洞庭湖典型湿地植被群落土壤微生物特征*

刘银银[1,2] 孙庆业[1] 李 峰[2] 谢永宏[1,2**]

([1]安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; [2]中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 洞庭湖湿地生态观测研究站, 长沙 410125)

摘 要 以洞庭湖湿地3种典型植被(虉草、苔草、芦苇)为对象,研究了不同植被下土壤微生物生物量和微生物呼吸等特征,并对其主要影响因子进行了分析。结果表明:微生物生物量碳、氮和微生物呼吸以虉草群落最高,苔草群落次之,芦苇群落最低,微生物碳熵变化趋势为虉草群落>苔草群落>芦苇群落,微生物呼吸熵具有与微生物碳熵相反的变化趋势。相关分析表明:土壤含水量、容重和有机质是影响土壤微生物特征变化的重要因子,同时,土壤pH和土壤总氮与土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物呼吸等也有较强的关联性。

关键词 微生物生物量碳; 微生物生物量氮; 微生物呼吸; 洞庭湖

中图分类号 S154.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)5-1233-05

Soil microbial characteristics of Dongting Lake wetlands with different typical vegetation communities. LIU Yin-yin[1,2], SUN Qing-ye[1], LI Feng[2], XIE Yong-hong[1,2**] ([1]*School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei* 230601, *China*; [2]*Institute of Subtropical Agriculture, Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1233-1237.

Abstract: Taking the Dongting Lake wetlands with three typical vegetations (*Phalaris arundinacea*, *Carex brevicuspis*, and *Phragmites australis*) as the objects, this paper studied their soil microbial characteristics, including microbial biomass carbon and nitrogen and microbial respiration, and analyzed the related main affecting factors. In the test wetlands, the soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN), soil microbial respiration, and the ratio of soil MBC to soil organic carbon (*q*MBC) were in the order of *P. arundinacea* > *C. brevicuspis* > *P. australis*, whereas the soil microbial metabolic quotient (qCO_2) had an opposite tendency to *q*MBC. The correlation analysis of the soil microbial characteristics and environmental factors showed that soil moisture content, bulk density, and organic matter content were the main environmental factors affecting the soil microbial characteristics, and soil pH and total nitrogen content also had strong relationships with the soil microbial characteristics.

Key words: microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen; microbial respiration; Dongting Lake.

土壤微生物是维持生态系统结构和功能稳定的重要组成部分,在维持系统物质转化、能量流动及污染物降解等生态过程中发挥重要作用。微生物对外界环境变化敏感,并对土壤质量变化、土壤养分周转速率等具有很好的指示作用。如微生物量碳的变化可以灵敏指示土壤有机碳的变化,同时微生物量碳和有机碳也是表征土壤肥力和土壤质量变化的重要指标(魏媛等, 2008; 刘恩科等, 2009)。土壤呼吸作用一直以来是衡量土壤微生物总活性的指标,也是作为评价土壤肥力的重要指标之一(刘明等, 2009)。

湿地生态系统中,微生物、土壤和植被共同组成微功能系统,植被为土壤微生物提供栖息地、氧气、

* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417005)和国家自然科学基金项目(31200271 和 31070325)资助。

** 通讯作者 E-mail: yonghongxie@163.com

收稿日期: 2012-10-25 接受日期: 2013-01-19

营养物质(凋落物和根系分泌物)等,土壤是微生物的栖息场所和物质能量来源,微生物分解有机质,合成酶类改善土壤环境,因此生态系统内微生物、植物和土壤关系交错复杂(Briones *et al.*, 2002)。梁月明等(2010)对喀斯特不同演替阶段微生物特征研究表明,影响微生物生物量和呼吸作用的主要环境因子是土壤养分(有机质和总氮),刘满强等(2003)对退化红壤不同植被恢复模式土壤微生物特征的研究发现,土壤微生物生物量与土壤有机质及其他养分(总氮、有效氮和有效磷)呈显著正相关。尽管当前国内外在森林、草地等系统中开展了大量微生物特征的研究,但有关淡水湿地不同植被群落下微生物特征及关键影响因子的研究仍较少。本文以中国第二大淡水湖泊——洞庭湖湿地为研究对象,对3种典型植被群落的土壤微生物特征进行了对比研究,并对其重要影响因子进行了分析,以期为洞庭湖湿地植被的保护、利用及湿地生态系统的管理提供一定的理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

