

沉积物中微生物量与有机碳形态的相关性研究

毛海芳^{1,2}, 何江¹, 吕昌伟¹, 梁英¹, 刘华琳¹, 王凤娇¹

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 赤峰市环境科学研究院, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要:以富营养化类型不同的乌梁素海和岱海为对象, 根据水域面积及生态类型进行采样及分析测试, 开展了湖泊沉积物中微生物量与有机碳形态的相关性研究, 对比分析了 2 个湖泊沉积物微生物量的分布特征及其差异性, 初步探讨了 2 个湖泊沉积物微生物量与含水率、pH 及有机碳各形态间的相关性。结果表明, 乌梁素海表层沉积物中微生物量介于 $5.59 \times 10^8 \sim 32.46 \times 10^8$ 个 $\cdot g^{-1}dw$, 平均 16.36×10^8 个 $\cdot g^{-1}dw$; 岱海表层沉积物微生物量介于 $4.76 \times 10^8 \sim 43.66 \times 10^8$ 个 $\cdot g^{-1}dw$, 平均 25.04×10^8 个 $\cdot g^{-1}dw$; 乌梁素海微生物量的高值区位于湖区东南部, 岱海微生物量的高值区位于湖心区。2 个湖泊沉积物柱芯中的微生物量均随深度增加而减少, 沉积物微生物量与含水率、总氮和活性有机碳呈显著相关性。

关键词: 微生物量; 有机碳形态; 湖泊

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)12-2406-07

Correlation Between Microbial Biomass and Organic Carbon Forms in the Sediments

MAO Hai-fang^{1,2}, HE Jiang¹, LV Chang-wei¹, LIANG Ying¹, LIU Hua-lin¹, WANG Feng-jiao¹

(1. College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2. Environmental Science Institute of Chifeng, Chifeng, 024000, China)

Abstract In this work, the horizontal and vertical characteristics and the differences of microbial biomass, the correlations between microbial biomass and physical chemistry characteristics such as organic carbon forms, water content, pH, and total nitrogen in sediments from the Wuliangsu Hai and Daihai Lake were discussed. The results indicated that the microbial biomass in the surface sediments from the Wuliangsu Hai Lake ranges from 5.59×10^8 to 32.46×10^8 cell $\cdot g^{-1}dw$, with average of 16.36×10^8 cell $\cdot g^{-1}dw$, and it ranges from 4.76×10^8 to 43.66×10^8 cell $\cdot g^{-1}dw$, with average of 25.04×10^8 cell $\cdot g^{-1}dw$ in the Daihai Lake. In terms of the horizontal characteristics, the southeast area was the high value area of microbial biomass in the Wuliangsu Hai Lake, and the center area was the high value area in the Daihai Lake. The microbial biomasses decreased with the depth in the sediment cores from the two lakes. There significant linear correlations between the microbial biomass and water content, total nitrogen, active organic carbon were found in this work.

Keywords microbial biomass; organic carbon forms; lake

湖泊碳循环是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。湖泊由于其封闭和静水特征, 生态系统内的生产、分解和沉积过程非常活跃。湖泊的生物生产力远高于海洋, 生物泵功能十分强大, 随全球性湖泊富营养化的加剧, 湖泊初级生产力正在迅速提高, 湖泊碳循环的强度和过程较海洋具有更多的特异性和复杂性, 湖泊碳循环在全球碳源/汇转换中的作用日益重要。

湖泊是一个具有高度生物活性的特殊环境, 湖泊沉积物是陆地上重要的有机碳库, 有机碳的微生物降解是湖泊生源物质得以再生的重要途径^[1]。微生物既是有机碳库的一部分, 又是有机碳转化的参与者, 有机碳对微生物的活性有制约效应, 是控制微生物生物量的主要因素之一。微生物的作用和重要性一直为人们所重视。本文以富营养化类型不同的乌梁素海和岱海为研究对象, 开展了湖泊沉积物中微生物量与有机碳形态的相关性研究, 对比分析了 2 个湖泊沉积物微生物量的分布特征及其差异性, 初步探讨了 2 个湖泊沉积物微生物量与含水率、pH 及有机碳各形态间的相关性, 以期能为湖泊富营养化机理研究提供科学依据, 为湖泊有机碳循环研究积累基础资料。

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(40863003); 内蒙古自然科学基金及内蒙古大学“513 工程”基金

