60.55 mg/kg,草甸生境则为 20.73—163.24 mg/kg,草甸生境是芦苇生境的 0.74—2.36 倍。

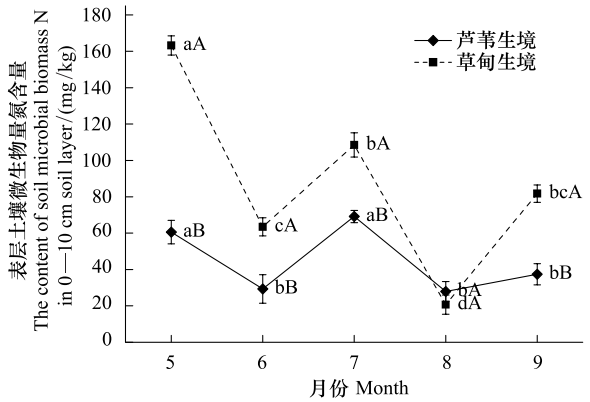



**图 4　表层(0—10 cm)土壤微生物量氮的季节动态**

**Fig.4　Seasonal dynamics of soil microbial biomass nitrogen in 0—10 cm soil layer**

从图 5 可看出,两种生境中层(10—20 cm)土壤 MBN 含量的变化具有显著的季节动态,在整个生长季内,芦苇生境中层土壤 MBN 含量的变化趋势与表层一致,呈"W"型变化趋势,草甸生境则与中层土壤

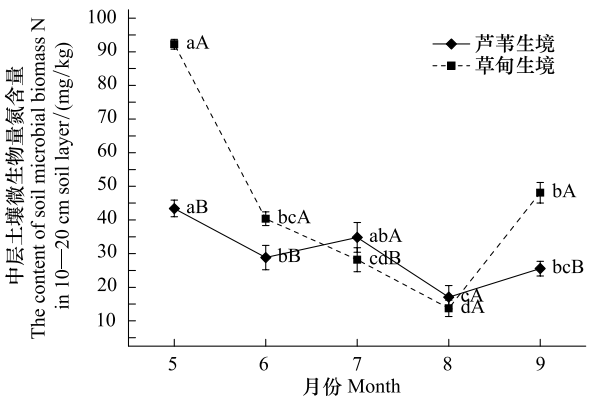



**图 5　中层(10—20 cm)土壤微生物量氮的季节动态**

**Fig.5　Seasonal dynamics of soil microbial biomass nitrogen in 10—20 cm soil layer**

MBC 含量的变化趋势一致。两种生境中层土壤 MBN 含量变幅均较大,芦苇生境为 17.03—43.40 mg/kg,草甸生境则为 13.75—92.27 mg/kg。草甸生境是芦苇生境的 0.81—2.13 倍。

两种生境底层(20—30 cm)土壤 MBN 含量的变化具有显著的季节动态(图 6)。在整个生长季内,芦苇生境底层土壤 MBN 含量的变化趋势与表层一致,草甸生境则与中层一致。两种生境底层土壤 MBN 含量变幅均较大,芦苇生境为13.43—35.74 mg/kg,草甸生境则为 6.24—40.16 mg/kg,草甸生境是芦苇生境的 0.46—1.12 倍。

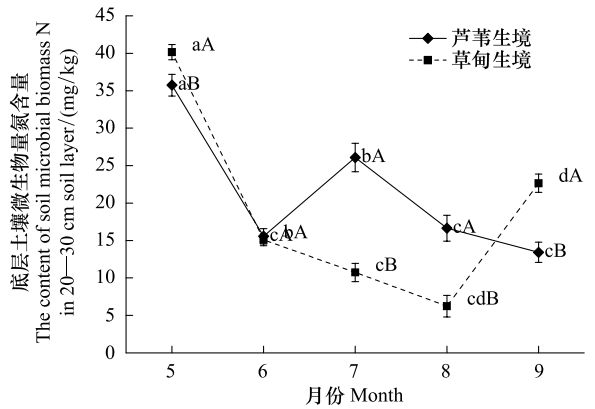



**图 6 底层(20—30 cm)土壤微生物量氮的季节动态**

**Fig.6 Seasonal dynamics of soil microbial biomass nitrogen in 20—30 cm soil layer**

## 2.3 不同生境土壤微生物生物量碳、氮垂直动态

从图 1—图 6 可看出,在土壤剖面上,两种生境土壤 MBC、MBN 含量均表现出明显的垂直分布特征,即 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm,且草甸生境显著大于芦苇生境。在整个生长季节内,两种生境土壤微生物量碳、氮均大致呈现出"W"型变化格局,其变化幅度均随着土层的加深而减小,且草甸生境的变化幅度显著大于芦苇生境。