洞庭湖(28°30′N—29°31′N, 111°40′E—113°10′E)是中国第二大淡水湖泊,位于湖南省北部、长江中游荆江南岸,总面积18780 km^2,天然湖泊面积为2625 km^2,该区属于亚热带季风湿润气候,年平均气温16.4~17.0 ℃,无霜期260~280 d,年平均降水量1200~1550 mm,年平均湿度80%。是我国典型的与长江干流并连的吞吐型湖泊,不但维系着湖区与长江中下游沿江地区的防洪安全,也是广大湖区人民赖以生存发展的重要基础(谢永宏和陈心胜, 2008)。

1.2 研究方法

洞庭湖湿地植被丰富,群落类型多样,植被演替模式较为复杂。典型的湿地植被群落有藨草(*Phalaris arundinacea*)、苔草(*Carex brevicuspis*)、辣蓼(*Polygonum hydropiper*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。洞庭湖湖岸平缓,由岸边向湖心逐渐倾斜,受水位梯度变化、洲滩的淤积抬高等环境的影响,植物群落呈现由藨草群落、苔草群落到芦苇群落的正向演替模式,同时植物群落沿水位梯度呈现明显的带状分布格局。本研究选择3个洞庭湖典型洲滩作为研究样地,洲滩所处区域分别为茶盘洲镇(28°54′14.6″N, 112°48′32.7″E)、北洲子农场(29°10′4.4″N, 112°47′33.1″E)和君山区(29°24′11.6″N,113°04′41.6″E)。3个样地中藨草、苔草和芦苇群落均呈明显的带状分布格局。

采样于2011年5月进行。具体方法如下:分别在3条植被带上设置4个5 m×5 m的样方进行取样,样方间隔50 m。每个样方内按照“S”型路线采集0~20 cm土层的样本5~8个,混合均匀后用灭菌自封袋带回实验室,土样分成2份,一份4 ℃冷冻干燥保存,一份风干研磨过筛。

土壤理化性质测定:电位法测土壤pH(水土比为1∶2.5),环刀法测土壤容重,质量法测土壤含水量,土壤全氮采用半微量开式法测定,土壤全磷采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法,全钾采用氢氧化钠碱熔法测定,重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量(刘光崧, 1996)。

土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸-K_2SO_4浸提法(Wu *et al.*, 1990)测定,提取液中碳和氮含量分别用有机碳分析仪(TOC2500,日本)和流动注射仪(Fiastar 5000,瑞典)分析。土壤呼吸作用分析使用碱液吸收-有机碳分析仪法,参照刘明等(2009)的方法有所修改,称取25 g新鲜土样平铺于500 mL培养瓶底部,每个培养瓶中放入一个盛有20 mL 1 mol·L^{-1} NaOH溶液的小烧杯,培养瓶加盖密封25 ℃恒温培养24 h,同时做空白对照,培养结束后取出小烧杯,溶液中碳浓度测定使用有机碳分析仪并计算CO_2释放量。

1.3 数据处理

以植被作为主因子,3个地点为重复对土壤微生物学特征进行方差分析,处理间多重比较采用Duncan检验进行,土壤微生物特征与土壤理化性质相关分析采用Pearson法。数据整理主要是通过Excel和SPSS 19.0软件包进行。

2 结果与分析

2.1 土壤理化特征

不同植被类型下土壤理化性质差异显著,具体表现为土壤pH和容重以藨草群落最低,芦苇群落最高,苔草群落介于二者之间($P<0.05$)。土壤含水量、总氮、总磷和有机质与pH、容重变化相反,藨草群落最高,其次是苔草和芦苇群落($P<0.05$)。而土壤总钾在各植物群落土壤中不具有差异显著性(表1)。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil samples