作者简介: 毛海芳(1984—), 女, 硕士, 主要研究方向为环境地球化学及湿地科学。

通讯作者: 何江 E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海 ($40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$) 系黄河改道后形成的牛轭湖, 是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊, 也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环境保护等多功能的大型草型湖泊, 为地球上同一纬度最大的自然湿地。湖区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内, 现有水域面积 333.48 km^2 , 80% 水域水深 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 。农田退水是该湖最主要的补给水源^[2], 受河套灌区农田退水的影响, 近 10 年来乌梁素海富营养化进程加剧^[3]。湖中现有大型水生植物共 6 科 6 属 11 种, 以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种, 沉水植物和挺水植物生长繁茂, 遍布全湖, 水草生物量(鲜重)最高为 $22.50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均 $12.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。乌梁素海已成为以大型水生植物过量生长为表征的重度富营养化草型湖泊, 目前腐烂水草正以每年 $9 \sim 13 \text{ mm}$ 的速度在湖底堆积, 成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一, 乌梁素海正向芦苇沼泽→碱蓬盐化草甸→白刺荒漠方向演化^[4]。

岱海($40^{\circ}29'27'' \sim 40^{\circ}37'6''N$, $112^{\circ}33'31'' \sim 112^{\circ}46'40''E$)是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊, 位处温带半干旱区向干旱区的过渡

带, 是西伯利亚干冷气团南下与热带海洋暖气团北上交锋的敏感地带^[5], 为气候变化的敏感反应区。湖区位于内蒙古凉城县境内, 现有水域面积约 80.72 km^2 , 最大水深 16.05 m , 平均水深 7.41 m 。湖中有藻类共 76 属, 其中绿藻门 28 属、硅藻门 21 属、蓝藻门 16 属、裸藻门 16 属、甲藻门、隐藻门、黄藻门、金藻门各 2 属^[5]。湖区西北岸和南岸浅水区有小面积的芦苇分布。岱海补给水源来自大气降水以及湖周分布的间歇性河流。流域内工业企业数量少, 规模小, 所排放的工业废水经弓坝河直接入湖, 农田面源污染是湖泊的主要污染源。近年来湖泊水位逐年下降, 水面不断缩小, 湖水咸化程度逐渐增高, 富营养化程度加剧, 环境问题日益突出, 成为我国在全球变化研究中倍受重视的地区。

1.2 样品采集

依据《湖泊生态系统观测方法》, 针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点。于 2007 年 8 月对乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)进行了系统的现场监测和样品采集(图 1)。表层沉积物和沉积物柱芯样用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A 和 B 型无扰动采样器采集, 现场以 2 cm 间隔分层, 沉积物样装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存, 回实验室于 -24°C 冷冻保存。采样点用 GPS 定位。已有研究表明, 乌梁素海 $0 \sim 38 \text{ cm}$ 沉积剖面可代表近 60 a 的历史时段^[6], 岱海 $0 \sim 34 \text{ cm}$ 沉积剖面可代表近 230 a 的历史时段^[7]。

