

长江中下游浅水湖沉积物中有机质及其组分的赋存特征

易文利^{1,2,3},王圣瑞²,金相灿²,王国栋¹

(1 西北农林科技大学 理学院,陕西 杨凌 712100;2 中国环境科学研究院 湖泊生态环境创新基地,国家环境保护湖泊污染控制重点实验室,北京 100012;3 宝鸡文理学院 地理科学与环境工程系,陕西 宝鸡 721007)

【摘 要】 【目的】为富营养化湖泊治理提供参考依据。【方法】应用物理化学方法,研究了长江中下游浅水湖沉积物中总有机质(OM)、活性有机质(LOM)、溶解性有机质(DOM)、轻组有机质(LFOM)和重组有机质(HFOM)的赋存特征。【结果】①长江中下游浅水湖泊 11 个沉积物的 OM 含量为 9.80~110.04 g/kg;②由化学分组法了解到沉积物 LOM 含量为 2.48~26.32 g/kg,占 OM 的 19.62%~31.86%;DOM 含量为 1.13~3.40 g/kg,占 OM 的 2.41%~11.59%;③由物理分组法了解到 LFOM 含量为 0.34~9.78 g/kg,占 OM 的 2.25%~16.89%;HFOM 含量为 8.68~100.26 g/kg,占 OM 的 83.11%~97.75%;④DOM 紫外-可见吸收光谱中, E_3/E_4 值在 3~6;⑤OM 中的 LOM、DOM、LFOM、HFOM 两两之间呈显著正相关,且均与沉积物 TP、CEC 和粉沙粒(Silt)存在显著正相关关系,与粗沙粒(Sand)、 SiO_2 存在显著负相关关系。【结论】在本研究条件下,长江中下游浅水湖泊沉积物中城市湖泊的有机质及组分含量均大于自然湖泊;DOM 紫外-可见吸收光谱表明,浅水湖泊沉积物 DOM 腐殖化程度较低。

【关键词】 湖泊沉积物;总有机质;活性有机质;溶解性有机质;轻组和重组有机质

【中图分类号】 X132 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2008)05-0141-08

Distribution of total organic matter and the forms on the sediments from shallow lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

YI Wen-li^{1,2,3}, WANG Sheng-rui², JIN Xiang-can², WANG Guo-dong¹

(1 College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Environment Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 3 Department of Geography and Environment Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721007, China)

Abstract: 【Objective】 The study offered theoretical statistics in order to control Eutrophication lakes. 【Method】 Distribution of total organic matters (OM), Labile organic matter (LOM), dissolved organic matter (DOM), Light fraction organic matter(LFOM), Heavy fraction organic matter(HFOM) on the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River were investigated by using physical chemistry methods. 【Result】 ①Contents of OM of 11lake sediment samples of the studied region were 9.80—110.04 g/kg;②LOM, DOM by the chemical separation were 2.48—26.32 g/kg, 1.13—3.40 g/kg, accounting for 19.62%—31.86%, 2.41%—11.59% of total OM respectively;③LFOM and HFOM by physical density separation were 0.34—9.78 g/kg, 8.68—100.26 g/kg, accounting for 2.25%—16.89% and 83.11%—97.75% of total OM respectively;④The E_3/E_4 values ranged from 3 to 6 of the DOM UV-

* 【收稿日期】 2007-12-11
【基金项目】 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2002CB412304)
【作者简介】 易文利(1975—),女,陕西南郑人,讲师,在职博士,主要从事湖泊富营养研究。
【通讯作者】 金相灿(1945—),男,浙江义乌人,研究员,主要从事湖泊富营养化及水污染控制研究。

Vis absorbance;⑤LOM,DOM,LFOM and HFOM had remarkable positive correlation between them respectively. There was remarkable positive correlation with the contents of TP,CEC and silt of the studied samples respectively, but remarkable negative correlation with the contents of their sand, SiO₂. 【Conclusion】 The present study showed that the composition and total content of organic matter in the sediments of city lake sediments were more than those of the natural lake, among the shallow lakes and lower reaches of Yangtze River; the DOM UV-Vis absorbance showed the humification level of DOM was relatively low.

