

鄱阳湖洲滩湿地植物演替对土壤微生物量的影响*

温秀婷^{1,2,3}, 郑博福^{1,3}, 陈晨晨¹, 龚磊强^{2,4}, 詹慧英^{2,4}, 余定坤^{2,4}, 朱致睿¹, 沈瑞昌^{1,2,3**}

(1: 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌大学资源与环境学院和生命科学院流域生态研究所, 南昌 330031)

(2: 江西鄱阳湖湿地保护与恢复国家长期科研基地, 江西鄱阳湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 南昌 330031)

(3: 南昌大学教育部流域碳中和教育部工程研究中心, 江西生态文明研究院, 南昌 330031)

(4: 江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局, 南昌 330038)

摘要: 湿地植物演替对土壤微生物量具有显著影响, 但不同土壤理化环境下的植物演替对湿地土壤微生物量影响的具体差异还不清楚。以鄱阳湖土壤理化性质不同的 4 个碟形子湖(包括相对肥沃的东湖和白沙湖以及相对贫瘠的蚌湖和大湖池)为研究对象, 运用空间代替时间的方法, 在泥滩带、湿生植被带(苔草)和挺水植被带(南荻或芦苇)采集 0~10 cm 表层土壤, 分析不同土壤理化性质条件下植物群落演替对土壤微生物量的影响。采用土壤微生物量碳(MBC)和微生物熵(qMB)指示土壤微生物量。蚌湖、大湖池、东湖和白沙湖洲滩湿地表层土壤 MBC 的平均值分别为 1077.27、888.29、942.45 和 1162.46 mg/kg, 土壤 qMB 的平均值分别为 6.07%、6.17%、3.60% 和 3.79%。在泥滩-苔草-南荻植物演替洲滩, 土壤 MBC 先增加后减少; 但是在泥滩-苔草-芦苇植物演替洲滩, 土壤 MBC 持续增加。植物演替没有显著改变土壤 qMB。尽管植物的生长会增加所有洲滩湿地的土壤 MBC, 但增加的幅度在相对贫瘠的蚌湖和大湖池明显强于相对肥沃的东湖和白沙湖。蚌湖和大湖池的土壤 qMB 也显著高于东湖和白沙湖。在植被演替梯度上, 洲滩湿地土壤 MBC 和 qMB 普遍受到土壤碳、氮、磷含量和 pH 的影响, 但是不同洲滩湿地影响微生物量的关键元素并不相同。这些结果证明植物演替对湿地土壤微生物量的影响不仅与植物物种有关, 还受土壤理化环境的影响。本研究将为认识湿地土壤微生物量的变化机制和科学管理长江中下游湖泊湿地提供依据。

关键词: 植物演替; 土壤微生物; 微生物量碳; 微生物熵; 鄱阳湖

Effects of vegetation succession on soil microbial biomass at the lakeshore wetlands of Lake Poyang, China*

Wen Xiuting^{1,2,3}, Zheng Bofu^{1,3}, Chen Chenchen¹, Gong Leiqliang^{2,4}, Zhan Huiying^{2,4}, Yu Dingkun^{2,4}, Zhu Zhirui¹ & Shen Ruichang^{1,2,3**}

(1: Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Center for Watershed Ecology, School of Life Science and School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, P.R. China)

(2: Jiangxi Poyang Lake Wetland Conservation and Restoration National Permanent Scientific Research Base, National Ecosystem Research Station of Jiangxi Poyang Lake Wetland, Nanchang 330031, P.R. China)

(3: Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutralization, Ministry of Education, Jiangxi Institute of Ecological Civilization, Nanchang University, Nanchang 330031, P.R. China)

(4: Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve Authority, Nanchang 330038, P.R. China)

Abstract: Vegetation succession can significantly affect soil microbial biomass, yet how soil physicochemical variables impact the

* 2023-08-23 收稿; 2023-11-17 收修改稿。

国家自然科学基金项目(32160308, 42061022)、江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBG74S01)、江西省自然科学基金面上项目(20232BAB205018)和南昌大学江西省财政科技专项“包干制”试点示范项目(ZBG20230418020)联合资助。

** 通信作者; E-mail: shenruichang@ncu.edu.cn。

relationship between vegetation succession and soil microbial biomass is not well understood. The current study investigated the effects of vegetation succession on soil microbial biomass at various soil environments based on the “space-for-time” assumption at the lakeshore wetlands of Lake Poyang, China. We collected soil samples at 0–10 cm depth increment at mudflat belts, hygrophilous vegetation belts, and emergent vegetation belts on four typical lakeshore wetlands (including Lake Banghu and Lake Dahuchi which had barren soils and Lake Donghu and Lake Baishahu which had fertile soils). Soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial quotients (qMB) were used to indicate soil microbial biomass. Lakeshore wetlands at Lake Banghu, Lake Dahuchi, Lake Donghu and Lake Baishahu had average soil MBC of 1077.27, 888.29, 942.45 and 1162.46 mg/kg, respectively, and mean soil qMB of 6.07%, 6.17%, 3.60% and 3.79%, respectively. Along the mudflat-*C. cinerascens*-*M. lutarioriparius* succession, soil MBC firstly increased and then decreased. However, along the mudflat-*C. cinerascens*-*P. australis* succession, soil MBC continually increased. Vegetation succession did not significantly influence soil qMB. Although plant growth promoted soil MBC at all lakeshore wetlands, the increments at two relatively infertile lakeshore wetlands (Lake Banghu and Lake Dahuchi) were much higher than those at two relatively fertile lakeshore wetlands (Lake Donghu and Lake Baishahu). Soil qMB at Lake Banghu and Lake Dahuchi were significantly higher than those at Lake Donghu and Lake Baishahu. Soil MBC and qMB were determined by soil pH and soil carbon, nitrogen or phosphorus contents, but the key elements were varied among the four lakeshore wetlands. The results proved that the effects of vegetation succession on wetland soil microbial biomass not only depended on plant species, but also had close relationships with soil physicochemical variables. Our study was helpful for understanding the change mechanism of soil microbial biomass in wetland ecosystem, and could be used to improve the management in the floodplain lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: Vegetation succession; soil microorganism; microbial biomass carbon; microbial quotients; Lake Poyang