## 2.4 不同生境土壤微生物生物量碳、氮与土壤环境因子的关系

两种生境土壤 MBC、MBN 与土壤环境因子相关分析表明(表 2):芦苇生境土壤 MBC 与土壤含水率呈极显著正相关($P < 0.01$),MBN 与土壤含水率、有机碳、水解性氮呈极显著正相关($P < 0.01$),二者均与土壤 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$);草甸生境土壤 MBC 则均与土壤含水率、有机碳、有效磷、水解性氮呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$),MBN 则均与土壤含水率、有效磷呈极显著正相关($P < 0.01$),与有机碳呈显著正相关($P < 0.05$)。

**表 2 土壤微生物量与土壤环境因子相关性**

**Table 2 The correlation between soil microbial biomass and soil environmental factors**

| 生境类型 Habitats types | 项目 Items | 微生物生物量碳 MBC | 有机碳 Organic carbon | 有效磷 Available phosphorus | 水解性氮 Hydrolysable nitrogen | pH 值 pH value | 含水率 Moisture content ratio |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 芦苇生境 | MBC | 1 | 0.212 | −0.034 | 0.268 | −0.447** | 0.720** |
| Reed habitat | MBN | 0.808** | 0.403** | 0.224 | 0.439** | −0.495** | 0.446** |
| 草甸生境 | MBC | 1 | 0.620** | 0.387** | 0.474** | 0.356* | 0.594** |
| Meadow habitat | MBN | 0.870** | 0.478* | 0.422** | 0.275 | 0.18 | 0.527** |

** 表示相关性极显著($P < 0.01$),* 代表相关性显著($P < 0.05$),$N = 45$

## 3 讨论

### 3.1 不同生境土壤微生物生物量碳氮的季节变化

土壤微生物生物量的季节性动态变化是一个复杂过程,不同生态系统土壤微生物生物量的季节变化不同[20-21]。而在同一生态系统,即使气候条件相同、不同植被下土壤微生物生物量的季节变化也不同[22]。本研究结果表明,在整个生长季节内,不同生境土壤微生物生物量碳氮具有明显的季节变化,表现为在植物生长旺季维持在较低水平,反之则维持在较高水平,这与其它一些研究结果一致[23-26,9]。芦苇生境和草甸生境土壤微生物生物量碳氮,在生长季初始,均维持在一个较高水平,这与 Edwards 等[20]研究结果一致。6 月,土壤可溶解有机碳、氮的活性突然急剧降低,然后土壤微生物生物量急剧降低,可能是植物迅速萌发进入生长期,需要从土壤中摄取大量营养物质,在一定程度上形成了与微生物间的营养需求竞争,致使微生物的营养可获得量降低,限制了微生物的生长和繁殖[26],因而此时土壤 MBC、MBN 含量均急剧降低。进入 7 月由于土温升

高、含水率增大以及大量植物根系活动能力的增强,使得土壤有机质矿化作用增大,土壤养分充足,根系分泌物丰富,土壤微生物量出现一较大峰值。土壤微生物生物量碳氮含量在 8 月再次降低,Barbhuiya 等[24]认为,植物在雨季对土壤养分的大量需求限制了土壤微生物对养分的可利用性,因此雨季土壤微生物生物量碳、氮较低;土壤微生物生物量碳、氮在雨季最低和在冬季最高,暗示了植物生长对养分的吸收与土壤微生物对体内养分的保持具有同步性,这有利于生态系统受到干扰后的恢复。9 月,由于地表植物相继进入衰亡期,大量凋落物的输入,根系衰老以及碳水化合物由地上向地下的不断转移,致使土壤中生物可利用性有机质增多,草甸生境微生物数量进而出现一定程度的增加,而芦苇生境微生物数量持续降低,这说明在不同的生境中,由于各种生态因子复杂的综合作用以及关键生态因子的主导地位的不同,土壤微生物生物量碳的季节波动可能存在着一定差异。目前对影响湿地土壤微生物生物量碳季节波动的影响因子的研究还比较薄弱,今后需在这方面加强。