植被类型	pH	容重 (g·cm^{-3})	含水量 (%)	总氮 (g·kg^{-1})	总磷 (g·kg^{-1})	总钾 (g·kg^{-1})	有机质 (g·kg^{-1})
藨草	8.50±0.02 b	0.90±0.10 b	39.33±0.02 a	1.89±0.31 a	0.94±0.05 a	29.06±1.11 a	39.78±6.72 a
苔草	8.68±0.07 a	1.03±0.04 b	32.33±0.01 b	1.71±0.01 b	0.79±0.05 b	29.74±2.44 a	36.86±3.84 ab
芦苇	8.81±0.04 a	1.29±0.05 a	23.00±0.02 c	1.45±0.02 c	0.83±0.03 b	27.22±0.30 a	25.41±0.90 b

数值为平均值±标准误;不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

表 2 洞庭湖 3 种典型湿地植被土壤微生物特征

Table 2 Characteristics of soil microbial in three typical wetland vegetation communities in the Dongting Lake

植被类型	微生物量碳 (mg·kg^{-1})	微生物量氮 (mg·kg^{-1})	呼吸作用 (μg·g^{-1}·h^{-1})	微生物碳熵 (%)	微生物呼吸熵 (mg·g^{-1}·h^{-1})
藨草	344.12±55.00 a	171.15±5.44 a	8.10±0.61 a	0.65±0.08 a	25.10±2.62 b
苔草	240.34±25.89 ab	100.19±3.23 b	6.15±0.31 b	0.44±0.03 b	27.04±4.93 b
芦苇	146.28±11.17 b	54.88±2.30 c	4.64±0.48 b	0.34±0.04 b	34.75±1.36 a

表 3 土壤微生物量、微生物呼吸与土壤理化性质的相关性分析

Table 3 Correlation between soil microbial biomass, microbial respiration and soil physicochemical properties

	微生物量碳	微生物量氮	微生物呼吸	pH	含水量	总氮	总磷	总钾	有机质	容重
微生物量碳	1			−0.882**	0.916**	0.769*	0.496	0.223	0.942**	−0.910**
微生物量氮	0.903**	1		−0.883**	0.970**	0.960**	0.669	0.407	0.809*	−0.918**
微生物呼吸	0.894**	0.932**	1	−0.783**	0.904**	0.834**	0.684	0.552	0.789**	−0.974**
微生物碳熵	0.831*	0.923**	0.945**	−0.730**	0.893**	−0.850**	0.679	0.484	0.665	−0.926**
呼吸熵	−0.798*	−0.611	−0.517	0.825*	−0.705	−0.522	0.042	0.078	−0.914**	0.606

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, $n=9$。

2.2 微生物特征

微生物量碳以藨草群落最高(344.12 mg·kg^{-1}),其次是苔草群落(240.34 mg·kg^{-1})和芦苇群落(146.28 mg·kg^{-1}),差异达显著水平,芦苇群落微生物量碳含量仅为藨草群落的 42.51%(表 2)。微生物量氮以藨草群落(171.15 mg·kg^{-1})为最高,其次是苔草群落(100.19 mg·kg^{-1}),芦苇群落(54.88 mg·kg^{-1})微生物量氮含量最低。微生物呼吸作用的变化趋势同微生物量碳氮类似,藨草群落(8.10 μg·g^{-1}·h^{-1})>苔草群落(6.15 μg·g^{-1}·h^{-1})和芦苇群落(4.64 μg·g^{-1}·h^{-1}),差异达显著水平。

微生物碳熵和呼吸熵在不同植被群落类型差异达显著水平,微生物碳熵以藨草群落(0.65%)>苔草群落(0.44%)和芦苇群落(0.34%),芦苇群落微生物碳熵仅为藨草群落的 52.31%。微生物呼吸熵变化趋势与微生物碳熵相反,以芦苇群落(34.75 mg·g^{-1}·h^{-1})>苔草群落(27.04 mg·g^{-1}·h^{-1})和藨草群落(25.10 mg·g^{-1}·h^{-1})。