湿地土壤是陆地生态系统最重要的有机碳库之一^[1-2]。虽然湿地只占陆地面积的4%~6%,但是湿地土壤有机碳储量占陆地土壤有机碳储量的20%~30%^[3-4]。微生物是湿地土壤生物地球化学循环过程的重要组成部分,是土壤有机碳的主要分解者,在湿地土壤有机碳库的维持和稳定过程中起到了明显的作用^[5]。土壤微生物量作为表征土壤微生物含量的关键指标,已经成为众多生态系统碳循环模型的重要参数之一^[6]。深入探索湿地土壤微生物量的变化特征和影响机制对认识湿地土壤碳循环过程和固碳价值具有重要意义。

湿地土壤微生物量对外界环境的变化十分敏感,受到众多因素的影响,植物群落差异是其中重要的影响因素之一^[7-8]。在气候变化和人类活动影响下,湿地的水文节律正在剧烈变化,湿地植被也在发生明显演替^[9-10]。因此,许多学者采用空间代替时间等方法研究了湿地植被演替对土壤微生物量的影响^[11-12]。例如,何冬梅等^[12]发现植被演替是影响江苏滨海湿地土壤微生物生物量碳分布和动态特征的主要因素之一,而土壤有机质、含水率和pH是直接影响土壤微生物量的关键性因子。植物通过凋落物和根际分泌物向土壤输入大量有机碳,是湿地土壤微生物的主要碳源。微生物在土壤中并不是均匀分布的,绝大多数土壤微生物分布于植物根际附近^[13]。植物可以通过影响土壤有机碳的供应进而影响土壤微生物量^[14]。植物与微生物对土壤营养元素具有明显的竞争关系,所以植被的差异将影响微生物营养元素的丰富度,进而改变土壤微生物量^[15]。植被的生长还可以影响湿地土壤氧化还原电位和pH等土壤理化性质,改变不同类群微生物的生长状况,最终改变土壤微生物量^[16]。然而,现有的研究还较少考虑不同的土壤环境下湿地植物演替对湿地土壤微生物量的影响。土壤有机碳和营养元素等本底环境的差异对植物和土壤微生物都有显著影响,很可能影响湿地植被演替过程中土壤微生物量的变化特征。

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,对长江中下游地区的生态安全具有重要价值。近年来,鄱阳湖水文节律明显改变,枯水期提前并延长^[17]。与之相应的是,鄱阳湖洲滩植被正在发生演替,植被带明显下移^[18]。虽然部分文章报道了不同植被带土壤微生物量的差异^[7]。然而鄱阳湖洲滩湿地面积巨大,不同区域土壤理化性质差异明显,同样的植被演替也可能对土壤微生物量产生不同的影响。明确不同土壤环境条件下植被演替对土壤微生物量的影响差异对于预测未来鄱阳湖洲滩湿地土壤碳储量和碳汇价值具有十分重要的意义。因此,本文在鄱阳湖湿地选择土壤有机碳和营养条件差异明显的4个典型洲滩湿地,采用空间代替时间的方法,深入研究了不同土壤条件下植被演替对土壤微生物量的影响及机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖湿地(28°11'~29°51'N,115°49'~116°46'E)位于长江中下游平原,江西省北部。鄱阳湖湿地处于亚热带季风气候区,夏季炎热多雨,冬季低温少雨,年平均降水量1450~1550 mm,主要分布在4—6月之间,年平均气温17.5℃。鄱阳湖水位年内变化显著,变幅超过10 m。鄱阳湖星子站夏季水位可达22 m以上,然而冬季水位只有10 m以下。因此,鄱阳湖在枯水期形成了面积巨大的洲滩湿地。由于淹水时长的差异,鄱阳湖洲滩湿地从湖心至湖岸形成了许多带状植被带。在枯水季节,这些植被带主要包括泥滩带(丰水期可能生长水生植物)、湿生植被带(以苔草(*Carex cinerascens*)为主)和挺水植被带(包括南荻(*Miscanthus lutarioriparius* L. Liu ex Renvoize & S. L. Chen)或芦苇(*Phragmites australis* (Cavanilles) Trinius ex Steudel)等)^[19]。苔草和藨草的最适淹水时长分别为120~180天和180~210天,而芦苇和南荻的最适淹水时长分别为90~120天和60~90天^[20]。