Key words: lake sediment; OM; LOM; DOM; LFOM and HFOM

湖泊沉积物是重金属、有毒有机化合物等环境污染物及 C、N、P 等营养元素的汇合释放源,而有机质对这些污染物和营养元素在沉积物中的迁移、转化等地球化学行为起着至关重要的作用^[1]。有机质在矿化过程中大量耗氧,同时释放出 C、N、P、S 等营养盐,可以造成严重的水质恶化、水体富营养化^[2]。Gachter 等^[3]通过 10 年的湖底曝气,试图降低 2 个富营养化湖水中的 P 浓度,但并未达到预期效果,原因与湖底富集的大量有机质的矿化释放有关;也有研究表明,南非 Modder 河的水华现象明显源于有机质污染^[4]。以上研究结果均说明,在湖泊富营养化研究中要重视有机质的作用。

长江中下游地区是我国浅水湖泊最集中的区域,伴随着近 20 年经济的发展,湖泊富营养化已成为制约地方经济发展的重要因素^[5]。湖泊富营养化除与大量 N、P 等营养元素的直接排入有关外,也与底泥中的有机质增多有密切关系。但是,对长江中下游地区湖泊沉积物中的总有机质及其各组分的赋存特征研究还不多见,大量研究均集中在湖泊沉积物氮磷迁移及其沉积物-水界面过程^[6-8]。目前,有关沉积物有机质特征的研究还较少,其研究方法主要采用土壤有机质的研究方法,由于土壤有机质组成、结构和存在方式的复杂性,对有机质的研究一直与其分组技术相联系,根据所采用的原理和手段,一般将土壤有机质分组技术分为化学和物理分组技术^[9]。在化学分组中,将有机质分为溶解性有机质、微生物生物碳、胡敏酸、富里酸和胡敏素。由于土壤中不同化学成分的氧化程度不同,根据土壤有机质的氧化性又可将其分为活性有机质、高能紫外辐射氧化有机质和双氧水氧化有机质。相对于化学分组,物理分组主要采用 3 种分组方法^[9-10]: 筛选法(以团聚体为基础的团聚体有机质)、沉降法和浮选法(以密度为基础分离出的轻组有机质和重组有机质)。本研究采用物理和化学分组方法,研究长江中下游地区不同污染程度湖泊沉积物中,总有机质、活性有机质、溶解性有机质、轻组有机质和重组有机质

的赋存特征,旨在为进一步治理湖泊富营养化提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

利用柱状采样器在长江中下游浅水湖泊区采集表层 10 cm 的沉积物样品,每个采样点均经多点采样混合后得不同沉积物样品共 11 个。其中在太湖采样 3 个,分别编号为 T-G(太湖的贡湖)、T-W(太湖的五里湖)和 T-M(太湖的梅梁湾);在鄱阳湖采样 3 个,分别编号为 B-1、B-2 和 B-3;洪泽湖、洞庭湖、玄武湖各采 1 个,编号为 H、D 与 X;在武汉月湖采样 2 个,分别编号为 Y-1 与 Y-2。所采沉积物样品带回实验室冷冻干燥后,分别过 0.149 mm 筛贮存备用。各采样点位置见图 1。

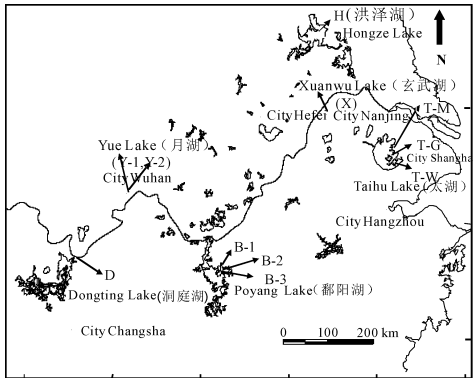


图 1 长江中下游浅水湖泊区 11 个采样点的分布
Fig. 1 Sample sites of the sediments from 11 shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

1.2 分析方法

沉积物样品的有机质总量采用经典的重铬酸钾容量法-外加热法测定^[11],溶解性有机质(DOM)采用 Baham 等的方法测定^[12],活性有机质(LOM)采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化法测定^[13],轻组有机质(LFOM)和重组有机质(HFOM)均采用比重分离法测定^[14]。