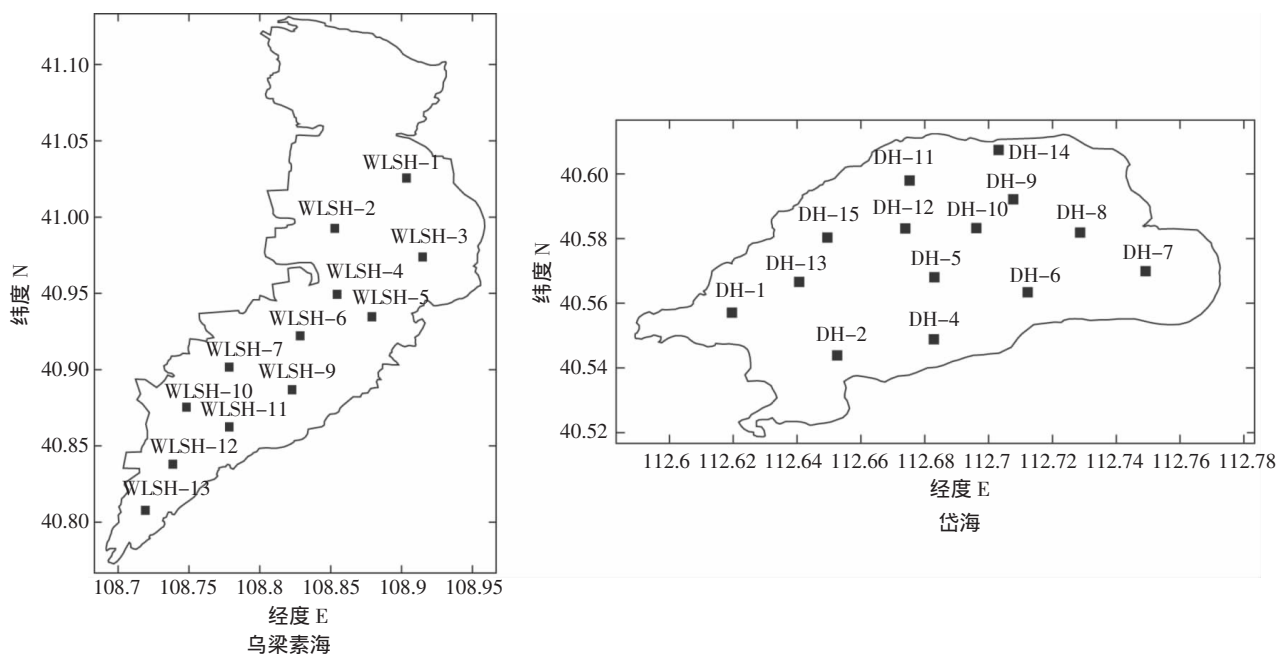


图 1 乌梁素海和岱海样点分布图

Figure 1 Location of sampling site in Wuliangsu Lake and Daihai Lake

1.3 实验方法和数据分析

实验样品:乌梁素海及岱海表层(0~10 cm)和柱状沉积物风干样。

微生物磷脂测定:

(1)脂类萃取(改进的 Bligh 和 Dyer 萃取方法^[8-9]):称取适量沉积物样品放入 50 mL 离心管,加 4 mL 磷酸缓冲液(用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 中和 $11.411 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 到 pH7.4 为止),再加 10 mL 甲醇和 5 mL 氯仿,混匀后振荡萃取 3 h,将振荡萃取后的样品连同溶液移入另一组离心管内,再向原先比色管中加入 4 mL 磷酸缓冲液,10 mL 甲醇和 5 mL 氯仿,洗涤残渣及容器,振荡充分后一并移入离心管内,4 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min,离心后的上清液移入 125 mL 分液漏斗内,向分液漏斗中加 10 mL 磷酸缓冲液和 10 mL 氯仿,振荡混匀,静置 24 h,分液漏斗中的溶液分层,上层无色,下层棕黄色。一次萃取时缓冲液、甲醇和氯仿的体积比为 0.8:2:1,二次分层时缓冲液、甲醇和氯仿的体积比为 0.9:1:1。收集下层有机相,移入经酸洗的长试管中,避免碰侧壁,加热(不超过 40 $^{\circ}\text{C}$)并用氮气吹干有机相。干燥后的脂类在充入氮气后于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下保存。

(2)磷脂的消解与含量测定:向经氮气吹干后仅含脂类的试管中加入 35%的高氯酸(浓高氯酸加水 1:1 混合)1.5 mL,并在试管顶部放上小漏斗,在电热板上的铝套内加热至 200 $^{\circ}\text{C}$ 消解 2 h。保证消化液沸腾时的白色烟雾不溢出试管,且消化液不能干,消解后的消化液为无色澄清液体。冷却后的消化液转入 25 mL 比色管,用蒸馏水冲洗试管壁 2~3 次,冲洗液全部转入比色管中,定容至 10 mL,加 1 滴酚酞指示剂,用 $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液滴定至溶液刚显红色为止,再用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 滴定至红色消失,随后定容至 25 mL,向比色管中加入 0.5 mL 10%抗坏血酸溶液,混匀。30 s 后加 1 mL 钼酸盐溶液充分混匀,放置 15 min。用 20 mm 比色皿,于 700 nm 波长处测定其吸光值。

(3)标准曲线绘制:参考总磷的钼酸铵分光光度法绘制(国家环保总局 2002)。

沉积物基本物理化学参数测定:沉积物含水率用质量法测定,pH 值用手提式 pH 计测定,全氮用半微量凯氏定氮法测定,总有机碳用重铬酸钾氧化外加热法测定,一氧化碳用 KMnO_4 氧化法测定^[10-11],轻组有机质用比重分离法测定^[12],腐殖质结合形态及腐殖质组成采用常用的成熟方法测定^[13]。