2.3 相关性分析

表 3 表明,微生物量碳、氮和微生物呼吸作用均与土壤含水量和有机质极显著正相关($P<0.01$),与土壤总氮显著正相关($P<0.05$),且微生物呼吸与总氮之间相关性达到极显著水平。同时微生物量碳、氮和微生物呼吸作用与土壤容重、pH 极显著负相关。且微生物量碳、氮与呼吸作用三者间极显著正相关。微生物量碳熵与土壤容重、总氮和 pH 极显著负相关,与含水量极显著正相关,同时与微生物量碳、氮和呼吸作用显著正相关。微生物呼吸熵与土壤有机质极显著负相关,与 pH 显著正相关,且与微生物量碳呈显著负相关关系。

3 讨 论

微生物量是土壤养分的储存库和植物生长可利用养分的重要来源,通常与呼吸作用一起用来指示土壤质量的变化(刘明等, 2009)。本研究表明,洞庭湖湿地土壤微生物量碳、氮、呼吸作用在不同植被类型下存在明显差异,具体为藨草群落各微生物特性高于苔草群落,苔草群落高于芦苇群落。同时本研究对 3 种植物土壤理化性质分析发现,土壤有机质和总氮、总磷呈现与微生物量一致的变化趋势,土壤容重、含水量呈现与微生物量相反的趋势,可见,土壤微生物量和土壤质量间存在明显的相关性,可以用来指示土壤环境的变化。这与王晓龙等

(2010)对鄱阳湖典型湿地植被的研究结果一致。洞庭湖典型湿地植物群落微生物量碳、氮含量在165.91~321.25、69.47~148.01 mg·kg^{-1},低于同期小叶章草甸湿地微生物量碳平均值(739.2 mg·kg^{-1}),与黄土高原农田耕作土壤8月微生物量碳、氮相近(杨继松和刘景双, 2009;王娟等, 2009)。微生物呼吸作用在5.01~7.57 μg·g^{-1}·h^{-1}范围内,高于同期喀斯特次生林和木伦林地呼吸的平均值(1.28和2.265 μg·g^{-1}·h^{-1})(杨刚等, 2008)。出现这种差异的原因一方面可能在于生态系统类型的差异性,另外一方面可能是由于采样时间等方面的差异所造成的。

微生物特性通常是由土壤(湿度、结构和温度等)和植被特性共同决定的,三者构成一个功能微系统。在不同系统间影响土壤微生物特征的关键因子存在明显差异。在森林生态系统,土壤有机质和总氮是显著影响微生物量碳、氮的关键因子。土壤微生物量碳、氮随着土壤有机质及土壤总氮含量的增加而显著增加,是由于土壤微生物量碳主要来源于土壤有机质,除了碳源,一定量的氮也是土壤微生物进行自身合成与代谢所必需的(张地等, 2012; Zhu *et al.*, 2012)。在农田生态系统,土壤温度是影响土壤呼吸作用的关键因子。当土壤温度高于0 ℃时,土壤呼吸与土壤温度呈显著二次曲线关系,土壤呼吸作用随着土壤温度的升高而增加(李荣平等, 2010)。而在九段沙盐沼湿地、高寒草甸等系统中的研究发现,含水量、有机质和pH是影响微生物的关键因子(王长庭等, 2008;贾建伟等, 2010)。本研究结果表明,土壤含水量、有机质和容重是影响洞庭湖湿地土壤微生物特性的重要因子,其次pH和土壤总氮对微生物特性也有显著影响。这与研究者在鄱阳湖和三江平原的研究结果一致(杨继松和刘景双, 2009; 王晓龙等, 2010)。