2 结果与分析

2.1 湖泊表层沉积物中的有机质含量及其分布

沉积物有机质是沉积物的重要组成部分,影响、制约着沉积物的理化性质,保持或提高沉积物中有机质含量,可以促进团聚体的形成并保持其稳定性;有机质还是生物生命活动所需能量的来源,其含量是反映沉积物营养水平的重要指标之一。由图 2 可知,长江中下游浅水湖泊 11 个沉积物的有机质含量为 9.80~110.04 g/kg,平均值为 37.20 g/kg,其中月湖沉积物中有机质含量最高,是其他湖泊的 1.77~11.22 倍,其次为玄武湖沉积物。根据有机质含量,本研究将沉积物分为 2 类:一类为污染较重的沉积物,该沉积物主要分布在武汉月湖和南京玄武湖,其有机质含量为 62.32~110.04 g/kg,平均值

为 90.61 g/kg;另一类是污染相对较轻的沉积物,该系列沉积物主要分布在鄱阳湖、洪泽湖、洞庭湖、太湖(贡湖、五里湖和梅梁湾),其有机质含量为 9.80~30.50 g/kg,平均值为 17.18 g/kg。据前人研究可知,玄武湖位于南京老城区东北部,月湖位于武汉市中心地带,二者均属典型的浅水型城市湖泊,近 20 年来,随着湖周围工厂的增加和人口的增长,大量污染物进入水体,导致水体处于严重富营养化状态;太湖、鄱阳湖、洪泽湖、洞庭湖属于大型自然湖泊,该系列湖区水体处于中-富营养化状态,污染相对较轻^[6]。在本研究条件下,长江中下游浅水湖泊中沉积物总有机质的分布,与湖泊的区域特点及人类活动密切相关,总体而言,城市湖泊沉积物均较自然湖泊沉积物污染严重,有机质含量均较自然湖泊沉积物高,其平均值是自然湖泊的 5 倍以上。

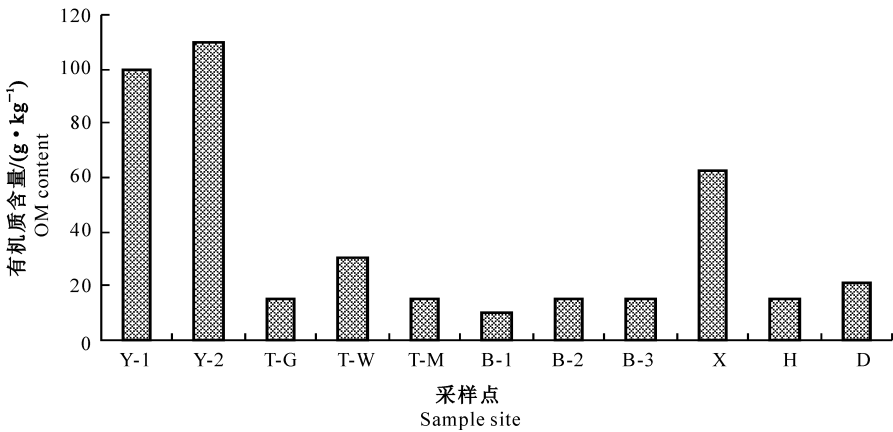


图 2 长江中下游浅水湖泊不同沉积物的有机质含量

Fig. 2 Contents of organic matter of the sediments from 11 shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

2.2 湖泊沉积物有机质中各组分含量及其分布特征

2.2.1 活性有机质(LOM) 长期以来,人们已在有机质方面做了大量的研究工作^[15-17],但有机质含量只是有机质积累与矿化分解的平衡结果,不能很好地反映其变化和周转速率等,因而在 20 世纪 70~80 年代,人们从有机质的分解转化方面,提出了活性有机质的概念。活性有机质是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有最直接作用的有机质部分^[14,18]。其并非是一种单纯的化合物,而是沉积物有机质中具有相似特性即较高有效性的那部分有机质。有研究者认为^[18-19],活性有机质是能够被微生物利用作为能源及碳源的有机质;Blair 等^[18]还认为,活性有机质是土壤中易氧化分解的有机质。因此将活性有机质等同于易氧化