数据分析软件采用 SPSS13.0 和 Surfer 7.0。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中微生物磷脂含量

在适宜的条件下自然微生物群落中细胞磷脂(phospholipid)含量与总微生物量有着相对稳定的比例关系^[14]。因为磷脂类化合物主要存在于所有活细胞膜中,细胞中磷脂的含量在自然条件下(正常的生理条件下)恒定^[7],一旦微生物细胞死亡,其中的磷脂类化合物能够快速转化和降解,所以磷脂类化合物可以作为活体微生物生物量的指标。

乌梁素海表层沉积物微生物磷脂含量介于 16.44~95.46 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$,平均 58.12 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$,岱海表层微生物磷脂含量介于 13.99~128.43 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$,平均 73.65 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$ (表 1)。岱海表层沉积物中微生物磷脂的平均含量为乌梁素海的 1.27 倍,表明岱海表层沉积物中微生物量及其活性较高。活性有机碳是微生物生长的速效基质,其含量高低直接影响土壤微生物的活性和微生物量。研究表明,岱海表层沉积物中活性有机碳的平均含量是乌梁素海的 1.72 倍,2 个湖泊表层沉积物中活性有机碳含量的差异是导致微生物量及其活性差异的直接原因。乌梁素海为大型草型富营养化湖泊,蔓延全湖的沉水和挺水植物因大量吸收溶解性有机碳而对微生物生长具有竞争性抑制作用,加之湖中高营养盐浓度和 pH 值对沉积物中微生物量及群落结构也具有一定影响^[15]。岱海为深水藻型湖泊,藻类繁殖所需养分由微生物转化而来,活性有机碳又是微生物生长的重要能源物质,加之岱海水动力条件和沉积环境的相对稳定也利于有机碳的沉积与活性有机碳的保存。此外,研究表明,岱海沉积物中总有机碳、重组碳和易氧化碳及总氮等生源要素的含量也均高于乌梁素海,能够给微生物提供充足营养物质。

乌梁素海表层沉积物微生物磷脂含量高值区出现在湖区东南部(图 2),与此处位于坝头镇,生活污

表 1 乌梁素海与岱海表层沉积物中微生物磷脂含量

Table 1 Concentration of phospholipids in WLSH and DH surface sediments

项目	WLSH			DH		
	max	min	average	max	min	average
微生物磷脂/ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$	95.46	16.44	58.12	128.43	13.99	73.65
微生物量/ $\times 10^8 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw}$	32.46	5.59	16.36	43.66	4.76	25.04

水及鱼塘废水大量营养物质由此入湖,同时因水流速度较缓而导致营养物质沉淀,为微生物提供了充足的养分有关。岱海表层沉积物微生物磷脂含量高值区出现在湖心区(图 2),这与湖泊表层沉积物中营养盐尤其是磷的空间分布特征^[16],以及湖心深水区受扰动作用较小有利于营养物质沉淀有关。

2.2 沉积柱芯中微生物磷脂含量

垂向上,2 个湖泊表层沉积物磷脂含量均明显高于底层(图 3),且随深度增加微生物磷脂呈明显下降

趋势,表明 2 个湖泊沉积柱芯中微生物活性与数量均随深度而下降,与冯峰等^[17]对东湖的研究结果一致。对比研究发现,岱海沉积柱芯中微生物磷脂明显高于乌梁素海,其原因与岱海表层沉积物中微生物磷脂明显高于乌梁素海完全相同。