### 3.2　土壤环境因子对土壤微生物生物量碳氮的影响

土壤微生物生物量随季节性变化与土壤碳和氮的限制、残留物和营养的输入、土壤湿度以及土壤温度等环境因素有关[27]。微生物生物量碳氮与土壤水分关系的研究报道较多[28-30],但至今仍无确定性结论。本研究结果表明,土壤微生物生物量碳、氮与土壤含水率呈极显著正相关(表 2),说明土壤含水量对湿地土壤微生物量影响显著[31],这与杨继松、王洋等人对小叶章湿地的研究结果一致[32-34],芦苇生境常年处于深水位淹水中,土壤水分处于饱和或过饱和状态,受降水的影响较弱,其厌氧还原条件抑制了有机质的分解,进而有利于维持较高的土壤微生物量。草甸生境处于无淹水带,水分不饱和,经常处于干湿交替状态,明显受到降水影响,其强氧化条件促进了土壤微生物对有机质的好氧分解,不利于有机碳的积累。同时,pH 值可调节土壤微生物的活性,进而影响有机质的累积和分布[35],芦苇生境土壤微生物生物量碳、氮均与土壤 pH 值呈极显著负相关,由于芦苇生境土壤 pH 值相对较高,微生物活性较强,致使有机质的周转速率升高,土壤有机质减少,微生物数量减少。草甸生境则与之相反,土壤 pH 值与土壤 MBC 呈显著正相关,与土壤 MBN 呈弱正相关,由此造成了 2 类生境土壤微生物生物量碳、氮含量的差异。因此,土壤含水率和土壤 pH 值均是影响土壤微生物生物量的限制性因子。研究还发现,芦苇生境土壤 MBN 与有机碳和水解性氮呈极显著正相关,草甸生境内土壤 MBC 与有机碳、有效磷、水解性氮呈极显著正相关,土壤 MBN 与有机碳呈显著正相关,与有效磷呈极显著正相关,该研究结果与以往类似研究结论相同[36],说明土壤微生物量碳、氮与土壤养分呈高度正相关,有机质含量高,能够为微生物在进行自身合成与代谢过程中提供足够的碳氮物质来源以及能量来源[37]。由此可见,土壤养分状况也是影响扎龙湿地土壤微生物生物量的主要因素。另外,土层深度也是影响土壤微生物微生物量季节变化的因素之一。本研究结果表明,不同生境土壤微生物量碳氮含量均随土层深度的增加而逐渐减少,且表层(0—10 cm)土壤微生物量碳氮含量显著高于中层(10—20 cm)和底层(20—30 cm),这反映了土壤微生物随土层变化的分布格局,即微生物量随土层的加深而减少[38]。这可能是因为表层凋落物的数量大,土壤中有机质丰富,植物根系活动强烈,且水热、通气状况良好,因而表层土壤微生物生物量最高。随着土层的加深,土壤有机质含量急剧下降,地下生物量也随着减少[39],郭明英等[40]的研究结果也支持这一结论。本研究所涉的土壤环境因子有限,而其他环境因子(土壤容重、土壤温度等)的不同可能也是影响土壤微生物量碳氮的重要因素,其对微生物量的影响需进一步研究。

## 4　结论

两种生境土壤 MBC、MBN 含量均表现出明显的垂直分布特征,即 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm,且草甸生境显著大于芦苇生境。在整个生长季节内,两种生境土壤微生物量碳、氮均大致呈现出“W”型变化格局,其变化幅度均随着土层的加深而减小,且草甸生境的变化幅度显著大于芦苇生境。

芦苇生境土壤 MBC 的限制性因子为土壤含水率、pH 值;土壤 MBN 的限制性因子为土壤含水率、有机碳、水解性氮、土壤 pH 值。草甸生境土壤 MBC 的限制性因子为土壤含水率、有机碳、有效磷、水解性氮;土壤 MBN 的限制性因子为土壤含水率、有

效磷。

**References:**


[1] Wang Y, Shen Q R, Shi R H, Huang D M. Soil microbial biomass and its ecological effects. Journal of Nanjing Agricultural University, 1996, 19(4): 45-51.

[2] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N, Zimmerman J K. Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. Plant and Soil, 2004, 260(1/2): 147-154.

[3] Ou W, Li Q, Liang W J, Jiang Y, Wen D Z. Effects of water regimes on soil biological properties in a paddy field. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 53-56.