有机质。本研究利用化学氧化分组法,将易氧化有机质作为沉积物的活性有机质,对其进行测定,结果见图 3。由图 3 可知,不同来源的湖泊沉积物中,活性有机质(LOM)含量不同,其含量为 2.48~26.32 g/kg,占总有机质的 19.62%~31.86%。其中月湖、玄武湖沉积物中 LOM 含量较高,自该系列湖区采集的沉积物中,LOM 含量为 15.78~26.32 g/kg,平均值为 20.57 g/kg;分布在鄱阳湖、洪泽湖、太湖(梅梁湾、贡湖、五里湖)和洞庭湖沉积物中的 LOM 含量为 2.48~6.24 g/kg,平均值为 4.76 g/kg。这与长江中下游浅水湖泊沉积物中的有机质含量分布相一致。由此可知,污染严重的城市湖泊沉积物中 LOM 含量较高,其平均值是自然湖泊的 4 倍以上。

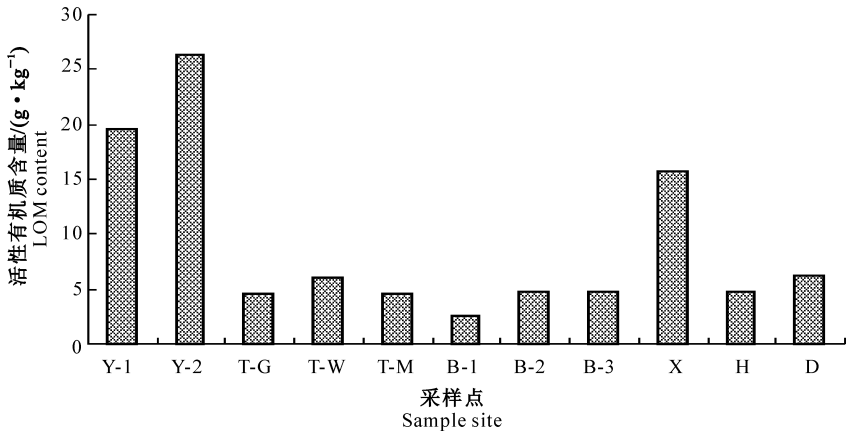


图 3 长江中下游浅水湖泊沉积物中活性有机质的含量

Fig. 3 Contents of LOM in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

2.2.2 溶解性有机质(DOM) 溶解性有机质(DOM)主要指能够溶解于水、酸或碱溶液中的有机质,是陆地生态系统和水生生态系统中的一种重要而活跃的化学组分,影响着环境的酸碱特性、营养物质的有效性及污染物的环境行为特性,同时也与水体的富营养化有密切联系^[20]。由图 4 可知,不同来源的湖泊沉积物中 DOM 含量为 1.13~3.40 g/kg,

占总有机质的 2.41%~11.59%。其中污染严重的月湖、玄武湖沉积物中 DOM 含量较高,为 2.66~3.40 g/kg;分布在鄱阳湖的主航道、洪泽湖、太湖(梅梁湾、贡湖和五里湖)和洞庭湖沉积物中的 DOM 含量为 1.13~1.87 g/kg。这与长江中下游浅水湖泊有机质含量的分布规律相似。