2.3 微生物磷脂与微生物量之间的转换

通常用一个平均转换因子将磷脂量转换为细胞数量。由于受各种环境因子限制,目前还无统一标准。White 等通过对大肠杆菌等的分析,计算出其转换因

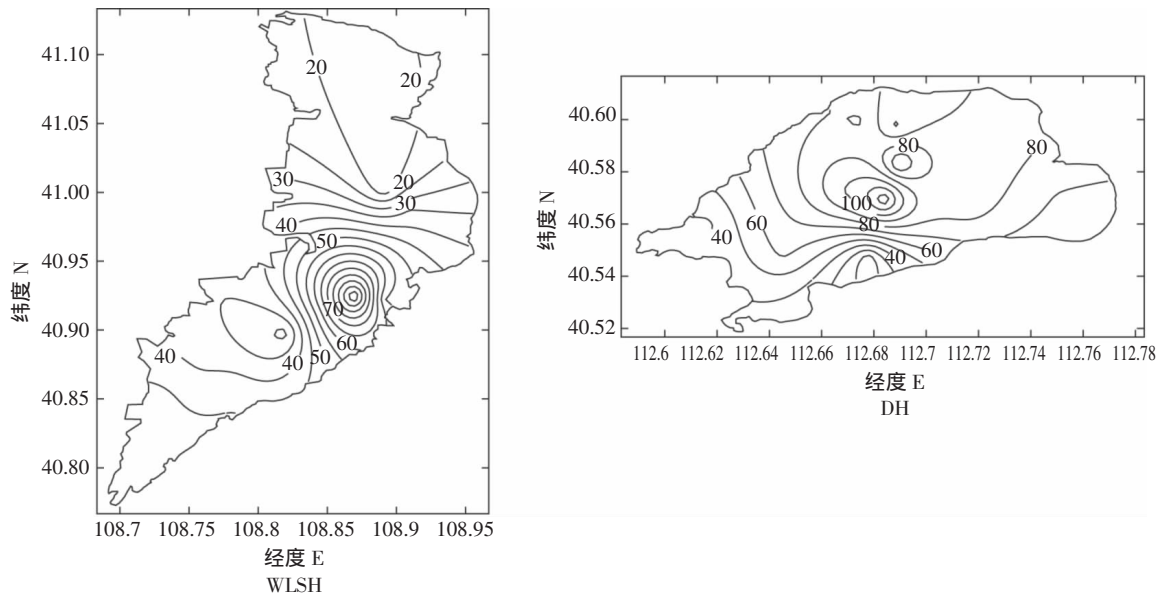


图 2 乌梁素海和岱海微生物磷脂的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of phospholipids in WLSH and DH