1.2 样地设置与样品采集

选择鄱阳湖4个典型洲滩湿地作为研究对象,它们分别是位于西北部的蚌湖和大湖池以及西南部的东湖和白沙湖,其分布如图1所示。在每个研究样地的泥滩带、湿生植被带和挺水植被带各建立一条平行于湖岸的200 m样线。蚌湖和东湖的挺水植被带为芦苇群落,大湖池和白沙湖的挺水植被带为南荻群落。4个研究样地的湿生植被带都是苔草群落。在每条样线设置8个1 m×1 m的样方,每个相邻样方距离约20 m。因此,在4块洲滩湿地设置12条样线,每个样线设置8个重复样方,总共96个1 m×1 m样方。土壤样品采集于2020年11月的枯水期。用直径为7 cm的土钻,在每个样方中沿对角线采集3钻0~10 cm的土壤样品。

1.3 实验室分析

土壤样品运回实验室后,充分混匀,手工去除土壤中的杂质碎石、贝类、植物根等。称取100 g土壤存放于4℃冰箱,用于测量土壤含水量(SM)、pH、MBC、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和溶解性有机碳(DOC)等。剩余土壤风干后过2 mm筛,用于测定其他土壤理化指标。

采用土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)(土壤活体微生物中的碳元素含量)和微生物熵(microbial quotient, qMB)(微生物量碳占土壤有机碳的比例)指示土壤微生物量^[6,21]。MBC的测定方法为底物诱导呼吸法(Substrate-induced respiration method, SIR)^[22-23]。称取相当于干土重20 g的鲜土于150 mL的玻璃瓶中,每个样品加入0.12 g的葡萄糖粉剂(葡萄糖:滑石粉为1:4)并充分搅拌,在25℃下用红外气体分析仪记录土壤样品的二氧化碳释速率,每个样品重复测定两次。最后,运用以下公式计算土壤MBC和qMB^[22]:

$$MBC = 40R + 0.37 \quad (1)$$

$$qMB = MBC/SOC \quad (2)$$

式中,MBC为土壤微生物生物量碳,mg/kg;R为二氧化碳的释放速率,mL/(kg·h);qMB为土壤微生物熵,%;SOC为土壤有机碳,mg/kg。

测定的其他土壤理化参数包括SM、pH、SOC、总氮(TN)、总磷(TP)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和DOC等。SM采用烘干法测定。土壤pH用电位法测定(水土比为2.5:1)。SOC含量采用重铬酸钾氧化法测定。TN采用凯氏定氮法测定。TP采用紫外分光光度计,通过钼蓝比色法测定。NH₄⁺-N和NO₃⁻-N用1 mol/L的KCl溶液浸提(水土比为1:5),采用连续流动分析仪(Skalar san++, Skalar, 荷兰)测定。DOC采用超纯水(水土比为1:5)浸提,用总有机碳分析仪(Elementar, Hanau, 德国)测定。

1.4 数据处理与分析

采用双因素方差分析检验植被和子湖对土壤MBC、qMB及其他土壤理化参数的影响。利用相关分析明确洲滩湿地土壤MBC和qMB与土壤物理化学性质的相关性。采用逐步多元回归分析确定各个子湖土壤MBC和qMB的影响因素。统计分析利用SPSS 22.0(IBM, USA)软件完成。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