[4] Classen A T, Overby S T, Hart S C, Koch G W, Whitham T G. Season mediates herbivore effects on litter and soil microbial abundance and activity in a semi-arid woodland. Plant and Soil, 2007, 295(1/2): 217-227.

[5] Bastida F, Barberá G G, García C, Hemández T. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions. Applied Soil Ecology, 2008, 38(1): 62-70.

[6] Huang P Y, Yu H X, Chai L H. Effects of artificial water supply on *Phragmites australis* growth in Zhalong wetland. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(1): 38-40.

[7] Tong S Z, Lü X G, Su L Y, Jiang M, Yao Y L. Changing process and the impact factors of wetland ecosystem in Zhalong wetland. Wetland Science, 2008, 6(2): 179-184.

[8] He R, Wang G B, Wang J S, Xu B F, Wang K J, Fang Y H, Shi Z, Yuan H H. Seasonal variation and its main affecting factors of soil microbial biomass under different vegetations along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 394-399.

[9] Wang G B, Ruan H H, Tang Y F, Luan Y L, Chen Y Q, Tao Z F. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 37-42.

[10] Wu Y S, Ma W L, Li H, Lü G F, Lu P. Seasonal variations of soil organic carbon and microbial biomass carbon in degraded desert steppes of Inner Mongolia. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 312-316.

[11] Bi M L, Yu W T, Jiang Z S, Zhou H, Shen S M. Effects of fertilization and soil management on microbial biomass and community. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(1): 32-42.

[12] Wan Z M, Song C C. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 951-956.

[13] Pei X C, Xu Y L, Wei W. A review on soil microorganisms in wetland ecosystem. Wetland Science, 2009, 7(2): 181-186.

[14] Guo Y D, He Y, Deng W, Zhang M X, Zhang G X. Research on eco-environmental water demand of Zhalong national natural wetlands. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 163-166, 174-174.

[15] Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(2): 63-66.

[16] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R L, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1167-1169.

[17] Joergensen R G, Brookes P C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 mol $K_2SO_4$ soil. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1023-1027.

[18] Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[19] Soil Science Society of China. Analysis Methods of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[20] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G, Jefferies R. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2843-2851.

[21] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.

[22] Liu M Q, Hu F, He Y Q, Li H X. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 937-944.

[23] Piao H C, Hong Y T, Yuan Z Y, Zhou J Y. Seasonal changes of soil microbial biomass carbon in soils under Karst areas of Guizhou Province. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(1): 106-110.

[24] Barbhuiya A R, Arunachalam A, Pandeyb H N, Arunachalam K, Khan M L, Nath P C. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest. European Journal of Soil Biology, 2004, 40(3/4): 113-121.

[25] Yang F, Wu J S, Qian X B, Wu L J. Dynamic changes of soil microbial biomass carbon in Phyllostachys praecox stand with different fertilizers. Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(1): 70-74.

[26] Li G H, Chen Q F, Huang Y M, An S S, Zheng F L, Chen L D. Soil microbial biomass C, N, P and basal respiration in rhizosphere soil of typical plants on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 976-983.

[27] He Y J, Wang Q K, Wang S L, Yu X J. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2292-2296.

[28] van Gestel M, Ladd J N, Amato M. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depth of undisturbed topsoil profiles. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(2): 103-111.

[29] Li D P, Wu Z J, Chen L J, Zhu P, Ren J, Liang C H, Peng C, Gao H J. Dynamics of microbial biomass P and its affecting factors in a long-term fertilized black soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1897-1902.

[30] Jia G M, Wang C Y, Cao J, Wang G. Microbial biomass in soil during secondary forest succession in Ziwuling, Northwest China. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(1):