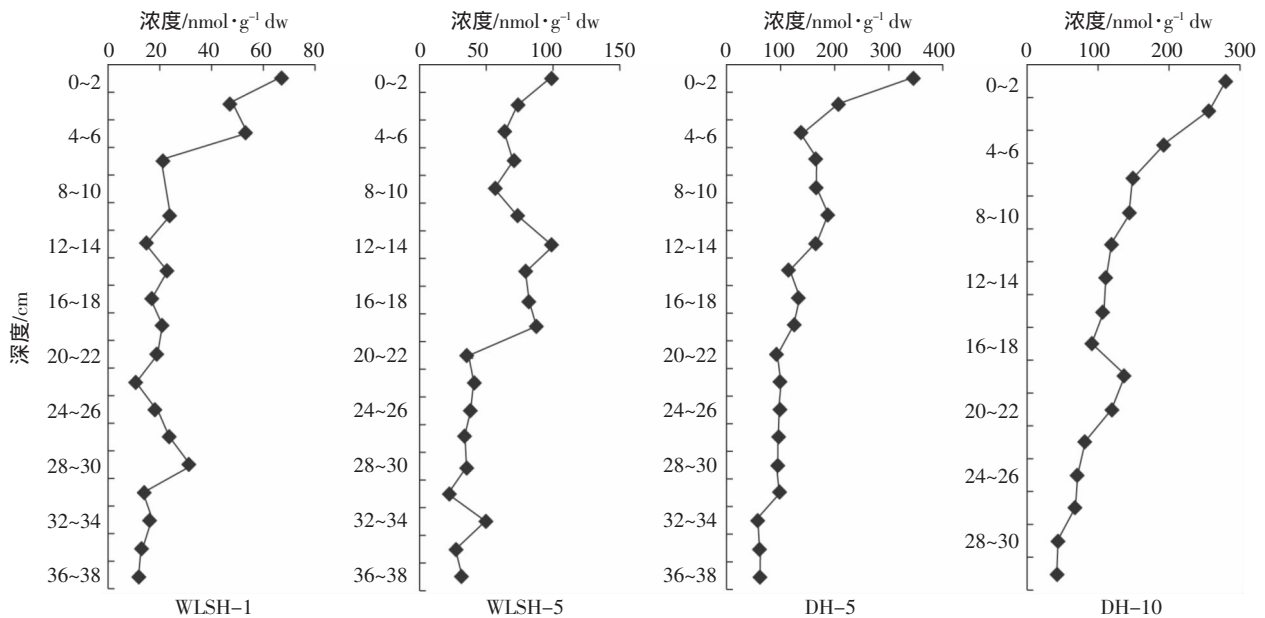


图 3 微生物磷脂的垂向分布

Figure 3 Vertical distribution of phospholipids in WLSH and DH

子介于 $4 \times 10^7 \sim 2 \times 10^9$ 个 $\cdot \text{nmol}^{-1}$ 间^[18-19]。为克服纯培养不能反映真实环境条件的限制, Findlay 等^[20]通过对沉积物进行多次富集培养, 将回收到的细胞经过洗涤后计算出其中磷脂含量和微生物数量的转换因子为 1 nmol 磷相当于 3.4×10^7 个微生物细胞。该转换因子虽不能精确地反映群落中微生物量, 但与直接计数法和 MPN 法相比, 该方法能够提供活微生物生物量的较完整信息, 且操作相对简便, 是一种快捷、可靠的分析方法^[16]。冯峰等通过平行试验得出, 使用本方法测得的微生物量数据标准差较低, 从另一个侧面证明了此方法具有较高的可靠性^[16]。

根据 Findlay 给出的转换因子, 估算了乌梁素海和岱海 2 个湖泊表层沉积物以及沉积柱芯中的微生物量(图 4、5)。结果表明, 乌梁素海表层沉积物微生物量介于 $5.59 \times 10^8 \sim 3.246 \times 10^9$ 个 $\cdot \text{g}^{-1} \text{dw}$, 平均 1.636×10^9 个 $\cdot \text{g}^{-1} \text{dw}$; 岱海表层沉积物微生物量介于 $4.76 \times 10^8 \sim 4.366 \times 10^9$ 个 $\cdot \text{g}^{-1} \text{dw}$, 平均 2.504×10^9 个 $\cdot \text{g}^{-1} \text{dw}$ (表 1)。沉积柱芯中微生物量随深度呈下降趋势, 与 Tong 等^[14]的研究结果相一致。

2.4 微生物量与有机碳组成的相关分析

研究表明, 乌梁素海沉积物中, 微生物量(MB)与含水率(WC)、总氮(TN)、总有机碳(TOC)、易氧化碳(ROC)、轻组有机碳(LFOC)、重组有机碳(HFOC)、腐殖质松结态富里酸(SFA)和胡敏酸(SFA)及稳结态胡敏酸(WHA)和富里酸(WFA)具有极显著相关性, 与沉积物腐殖质中的胡敏酸(HA)和富里酸(FA)及腐植酸(HE)呈显著相关(表 2)。岱海沉积物中, 微生物量与含水率、pH、总氮、轻组有机碳及腐植酸呈极显著相关, 与易氧化碳、松结态胡敏酸和稳结态富里酸显著相关(表 2)。