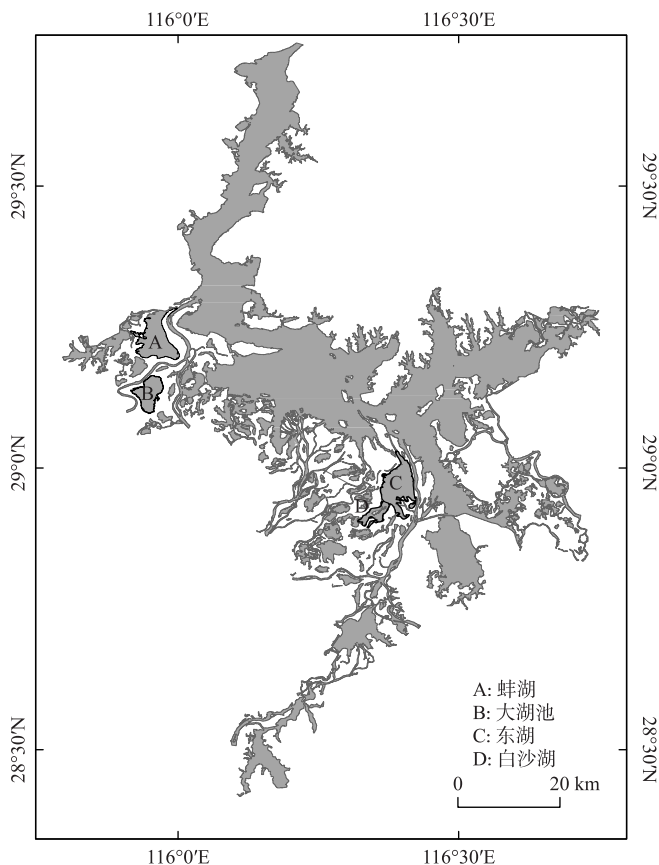


图 1 鄱阳湖 4 块典型洲滩湿地分布

Fig.1 Distribution of four typical lakeshore wetlands at Lake Poyang

2 结果

2.1 土壤 MBC 和 qMB

蚌湖、大湖池、东湖和白沙湖洲滩湿地表层土壤 MBC 的平均值分别为 1077.27、888.29、942.45 和 1162.46 mg/kg。植被带差异显著地影响了表层土壤 MBC(图 2)。总体上讲,湿生植被带和挺水植被带的土壤 MBC 明显高于泥滩带($P<0.001$),但湿生植被带和挺水植被带两间之间没有显著差异($P=0.887$)。各子湖洲滩湿地土壤 MBC 之间也有差异,主要是大湖池湿地低于白沙湖($P=0.016$)。植被带与子湖有显著的交互作用($P<0.001$),表明植被对土壤 MBC 的影响在不同子湖之间存在明显差异。在泥滩带—湿生植被带—挺水植被带的演替梯度上,蚌湖和东湖的土壤 MBC 稳定增加,而大湖池和白沙湖是先增加后下降。此外,各个子湖湿生植被带土壤 MBC 均显著高于泥滩带,但是东湖(31.98%)和白沙湖(53.70%)的增加幅度明显低于蚌湖(91.99%)和大湖池(96.00%)。

蚌湖、大湖池、东湖和白沙湖洲滩湿地表层土壤 qMB 的平均值分别为 6.07%、6.17%、3.60% 和 3.79%。植被带对土壤 qMB 的影响并不显著($P=0.356$),但是子湖的影响非常显著($P<0.001$)(图 2)。蚌湖和大湖池的土壤 qMB 显著高于东湖和白沙湖。植被与子湖对土壤 qMB 的交互作用不显著($P=0.551$)(图 2)。

2.2 土壤理化因素

土壤理化因素受植被和子湖的显著影响(表 1)。在空间上,不同子湖的 SOC、TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、DOC、SM 和 pH 存在显著差异。西南部的东湖和白沙湖比西北部的蚌湖和大湖池具有较高的 SOC、TN、 NH_4^+ -N、

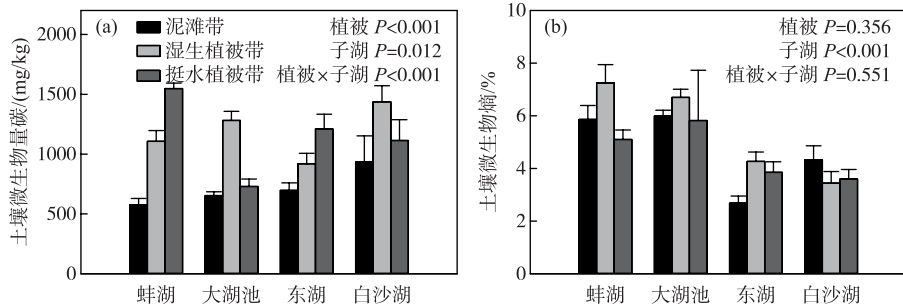


图 2 洲滩湿地各植被带土壤微生物量的差异 (误差棒为标准误差, n = 8)

Fig.2 Differences in soil microbial biomass in various vegetation zones of lakeshore wetland

DOC 和 SM。植被的单独作用以及与子湖的交互作用对每个土壤理化因子都有显著影响。总体上,植被演替增加了 SOC、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 DOC,降低了土壤 pH。

表 1 鄱阳湖洲滩湿地土壤理化性质的差异*

Tab.1 Differences in soil physicochemical properties at the lakeshore wetlands of Lake Poyang

子湖	植被带	SOC/ (mg/g)	TN/ (mg/g)	TP/ (mg/g)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	DOC/ (mg/kg)	SM/%	pH
蚌湖	泥滩带	9.91±0.60	1.26±0.08	0.37±0.02	2.31±0.20	16.27±1.53	50.61±7.42	43.26±2.99	5.54±0.05
	湿生植被带	16.50±2.34	1.76±0.23	0.36±0.07	4.95±0.54	24.22±2.75	54.36±4.96	41.25±3.17	5.31±0.25
	挺水植被带	31.37±2.37	3.05±0.23	0.44±0.03	16.37±1.40	32.22±2.79	118.09±11.16	57.45±2.98	4.90±0.06
大湖池	泥滩带	10.94±0.40	1.29±0.05	0.43±0.02	4.25±0.45	25.73±2.38	78.52±5.28	49.69±3.10	6.08±0.06
	湿生植被带	19.12±0.69	2.16±0.03	0.73±0.02	9.45±1.04	48.39±6.70	109.64±4.73	89.80±6.99	5.38±0.05
	挺水植被带	21.09±4.18	2.22±0.39	0.45±0.05	20.71±3.09	28.30±5.68	76.95±11.26	35.88±3.66	5.95±0.30
东湖	泥滩带	26.40±1.30	2.35±0.19	0.66±0.02	9.85±1.84	29.16±6.29	101.95±4.08	61.37±5.34	6.62±0.14
	湿生植被带	23.18±3.68	2.29±0.32	0.53±0.05	5.51±1.62	35.72±6.27	86.69±6.66	76.85±11.85	5.99±0.13
	挺水植被带	32.79±3.61	2.97±0.31	0.60±0.04	21.67±2.76	71.16±9.09	149.78±16.38	77.77±18.89	4.73±0.27
白沙湖	泥滩带	24.46±6.95	2.69±0.61	0.49±0.06	4.30±0.48	39.05±14.55	143.64±13.31	255.68±13.30	5.81±0.32
	湿生植被带	47.40±7.55	4.38±0.70	0.62±0.06	5.49±0.38	85.94±12.93	123.25±18.89	230.23±39.94	5.50±0.09
	挺水植被带	32.14±6.22	2.95±0.49	0.59±0.05	4.18±0.48	59.53±12.96	176.54±16.08	143.26±33.38	5.48±0.18
P	植被	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001
	子湖	<0.001	0.002	0.070	<0.001	<0.001	<0.001	0.042	<0.001
	植被×子湖	0.005	0.013	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	0.018	<0.001