微生物量与土壤含水量正相关,已在很多研究中得到证明(王晓龙等, 2010;Peralta *et al.*, 2010),但相反的研究也有报道。如在长江口滩涂湿地和高寒草甸的研究发现,微生物量与土壤含水量呈显著负相关关系(杨成德等, 2007; 唐玉妹等, 2010)。实际上,在结构良好的土壤中,湿润土壤更有利于微生物生长,只有当含水量较高或淹水条件下才会限制微生物的生长和繁殖。近年来,受自然环境、土地利用方式变化及围湖造田等多方面影响,洞庭湖水文环境发生了明显变化,水位持续下降,导致土壤微生物量发生明显变化,进而对湿地植被的组成、生产力等产生明显影响(Horner-Devine *et al.*, 2003; 王晓龙等, 2010)。由于洞庭湖湿地的泥沙淤积作用,植物群落间具有明显的水位高程差,藨草群落地势低,淹水时间长,淹水频率高,土壤含水量显著大于苔草和芦苇群落,所以微生物量含量最高(李旭, 2010)。除含水量外,本研究还发现微生物量、呼吸作用与土壤有机质之间具有很好的相关性,说明土壤有机质对微生物的活动有重要影响。土壤有机质含量取决于地上植被凋落物的归还量和降解率(李旭林等, 2010),本研究发现,微生物量和呼吸作用在不同植被类型下显著差异,这主要是因为芦苇群落的落凋物和残体较藨草和苔草群落难分解,同时芦苇作为经济植物,对其收割移除在很大程度上减少了凋落物向土壤有机质的输入(赵先丽等, 2007)。研究发现,苔草群落和藨草群落有机质含量分别是芦苇群落的1.57和1.45倍。此外,藨草群落水淹时间长于苔草和芦苇群落,洪水期亦可以为土壤带来大量凋落物,进一步导致了藨草群落有机质含量高于苔草和芦苇群落。土壤有机质与微生物呼吸熵呈现负相关关系,因为在有机质丰富的土壤微生物对底物利用率高,维持相同的微生物活动所需要的能量较少(Chauhan & Ogram, 2006)。土壤营养(氮、磷、钾和有机质)是微生物的主要营养来源,本研究发现,土壤总磷、总钾与微生物特性相关性不显著,土壤总磷、总钾含量远远大于其他系统如农田、竹林等(李忠佩等, 2007; 孟庆杰等, 2008),说明在洞庭湖湿地土壤总磷、总钾不是影响微生物特性的限制因子。容重与微生物量、呼吸作用和微生物熵呈显著负相关,这与彭佩钦等(2005)的研究结果一致。实际上,土壤结构对微生物的活动影响极其显著,容重是表征土壤坚实度的指标,容重与土壤疏松透气程度和有机质含量呈反比,本研究的3种植物群落中,藨草群落土壤容重最小,因此其微生物量和呼吸作用最高。

除上述土壤理化性质外,微生物特性还受地上植被的影响,如生物多样性水平、根系生产力等。研究发现,土壤微生物量与植物地上生物量呈显著正相关(王晓龙等, 2010),同时,王洋等(2009)在小叶章湿地的研究发现,微生物量碳与土壤根系生物量具有线性关系,郑华等(2004)研究发现,微生物群落活性与根系生物量呈显著正相关,因为根际分泌物是土壤微生物的主要碳源之一,根系生物量高,

提供的碳源越多。可见,微生物活性是地上植被和土壤理化性质综合作用的结果。因此,后续的研究中在分析土壤理化性质与微生物特性的同时,应将地上植物群落特征、植物根系结构等与地下微生物特性结合起来,才能得到更清晰的结论。

参考文献

贾建伟, 王 磊, 唐玉妹, 等. 2010. 九段沙不同演替阶段湿地土壤微生物呼吸的差异性及其影响因素. 生态学报, **30**(7): 4529-4538.

刘恩科, 梅旭荣, 赵秉强, 等. 2009. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 中国农业大学学报, **14**(3): 63-68.

刘光崧. 1996. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社.

刘 明, 李忠佩, 路 磊, 等. 2009. 添加不同养分培养下水稻土微生物呼吸和群落功能多样性变化. 中国农业科学, **42**(3): 1108-1115.

李荣平, 周广胜, 王 宇. 2010. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应. 科学通报, **55**(13): 1247-1254.