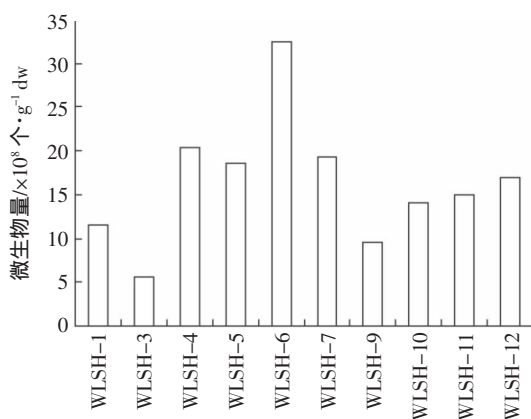


图 4 表层沉积物微生物量

Figure 4 Microbial biomass in WLSH and DH surface sediments

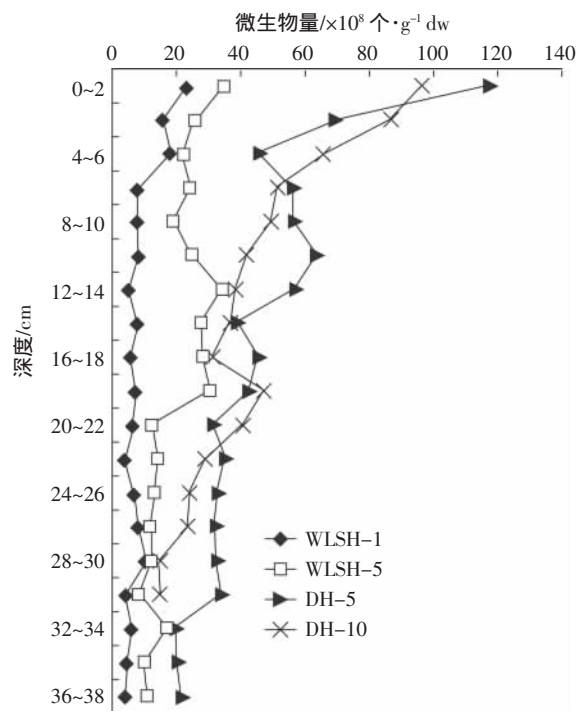


图 5 沉积物柱芯中的微生物量

Figure 5 Microbial biomass in WLSH and DH sediment cores

微生物是有机碳和营养元素转化与循环的动力。由于沉积物矿物对微生物及其代谢产物的物理化学保护作用, 以及其他沉积物性质、气候条件等因素对微生物生长和发育的影响, 探讨环境条件及有机质与微生物量的相关性具有重要意义。水是微生物代谢过程中必不可少的溶剂, 有助于营养物质溶解, 并通过细胞质膜被微生物吸收^[21]。氮素是微生物生长所需要的主要营养元素。微生物中包括大量的固氮细菌、氨化细菌、硝化反硝化细菌等, 它们可以通过固氮、氨化、硝化反硝化等作用参与氮循环。活性有机碳是微

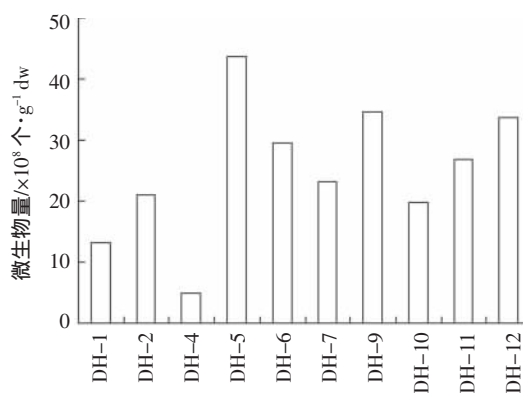


表 2 乌梁素海和岱海沉积物中微生物量与有机碳形态的相关性

Table 2 Correlations between microbial biomass and organic matter in WLSH and DH

项目	WC	pH	TN	TOC	ROC	LFOC	HFOC	HA	FA	HE	SHA	SFA	WHA	WFA
DH	0.773**	0.482**	0.660**	0.299	0.399*	0.459**	0.284	0.132	0.258	0.452**	0.356*	0.065	-0.134	0.377*
WLSH	0.694**	-0.023	0.707**	0.804**	0.799**	0.545**	0.806**	0.357*	0.338*	0.407*	0.135	-0.099	0.483**	0.485**

注 ** Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed). * Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed).

生物生长的速效基质,其含量高低直接影响微生物生物量及其活性^[22]。腐殖质中的腐植酸生物活性较高,能够刺激土壤中有益微生物的成长和繁殖^[23]。

3 结论

乌梁素海表层沉积物中微生物量介于 $5.59 \times 10^8 \sim 3.246 \times 10^9$ 个 $\cdot g^{-1}$ dw,平均 1.636×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ dw,岱海表层沉积物微生物量介于 $4.76 \times 10^8 \sim 4.366 \times 10^9$ 个 $\cdot g^{-1}$ dw,平均 2.504×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ dw。

水平分布上,乌梁素海湖区东南部及岱海湖心区的微生物量均较高,垂向分布上,2 个湖泊沉积物柱芯中的微生物量均随深度而减少。

岱海沉积物中 C、N 等生源要素的含量均高于乌梁素海,能够给微生物提供充足营养物质,从而导致岱海沉积物微生物量比乌梁素海高。

2 个湖泊沉积物微生物量与含水率、总氮和活性有机碳均呈极显著相关性,乌梁素海沉积物微生物量与活性有机碳呈极显著相关,岱海沉积物微生物量与活性有机碳呈显著相关。微生物在有机质的降解过程中起着重要的作用,有机质对微生物的活性有制约效应,是控制微生物生物量的主要因素之一。

参考文献:

- [1] Chrzanowski T H, Sterner R W, Elser J J. Nutrient enrichment and nutrient regeneration stimulate bacterio-plankton growth[J]. *Microbial Ecology*, 1995, 29(4): 221-230.
- [2] 内蒙古湖泊恢复治理项目:乌梁素海综合整治研究. 中国-瑞典-挪威合作项目[M]. Lake recovery and management project in Inner Mongolia: the Synthetic Renovating Program of Wuliangsu Lake. CHINA-SWEDEN-NORWAY Cooperation projects[M].
- [3] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1003-1012. SUN Hui-min, HE Jiang, LV Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1003-1012.
- [4] 孙惠民, 何江, 高兴东, 等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 579-584. SUN Hui-min, HE Jiang, GAO Xing-dong, et al. Distribution of total

phosphorus in sediments of Wuliangsu Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 579-584.