* 数值为平均值±标准误差, n = 8。

2.3 土壤 MBC 和 qMB 的影响因素分析

4 个碟形子湖的土壤 MBC 与土壤理化因素具有相近的相关关系(表 2)。土壤 MBC 在多数子湖与 SOC、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关关系。此外,蚌湖和大湖池土壤 MBC 还与 DOC 和 SM 呈显著正相关,大湖池土壤 MBC 与土壤 TP 呈显著正相关。土壤 qMB 与土壤理化性质的相关关系明显弱于土壤 MBC。在多数湖泊,土壤 qMB 与 SOC、TN 和 NO₃⁻-N 呈负相关关系。在部分湖泊,土壤 qMB 还与土壤 TP、SM 和 pH 呈负相关关系。

土壤 MBC 的回归方程的决定系数介于 0.66~0.85 之间(表 3)。土壤 qMB 回归方程的决定系数明显低于土壤 MBC 回归方程,介于 0.39~0.67 之间。各个湖泊土壤 MBC 和 qMB 的影响因素具有一定的相似性,土壤碳、氮、磷(C、N、P)含量和 pH 对土壤 MBC 和 qMB 起到决定性作用(表 3)。但是影响土壤 MBC 和 qMB

表2 土壤微生物量与土壤理化性质的相关分析

Tab.2 Correlation results of soil microbial biomass with soil physicochemical properties

微生物参数	子湖	SOC	TN	TP	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DOC	SM	pH
MBC	蚌湖	0.90**	0.87**	0.20	0.86**	0.82**	0.62**	0.55**	-0.56**
	大湖池	0.40	0.45*	0.86**	0.03	0.63**	0.57**	0.85**	-0.59**
	东湖	0.63**	0.68**	0.17	0.62**	0.75**	0.26	0.14	-0.76**
	白沙湖	0.82**	0.79**	0.29	0.68**	0.80**	-0.23	-0.05	-0.73**
qMB	蚌湖	-0.53**	-0.56**	-0.52**	-0.41*	-0.24	-0.18	-0.53**	-0.04
	大湖池	-0.69**	-0.66**	-0.21	-0.57**	-0.13	-0.32	-0.03	-0.42*
	东湖	-0.45*	-0.34	-0.69**	-0.09	0.04	-0.27	0.16	-0.24
	白沙湖	-0.59**	-0.45*	-0.30	-0.47*	-0.22	0.05	-0.02	-0.20

** 表示极显著相关, $P < 0.01$; * 表示显著相关, $P < 0.05$ 。加粗字体表示土壤微生物量碳或微生物熵与理化因子间有显著相关性。

的因素随子湖的差异有明显的不同。SOC 在蚌湖和白沙湖对土壤 MBC 有显著作用, 在大湖池和白沙湖对土壤 qMB 有显著影响; TN 在东湖对土壤 MBC 有显著影响, 在蚌湖对 qMB 有显著影响; TP 在蚌湖和大湖池对土壤 MBC 有显著影响, 在东湖对土壤 qMB 有显著影响(表 3)。

表3 土壤微生物量的多元回归分析模型^a

Tab.3 Regression models of soil microbial biomass

微生物参数	子湖	公式	R_{adj}^2	F	P
MBC	蚌湖	$MBC = 579.69 + 41.44 SOC - 770.68 TP$	0.83	58.43	<0.001
	大湖池	$MBC = 928.78 + 5.52 SM + 742.28 TP - 130.79 pH$	0.82	34.76	<0.001
	东湖	$MBC = 1672.22 - 195.26 pH + 157.34 TN$	0.66	23.41	<0.001
	白沙湖	$MBC = 2860.46 + 15.60 SOC - 399.96 pH$	0.85	64.01	<0.001
qMB	蚌湖	$qMB = 16.19 - 1.39 TN - 1.39 pH$	0.39	8.24	0.002
	大湖池	$qMB = 25.20 - 0.28 SOC - 2.47 pH$	0.67	23.95	<0.001
	东湖	$qMB = 7.56 - 6.64 TP$	0.46	20.43	<0.001
	白沙湖	$qMB = 11.83 - 0.05 SOC - 1.13 pH$	0.55	14.90	<0.001