刘满强, 胡 锋, 何园球, 等. 2003. 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, **40**(6): 937-944.

梁月明, 何寻阳, 苏以荣, 等. 2010. 喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中土壤微生物特性. 生态学杂志, **29**(5): 917-922.

李 旭. 2010. 洞庭湖典型湿地植被特征及其分布的环境解释(硕士学位论文). 长沙: 湖南农业大学.

李旭林, 郑康振, 周炎武, 等. 2010. 红树林恢复对潮滩表层沉积物氮素的影响. 生态学报, **30**(12): 3163-3172.

李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 2007. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化. 中国农业科学, **40**(8): 1712-1721.

孟庆杰, 许艳丽, 李春杰, 等. 2008. 不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响. 生态学杂志, **27**(7): 1134-1140.

彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 2005. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布. 水土保持学报, **19**(1): 49-53.

唐玉妹, 王 磊, 贾建伟, 等. 2010. 促淤等人为扰动对长江口滩涂湿地土壤微生物呼吸的影响. 生态学报, **30**(18): 5022-5032.

王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 2008. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化. 应用与环境生物学报, **14**(2): 225-230.

王 娟, 蔡立群, 毕冬梅, 等. 2009. 保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳全氮及微生物量碳氮的影响. 农业环境科学学报, **28**(7): 1516-1521.

王晓龙, 徐立刚, 姚 鑫, 等. 2010. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤微生物量特征. 生态学报, **30**(18): 5033-5042.

王 洋, 刘景双, 窦晶鑫, 等. 2009. 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), **35**(6): 691-698.

魏 媛, 喻理飞, 张金池. 2008. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物活性研究——以贵州花江地区为例. 中国岩溶, **27**(1): 63-67.

谢永宏, 陈心胜. 2008. 三峡工程对洞庭湖湿地植被演替的影响. 农业现代化研究, **29**(3): 684-687.

杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 等. 2007. 东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征. 草业学报, **16**(4): 62-68.

杨 刚, 何寻阳, 王克林, 等. 2008. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响. 土壤通报, **39**(1): 189-191.

杨继松, 刘景双. 2009. 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, **28**: 1544-1549.

张 地, 张育新, 曲来叶, 等. 2012. 海拔对辽东栎林地土壤微生物群落的影响. 应用生态学报, **23**(8): 2041-2048.

郑 华, 欧阳志云, 王效科, 等. 2004. 不同森林恢复类型对土壤微生物群落的影响. 应用生态学报, **15**(11): 2019-2024.

赵先丽, 周广胜, 周 莉, 等. 2007. 盘锦芦苇湿地凋落物土壤微生物量碳研究. 农业环境科学学报, **26**(1): 127-131.

Briones AM, Okabe S, Umemiya Y, *et al*. 2002. Influence of different cultivars on populations of ammonia-oxidizing bacteria in the root environment of rice. *Applied and Environmental Microbiology*, **68**: 3067-3075.

Chauhan A, Ogram A. 2006. Phylogeny of acetate-utilizing microorganisms in soils along a nutrient gradient in the Florida Everglades. *Applied and Environmental Microbiology*, **72**: 6837-6840.

Horner-Devine MC, Leibold MA, Smith VH, *et al*. 2003. Bacterial diversity patterns along a gradient of primary productivity. *Ecology Letters*, **6**: 613-622.

Peralta AL, Matthews JW, Kent AD. 2010. Microbial community structure and denitrification in a wetland mitigation bank. *Applied and Environmental Microbiology*, **76**: 4207-4215.

Wu JS, Joergensen RG, Pommerening B, *et al*. 1990. Measurement of soil microbial biomass-C by fumigation-extraction: An automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, **22**: 1167-1169.

Zhu H, He XY, Wang KL, *et al*. 2012. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, **51**: 1-7.

作者简介 刘银银,女,1986 年生,硕士研究生,主要从事湿地微生物生态研究。E-mail: liuyinyin44@163.com

责任编辑 魏中青