- [5] 王苏民, 吴瑞金, 余源盛. 岱海-湖泊环境与气候变化[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990. WANG Su-min, WU Rui-jin, YU Yuan-sheng. Daihai Lake-Lake environment and climate changes [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.
- [6] 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽, 等. 内蒙古乌梁素海 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 909-913. ZHAO Suo-zhi, KONG Fan-ji, WANG Xi-kuan, et al. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating and modern sedimentation rate on the Wuliangsu Lake of Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 2008, 22(6): 909-913.
- [7] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学博士学位论文, 2008. LV Chang-wei. Geochemistry character of carbon(nitrogen, phosphorus, silicon)in lakes in west inner mongolia plateau[D]. Inner Mongolia University Doctor Thesis. 2008.
- [8] White D C, Davis W M, Nickels J S, et al. Determination of the Sedimentary Microbial Biomass by extractible lipid phosphate[J]. *Oecologia*, 1979, 40: 51-62.
- [9] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, 37: 911-917.
- [10] Logniew W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation [J]. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47-52.
- [11] 于荣, 徐明岗, 王伯仁. 土壤活性有机质测定方法的比较[J]. 土壤肥料, 2005(2): 49-52. YU Rong, XU Ming-gang, WANG Bo-ren. Study on methods for determining labile organic matter of soils[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(2): 49-52.
- [12] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-Fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Sci Am J*, 1992, 56: 1799-1805.
- [13] 傅积平. 土壤结合态腐殖质的分组测定 [J]. 土壤通报, 1983, 2: 36-37. Fu Ji-ping. Group determination of soil combined humus [J]. *Soil Bulletin*, 1983, 2: 36-37.
- [14] Perry C J, Volkman J K, Johns R B, et al. Fatty acids of bacterial origin contemporary sediments[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1979, 43: 1715-1725.
- [15] Tong Yong, Lin Guofang, Ke Xin, et al. Comparison of microbial community between two shallow freshwater lakes in middle Yangtze basin,

- East China[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(1) :85–92.
- [16] 高兴东. 岱海湖泊营养盐的环境地球化学特征研究[D]. 呼和浩特 : 内蒙古大学硕士学位论文, 2006.
- GAO Xing-dong. Environmental geochemical characteristics of nutrient in Daihai Lake[D]. Inner Mongolia University Master Thesis, 2006.
- [17] 冯 峰, 王 辉, 方 涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(3) :342–345.
- FENG Feng, WANG Hui, FANG Tao, et al. The correlation between microbial biomass and carbon, nitrogen, phosphorus in the sediments of Lake Donghu[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3) :342–345.
- [18] White D C. Analysis of micro organisms in terms of quantity and activity in natural environments[J]. *Soc Gen Microbiol Symp*, 1983, 34(1) : 37–66.
- [19] Balkwill D L, Leach F R, Wilson J T, et al. Equivalence of microbial biomass measures based on membrane lipid and cell wall components, adenosine triphosphate, and direct counts in subsurface aquifer sediments[J]. *Micro Ecol*, 1988, 16 :73–84.
- [20] Findlay R H, King G M, Watling L. Efficacy of phospholipid analysis in determining microbial biomass in sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, 55(11) :2888–2893.
- [21] 周群英, 王士芬. 环境工程微生物学 [M]. 北京 : 高等教育出版社, 2008.
- ZHOU Qun-ying, WANG Shi-fen. Environmental engineering microbiology[M]. Beijing :China Higher Education Press, 2008.
- [22] 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.
- SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. Characterization and ecological efficiency of soil labile organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3) :32–38.
- [23] Valdrighi M M, et al. Effects of compost-derived humic acids on vegetable biomass production and microbial growth within a plant(*Cichorium intybus*)-soil system :A comparative study[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1996, 58(2&3) :133–144.