3 讨论

鄱阳湖湿地蚌湖、大湖池、东湖和白沙湖洲滩湿地表层土壤 MBC 的平均值分别为 1077.27、888.29、942.45 和 1162.46 mg/kg。相较于以前文献报道的鄱阳湖洲滩湿地土壤 MBC (66~2000 mg/kg), 本研究的结果处于中等偏上的水平^[7,24-27]。例如, 江玉梅等^[24]发现鄱阳湖区南矶湿地和常湖池湿地土壤 MBC 介于 200~2000 mg/kg 之间。Wang 等^[26]显示鄱阳湖湿地不同植被带秋季土壤 MBC 介于 152~848 mg/kg 之间。本研究采用 SIR 而非氯仿熏蒸方法测定土壤 MBC。由于水分的干扰, 氯仿熏蒸方法可能低估水淹湿地土壤的 MBC 含量^[28]。与泥滩带相比, 湿生植被带和挺水植被带表层土壤具有更高的 MBC (图 2), 表明随着水位的下降, 泥滩带向湿生植被带和挺水植被带演替, 鄱阳湖湿地土壤 MBC 将明显增长。这一现象可能与洲滩湿地水分条件有关。湿生植被带和挺水植被带具有更长的非淹水期, 土壤氧气的有效性更高, 更适宜微生物的生长, 从而使这两个植被带具有更高的土壤微生物量。本结果可能还与洲滩植被的碳输入有关^[29]。鄱阳湖洲滩湿地中的苔草、芦苇和南荻群落都具有非常高的生物量, 这些植被会通过凋落物和根系分泌物向土壤输入大量的有机碳^[30]。例如, 汪琴等^[31]发现鄱阳湖南矶湿地春季生长旺盛期苔草群落、芦苇群落和南荻群落的生物量碳储量达到 581.37、300.89 和 417.54 g/m²。土壤微生物可以利用有机碳生长, 从而增加土壤微生物量^[32]。在演替顺序为泥滩-苔草-南荻的大湖池和白沙湖, 土壤 MBC 先上升后下降, 而在演替顺序为泥滩-苔草-芦苇的蚌湖和东湖, 土壤 MBC 持续上升(图 2)。这些结果显示占有相近生态位的不同植

物物种(如,南荻和芦苇)也会对土壤微生物量产生不同的影响^[11]。张全军等^[33]发现鄱阳湖湿地芦苇、南荻和苔草枯落物的分解速率并不一致,呈现芦苇>苔草>南荻的规律。土壤微生物可以更好地利用芦苇和苔草枯落物,而利用南荻枯落物的能力较差。因此,芦苇和苔草群落具有较高的土壤 MBC,而南荻群落具有较低的土壤 MBC。植被的差异并不显著影响土壤 qMB(图 2),显示植被演替并没有改变土壤微生物量碳占土壤有机碳的比例。这说明植被演替主要是通过影响土壤微生物的碳源供应(即 SOC 含量)来改变鄱阳湖湿地土壤 MBC,而不是影响土壤微生物对 SOC 的使用效率。

4 个子湖水生植被带土壤 MBC 均显著高于泥滩带,但是东湖(31.98%)和白沙湖(53.70%)的增加幅度明显低于蚌湖(91.99%)和大湖池(96.00%)(图 2)。同时,东湖和白沙湖的土壤 qMB 显著高于蚌湖和大湖池。这些结果证明土壤微生物量对植被演替的响应受到了子湖土壤理化因素的影响。东湖和白沙湖位于鄱阳湖西南部,每年可以从赣江中获得大量的沉积物,具有较高的土壤有机碳和营养元素含量(表 1)^[34]。蚌湖和大湖池位于鄱阳湖西北部,从修河和赣江中获得的沉积物较少,具有较低的土壤有机碳和营养元素含量(表 1)^[34]。因此,贫脊土壤的植被演替对土壤 MBC 的影响明显强于肥沃土壤。在贫脊土壤中,微生物受碳源的抑制作用很大,植被的碳输入直接缓解了微生物的碳源限制,可以直接促进微生物的生长^[14]。在肥沃土壤中,微生物受碳源的抑制作用并不明显,植物只能通过改善土壤结构和营养元素含量提高土壤微生物量^[35]。肥沃土壤的 qMB 低于贫脊土壤的结果与前人研究结果一致^[36]。在碳源丰富的土壤中,微生物的生长可能受到其他营养元素的限制,并不能最大限度地利用土壤有机碳。

4 个子湖洲滩湿地土壤 MBC 和 qMB 与土壤理化因素的相关关系具有明显的相似性。土壤 C、N、P 含量和 pH 对 4 个子湖土壤 MBC 和 qMB 有明显的影响。土壤 C、N、P 含量与 MBC 呈正比,与土壤 qMB 呈负相关。土壤 pH 则与土壤 MBC 和 qMB 呈负相关关系。这些结果可能都与植物的生长有关^[37]。植物的生长会富集土壤中的 C、N、P 并降低土壤 pH 值,改善微生物的基质供应、营养元素丰富度和生存环境,进而提高土壤 MBC 含量^[37]。另一方面,随着土壤 C、N、P 含量的增加,微生物的生长往往会受到其他因素的制约,其生物量并不会同步增加,从而降低土壤 qMB 含量^[38]。然而,回归分析还表明,不同的子湖之间影响土壤 MBC 和 qMB 的元素并不相同。SOC 在蚌湖和白沙湖对土壤 MBC 有显著作用,在大湖池和白沙湖对土壤 qMB 有显著影响;TN 在东湖对土壤 MBC 有显著影响,在蚌湖对土壤 qMB 有显著影响;而 TP 在蚌湖和大湖池对土壤 MBC 有显著影响,在东湖对土壤 qMB 有显著影响。这些结果进一步证实,土壤理化环境的差异会改变土壤微生物量对植被演替的响应。在不同的洲滩湿地中,由于土壤各类元素含量和比例的差异,土壤微生物的生长受限制的元素并不相同,从而改变土壤 MBC 和 qMB 的影响机制^[32]。