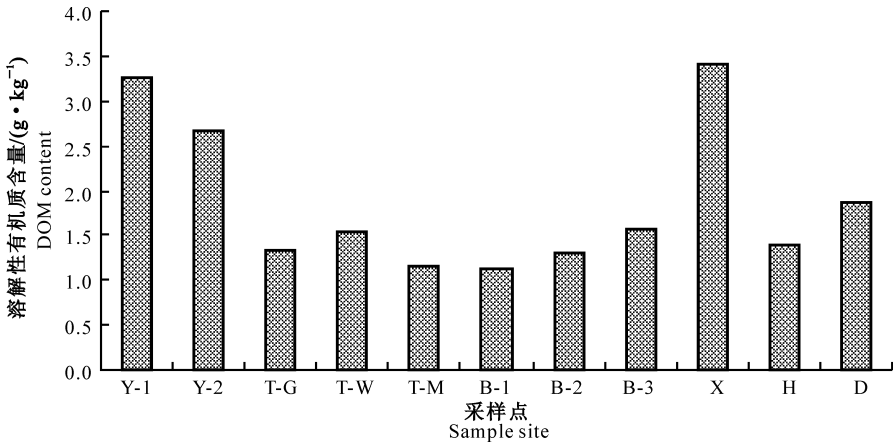


图 4 长江中下游浅水湖泊沉积物中溶解性有机质的含量

Fig. 4 Contents of DOM in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

紫外-可见吸收光谱是最早应用于表征腐殖质光谱特性的分析方法之一^[21-23]。由于溶解性有机质中含有各种亲水有机酸、羧酸、氨基酸、碳水化合物以及腐殖酸和富里酸等^[24],通常其吸光度随着波长减小而增大,且没有特征峰值。由图 5 可见,长江中下游浅水湖泊沉积物中,溶解性有机质在 254 nm 和 280 nm 处的吸光度值 a_{254} 、 a_{280} 的分布规律,与溶解性有机质的分布规律较相似(图 4)。这是因为溶解性有机质中的主要组分如腐殖酸、富里酸以及一些芳香性氨基酸等所带来的苯基、苯羟基、苯羧基等集

团,在这一波长具有强吸收。
溶解性有机质在 300 和 400 nm 处的吸光度比值 E_3/E_4 ,是衡量腐殖质的腐殖化程度、芳香性以及分子量等的参数^[21-22]。一般而言,随着 E_3/E_4 的减小,腐殖质的腐殖化程度、芳香性及分子量相对增大^[23]。Artinger 等^[22]的研究表明,一般腐殖酸的 E_3/E_4 值小于 3.5。由图 6 可知,长江中下游浅水湖泊沉积物中溶解性有机质的 E_3/E_4 值为 3~6。由此推断,在本研究条件下,长江中下游浅水湖泊沉积物溶解性有机质腐殖化程度较低,芳香性较小,而

分子量的分布应以小分子量的富里酸为主,大分子量的腐殖酸含量相对较少。

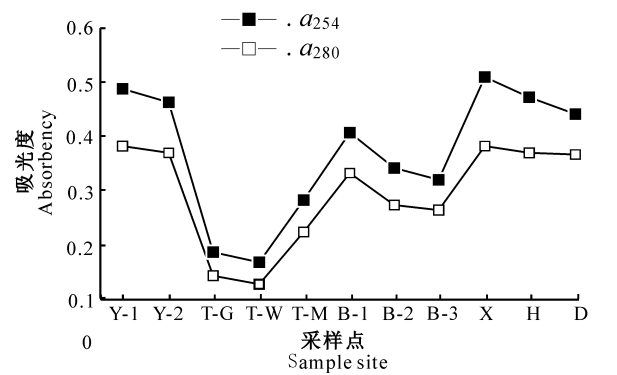


图 5 湖泊沉积物中 DOM 的 a_{254} 和 a_{280} 分布特征
Fig. 5 Distribution of a_{254} and a_{280} for the DOM in sediment of various lakes

2.2.3 轻组有机质和重组有机质 Janzen 等^[14]利用比重浮选法将沉积物有机质分为轻组有机质(比重<1.7)和重组有机质(比重>1.7)2 个部分。轻组有机质(LFOM)主要包括处于不同分解阶段的植物残体、小的动物和微生物,具有较高的碳/氮比,周转时间短,代表着易变有机质的主要部分,其含量与土壤呼吸速率、矿化碳、矿化氮等均有显著的正相关^[25-27],轻组有机质含量及其占有机质的比例反映了积累有机质的分解程度^[28]。重组有机质(HFOM)是由轻组有机质彻底分解后残留的或重新合成的、以芳香族物质为主体的有机质(主要是腐