80-83.
[31] Bardgett R D, Lovell R D, Hobbs P J, Jarvis S C. Seasonal changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperae grasslands. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(7): 1021-1030.
[32] Wang Y, Liu J S, Dou J X, Zhao G Y. Microbial biomass carbon dynamics and its influencing factors in typical *Deyeuxia angustifolia* wetland soil of Sanjiang Plain. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2009, 35(6): 691-698.
[33] Yang J S, Liu J S. Distribution characteristics of microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in *Deyeuxia angustifolia* marsh soils. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(8): 1544-1549.
[34] Guo Y D, Deng W, Pan J H. The characteristics of water eutrophication in Zhalong wetlands and strategy of environmental recovery. Ecology and Environment, 2003, 12(4): 393-397.
[35] Groeneweg J, Sellner B, Tappe W. Ammonia oxidation in Nitrosomonas at $NH_3$ concentrations near $K_m$: effects of pH and temperature. Water Research, 1994, 28(12): 2561-2566.
[36] Jin F H, Li S Q, Lu H L, Li S X. Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2739-2746.
[37] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. Forest Ecology and Management, 2005, 217(1): 117-125.
[38] Chen T H, Chiu C Y, Tian G L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest. Pedobiologia, 2005, 49(6): 645-653.
[39] Zhang Y W, Han J G, Han Y W, Niu Z L. The content of soil micro-biomass carbon and nitrogen of different grazing intensities on pasture. Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(4): 343-346.
[40] Bardgett R D, Leemans D K. The short-term effects of cessation of fertilizer applications, liming, and grazing on microbial biomass and activity in a reseeded upland grassland soil. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(2/3): 148-154.

**参考文献:**

[1] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. 南京农业大学学报, 1996, 19(4): 45-51.
[3] 欧伟, 李琪, 梁文举, 姜勇, 闻大中. 不同水分管理方式对稻田土壤生物学特性的影响. 生态学杂志, 2004, 23(5): 53-56.
[6] 黄璞祎, 于洪贤, 柴龙会. 人为补水对扎龙湿地芦苇生长的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 38-40.
[7] 佟守正, 吕宪国, 苏丽英, 姜明, 姚允龙. 扎龙湿地生态系统变化过程及影响因子分析. 湿地科学, 2008, 6(2): 179-184.
[8] 何容, 王国兵, 汪家社, 许波峰, 汪科继, 方燕鸿, 施政, 阮宏华. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子. 生态学杂志, 2009, 28(3): 394-399.
[9] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 栾以玲, 陈月琴, 陶忠芳. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态. 应用生态学报, 2008, 19(1): 37-42.
[10] 吴永胜, 马万里, 李浩, 吕桂芬, 卢萍. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物生物量碳含量的季节变化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 312-316.
[11] 毕明丽, 宇万太, 姜子绍, 周桦, 沈善敏. 施肥和土壤管理对土壤微生物生物量碳、氮和群落结构的影响. 生态学报, 2010, 30(1): 32-42.
[12] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展. 土壤通报, 2009, 40(4): 951-956.
[13] 裴希超, 许艳丽, 魏巍. 湿地生态系统土壤微生物研究进展. 湿地科学, 2009, 7(2): 181-186.
[14] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 张明祥, 章光新. 扎龙国家自然湿地生态环境需水量研究. 水土保持学报, 2004, 18(6): 163-166, 174-174.
[15] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进. 生态学杂志, 1999, 18(2): 63-66.
[18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
[22] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义. 土壤学报, 2003, 40(6): 937-944.
[23] 朴河春, 洪业汤, 袁芷云, 周竞业. 贵州喀斯特地区土壤中微生物量碳的季节性变化. 环境科学学报, 2000, 20(1): 106-110.
[25] 杨芳, 吴家森, 钱新标, 吴丽君. 不同施肥雷竹林土壤微生物量碳的动态变化. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 70-74.
[26] 李国辉, 陈庆芳, 黄懿梅, 安韶山, 郑粉莉, 陈利顶. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响. 生态学报, 2010, 30(4): 976-983.
[27] 何友军, 王清奎, 汪思龙, 于小军. 杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2292-2296.
[29] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 朱平, 任军, 梁成华, 彭畅, 高红军. 长期培肥黑土微生物量磷动态变化及影响因素. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1897-1902.
[30] 贾国梅, 王春燕, 曹靖, 王刚. 子午岭次生林恢复演替过程中土壤微生物量的变化动态. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 80-83.
[32] 王洋, 刘景双, 窦晶鑫, 赵光影. 三江平原典型小叶章湿地土壤微生物量碳的动态变化特征. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(6): 691-698.
[33] 杨继松, 刘景双. 小叶章湿地土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳的分布特征. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1544-1549.
[34] 郭跃东, 邓伟, 潘继花. 扎龙河滨湿地水体营养化污染特征及水环境恢复对策. 生态环境, 2003, 12(4): 393-397.
[36] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2739-2746.
[39] 张蕴薇, 韩建国, 韩永伟, 牛中联. 不同放牧强度下人工草地土壤微生物量碳、氮的含量. 草地学报, 2003, 11(4): 343-346.