4 结论

1) 植被演替能显著影响鄱阳湖洲滩湿地的土壤微生物量。在泥滩—苔草—南荻植物演替洲滩,土壤 MBC 先增加后减少;但是在泥滩—苔草—芦苇植物演替洲滩,土壤 MBC 持续增加。

2) 植物的演替作用对鄱阳湖洲滩湿地土壤 qMB 没有显著影响。

3) 植物生长对贫脊土壤的微生物量的促进作用明显强于肥沃土壤。

4) 洲滩湿地土壤微生物量都受到土壤 C、N、P 元素含量和 pH 的影响,但是不同洲滩湿地的关键元素有明显差异。

5 参考文献

- [1] Temmink RJM, Lamers LPM, Angelini C *et al.* Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots. *Science*, 2022, **376**(6593): eabn1479. DOI: 10.1126/science.abn1479.
- [2] Dargie GC, Lewis SL, Lawson IT *et al.* Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 2017, **542**: 86-90. DOI: 10.1038/nature21048.
- [3] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ *et al.* Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, **298**(5870): 156-159. DOI: 10.1038/298156a0.
- [4] Mitra S, Wassmann R, Vlek PLG. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 2005, **88**(1): 25-35. DOI: 10.1073/pnas.0408999101.

- [5] Liang C, Schimel JP, Jastrow JD. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, **2** (8): 17105. DOI: 10.1038/nmicrobiol.2017.105.
- [6] Shen RC, Xu M, Li RQ *et al.* Spatial variability of soil microbial biomass and its relationships with edaphic, vegetational and climatic factors in the Three-River Headwaters Region on Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2015, **95**: 191-203. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.06.011.
- [7] Wang XL, Xu LG, Yao X *et al.* Analysis on the soil microbial biomass in typical hygrophilous vegetation of Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(18): 5033-5042. [王晓龙, 徐立刚, 姚鑫等. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤微生物量特征. 生态学报, 2010, **30** (18): 5033-5042.]
- [8] Liu YY, Sun QY, Li F *et al.* Soil microbial characteristics of Dongting Lake wetlands with different typical vegetation communities. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1233-1237. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0215. [刘银银, 孙庆业, 李峰等. 洞庭湖典型湿地植被群落土壤微生物特征. 生态学杂志, 2013, **32**(5): 1233-1237.]
- [9] Li F, Xie YH, Chen XS *et al.* Influence with its regulating mechanism of the Three Gorge Dam operation on plant distributing patterns in the Dongting Lake. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 937-944. DOI: 10.13872/j.1000-0275.2018.0085. [李峰, 谢永宏, 陈心胜等. 三峡工程运行对洞庭湖湿地植被格局的影响及调控机制. 农业现代化研究, 2018, **39**(6): 937-944.]
- [10] Wang SY, Gao Y, Jia JJ *et al.* Water level as the key controlling regulator associated with nutrient and gross primary productivity changes in a large floodplain-lake system (Lake Poyang), China. *Journal of Hydrology*, 2021, **599**: 126414. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126414.
- [11] Zhao FZ, Bai L, Wang JY *et al.* Change in soil bacterial community during secondary succession depend on plant and soil characteristics. *CATENA*, 2019, **173**: 246-252. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.024.
- [12] He DM, Jiang H, Zhu YY *et al.* Characteristics and influencing factors of soil microbial biomass carbon content at different succession stages of coastal wetlands in Jiangsu Province. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2020, **37**(4): 623-630. [何冬梅, 江浩, 祝亚云等. 江苏滨海湿地不同演替阶段土壤微生物生物量碳质量分数特征及其影响因素. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(4): 623-630.]
- [13] Kuzakov Y, Blagodatskaya E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **83**: 184-199. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.01.025.
- [14] Shen RC, Xu M, Chi YG *et al.* Soil microbial responses to experimental warming and nitrogen addition in a temperate steppe of northern China. *Pedosphere*, 2014, **24**(4): 427-436. DOI: 10.1016/S1002-0160(14)60029-1.
- [15] Zhang MY, O'Connor PJ, Zhang JY *et al.* Linking soil nutrient cycling and microbial community with vegetation cover in riparian zone. *Geoderma*, 2021, **384**: 114801. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114801.
- [16] Yuan JH, Ren Q, Zhou LY *et al.* Characteristics and influencing factors of soil organic carbon components under different environmental conditions in Poyang Lake wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(6): 1323-1329. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202306.006. [袁继红, 任琼, 周莉荫等. 鄱阳湖湿地不同环境条件土壤有机碳组分特征及其影响因素. 生态学杂志, 2023, **42**(6): 1323-1329.]
- [17] Zhang Q, Ye XC, Werner AD *et al.* An investigation of enhanced recessions in Poyang Lake: Comparison of Yangtze River and local catchment impacts. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 425-434. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.051.
- [18] Hu YX, Huang JL, Du Y *et al.* Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 274-285. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.002.
- [19] Zhang GS, Yu XB, Xu J *et al.* Effects of environmental variation on stable isotope abundances during typical seasonal floodplain dry season litter decomposition. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 1205-1215. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.298.
- [20] Han Z, Wang SY, Liu XB *et al.* Ecological thresholds for the dominated wetland plants of Poyang Lake along the gradient of flooding duration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(2): 252-262. [韩祯, 王世岩, 刘晓波等. 基于淹水时长梯度的鄱阳湖优势湿地植被生态阈值. 水利学报, 2019, **50**(2): 252-262.]
- [21] Sun TT, Wang YG, Hui DF *et al.* Soil properties rather than climate and ecosystem type control the vertical variations of soil organic carbon, microbial carbon, and microbial quotient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **148**: 107905. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107905.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土壤微生物生物量的测定 底物诱导呼吸法, 2016, GB/T 32723-2016.
- [23] Anderson TH, Domsch KH. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(4): 471-479. DOI: 10.1016/0038-0717(89)90117-X.
- [24] Jiang YM, Hu LY, Lin D *et al.* Soil carbon contents and enzyme activities of 4 kinds of vegetation communities of Poyang Lake wetlands. *Wetland Science*, 2017, **15**(6): 802-808. [江玉梅, 胡琳玉, 林娣等. 鄱阳湖湿地四种植物群落土壤碳含量和酶活性. 湿地科学, 2017, **15**(6): 802-808.]
- [25] Jiang YM, Lu PW, Zhang ZB *et al.* Effects of fire disturbance on soil carbon components and microbial carbon sequestration capacity at Nanji Mountain under water level fluctuation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(1): 156-165. DOI: 10.11870/cj-lyzyhj202201015. [江玉梅, 卢鹏伟, 张志斌等. 水位波动下火烧干扰对南荻土壤碳组分、微生物固碳能力的影响. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(1): 156-165.]