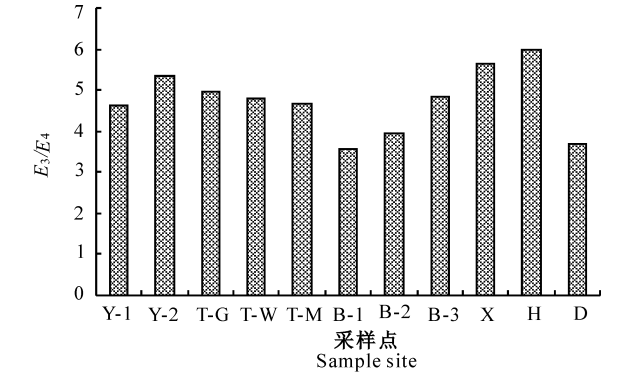


图 6 湖泊沉积物中 DOM 的 E_3/E_4 分布
Fig. 6 Distribution of E_3/E_4 for the DOM in sediment of various lakes

殖质),因其结构复杂,所以分解速度十分缓慢。由图 7 可见,轻组有机质含量为 0.34~9.78 g/kg,占总有机质的 2.25%~16.89%;其中污染严重的月湖、玄武湖沉积物中轻组有机质含量较高,为 3.18~9.78 g/kg;分布在鄱阳湖主航道、洪泽湖、太湖和洞庭湖沉积物中的轻组有机质含量为 0.34~2.56 g/kg。重组有机质含量为 8.68~100.26 g/kg,占总有机质的 83.11%~97.75%,表明沉积物中轻组有机质基本被彻底分解,所含的少量有机质大部分为很难分解的重组有机质。

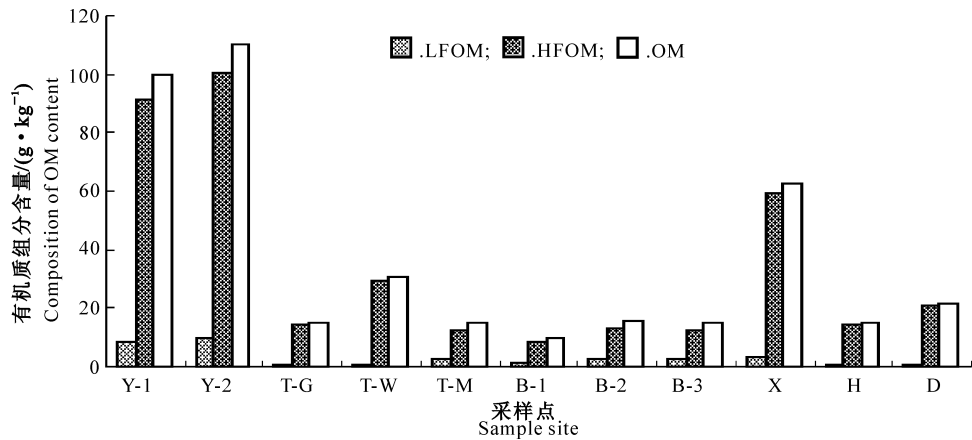


图 7 长江中下游浅水湖泊沉积物中轻组有机质和重组有机质的含量
Fig. 7 Contents of different LFOM and HFOM in the sediments of various lakes

2.3 浅水湖泊表层沉积物中不同组分有机质与总有机质之间的关系

DOM、LFOM、HFOM、LOM 是湖泊沉积物中有机质的重要组成部分,其含量与总有机质(OM)含量密切相关。由表 1 可见,DOM、LFOM、

HFOM、LOM 与 OM 之间均呈现显著的正相关关系($P<0.01$),说明 DOM、LFOM、HFOM、LOM 代表了不同组分的有机质。这与王清奎等^[15]的研究结果一致。由表 1 还可见,DOM、LOM、LFOM 和 HFOM 两两之间互为显著正相关关系($P<0.05$),

这也说明有机质的各组分并不是截然分开的,它们之间有的相互包含。

表 1 长江中下游浅水湖泊沉积物中总有机质及各组分有机质之间的相互关系($n=11$)

项目 Item	OM	LOM	DOM	LFOM	HFOM
OM	1	0.986**	0.839**	0.931**	0.999**
LOM	—	1	0.855**	0.920**	0.986**
DOM	—	—	1	0.697*	0.868**
LFOM	—	—	—	1	0.917**
HFOM	—	—	—	—	1

注:*, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。下表同。
Note: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$. The following table is same.