- [26] Wang XL, Xu LG, Wan RR *et al.* Seasonal variations of soil microbial biomass within two typical wetland areas along the vegetation gradient of Poyang Lake, China. *CATENA*, 2016, **137**: 483-493. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.020.
- [27] Yu HT, Huang SH, Liu YJ *et al.* Profile distribution characteristics of soil enzymes and microbial biomass in the Poyang Lake wetland. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(11): 1715-1722. [于昊天, 黄时豪, 刘亚军等. 鄱阳湖湿地土壤酶及微生物生物量的剖面分布特征. 环境科学研究, 2017, **30**(11): 1715-1722.]
- [28] Chen G, Liu YY, Yao HY *et al.* A method for measuring microbial biomass C in waterlogged soil: Chloroform fumigation extraction—Water bath method. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(6): 981-988. [陈果, 刘岳燕, 姚槐应等. 一种测定淹水土壤中微生物生物量碳的方法: 液氯熏蒸浸提—水浴法. 土壤学报, 2006, **43**(6): 981-988.]
- [29] Wasof S, De Schrijver A, Schelfhout S *et al.* Linkages between aboveground and belowground community compositions in grasslands along a historical land-use intensity gradient. *Plant and Soil*, 2019, **434**(1): 289-304. DOI: 10.1007/s11104-018-3855-7.
- [30] Shen RC, Lan ZC, Huang XY *et al.* Soil and plant characteristics during two hydrologically contrasting years at the lakeshore wetland of Poyang Lake, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(9): 3368-3379. DOI: 10.1007/s11368-020-02638-8.
- [31] Wang Q, Hu J, Feng Z *et al.* The characteristics of carbon storage in six dominant plant communities in Nanji wetland, Poyang Lake. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2020, **44**(4): 437-441. [汪琴, 胡佳, 冯哲等. 鄱阳湖南矶湿地6种优势植物群落植被碳储量分布特征. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2020, **44**(4): 437-441.]
- [32] Demoling F, Figueroa D, Bååth E. Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(10): 2485-2495. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.05.002.
- [33] Zhang QJ, Zhang GS, Yu XB *et al.* Dynamic characteristics of the decomposition rate and carbon, nitrogen and phosphorus release of the dominant plants in Poyang Lake Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(24): 8905-8916. [张全军, 张广帅, 于秀波等. 鄱阳湖湿地优势植物枯落物的分解速率及碳、氮、磷释放动态特征. 生态学报, 2020, **40**(24): 8905-8916.]
- [34] Ma YL, Xiong CY, Yi WP. Sedimentary characteristics and developing trend of sediments in Poyang Lake, Jiangxi Province. *Volcanology & Mineral Resources*, 2003, **24**(1): 29-37. [马逸麟, 熊彩云, 易文萍. 鄱阳湖泥沙淤积特征及发展趋势. 资源调查与环境, 2003, **24**(1): 29-37.]
- [35] Lu M, Ren YL, Wang SJ *et al.* Contribution of soil variables to bacterial community composition following land use change in Napahai Plateau wetlands. *Journal of Environmental Management*, 2019, **246**: 77-84. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.149.
- [36] Fierer N, Strickland MS, Liptzin D *et al.* Global patterns in belowground communities. *Ecology Letters*, 2009, **12**(11): 1238-1249. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01360.x.
- [37] Liu QS, Liu GH, Huang C *et al.* Soil physicochemical properties associated with quasi-circular vegetation patches in the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 2019, **337**: 202-214. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.021.
- [38] Liu SL, Hou XY, Yang M *et al.* Factors driving the relationships between vegetation and soil properties in the Yellow River Delta, China. *CATENA*, 2018, **165**: 279-285. DOI: 10.1016/j.catena.2018.02.004.