2.4 沉积物物理化学组成对有机质和各组分有机质含量的影响

在复杂的湖泊环境中,沉积物的物理化学组成是影响有机质和各组分有机质含量的重要因素。利用 Pearson 积矩相关系数(两尾)检验,对 11 个沉积物中的 OM、LOM、DOM 和 LFOM 与其理化参数进行相关分析,结果见表 2。在 $P=0.01$ 时,OM、LOM、DOM 与 TP、CEC、粘粒(Clays)和粉沙粒

(Silt)之间存在显著的正相关关系,与粗沙粒(Sand)、 SiO_2 存在显著负相关关系;LFOM 与 OM、TP、CEC 之间存在显著正相关关系,与 SiO_2 存在显著负相关关系。在 $P=0.05$ 时,OM、LOM、DOM 与 CaO 存在显著正相关关系,与 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 存在正相关关系,但不显著;而 LFOM 与粉沙粒存在显著正相关关系,与 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 存在正相关关系,但不显著,其原因有待进一步探讨。

表 2 长江中下游浅水湖泊沉积物中各种有机质与沉积物理化参数的相关关系($n=11$)

项目 Item	OM	TP	CEC	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	粘粒 Clay	粉沙粒 Silt	粗沙粒 Sand
OM	1	0.971**	0.919**	0.455	0.290	0.664*	-0.867**	0.759**	0.855**	-0.859**
LOM	0.986**	0.968**	0.890**	0.452	0.289	0.667*	-0.845**	0.768**	0.847**	-0.854**
DOM	0.859**	0.781**	0.732*	0.382	0.325	0.638*	-0.738**	0.745**	0.792**	-0.802**
LFOM	0.931**	0.911**	0.830**	0.473	0.102	0.552	-0.796**	0.587	0.682*	-0.681*

3 讨 论

本研究所选取的沉积物,是长江中下游浅水湖泊区经多点采样混合后得到的,其污染程度和理化特征均存在较大差异^[6,29]。城市湖泊月湖、玄武湖位于老城区或市中心地带,由于人为因素的影响,导致水体处于严重富营养化状态;太湖、鄱阳湖、洪泽湖、洞庭湖属于大型自然湖泊,污染相对较轻,水体一般处于中-富营养化状态^[6]。因而,城市湖泊沉积物均较自然湖泊沉积物污染严重,有机质含量较自然湖泊沉积物高。活性有机质是土壤有机质的活性部分,是土壤有机质中最不稳定的部分,也是植物营养的主要来源^[14,18],一般占总有机质的 7%~32%^[30],这与本研究中长江中下游沉积物中活性有机质所占比例相似(占总有机质的 19.62%~31.86%)。Whitbread 等^[31]认为,活性有机质包括了众多游离度较高的有机质,如植物残茬、根类物质、真菌菌丝、微生物及其渗出物如多糖等。而溶解性有机质包括一系列有机物,从简单的有机酸到复杂

的大分子如胡敏酸、富里酸,但主要部分为水溶性有机质;轻组有机质主要包括处于不同分解阶段的植物残体、小的动物和微生物,具有较高的周转速率。因而 DOM、LOM 和 LFOM 两两之间互为显著正相关关系($P<0.05$)。说明利用不同的分组方法得到的有机质各组分并不是截然分开的,它们之间相互包含。譬如 DOM 是 LOM 的组成部分,也可能是 LFOM 的组成部分^[15]。

长江中下游浅水湖泊沉积物的颗粒组成,主要以粉沙粒和粘粒为主,而一般认为粘粒含量高的土壤,有机质活性也较高,主要是因为土壤粘粒含量高,土壤含水量变化较小或有机质受土壤粘粒的保护而不被大型土壤动物所取食^[32]。从表 2 可以看出,沉积物 CEC 含量与沉积物中有机质及其组分的含量呈正相关,其可能的原因是由于有机质含有大量可离解官能团,如 OH—、COO—等,能起到吸附阳离子的作用^[33]。同时,据前人研究结果可知,总磷含量与沉积物有机质含量有很好的相关性,总磷含量越高,沉积物有机质含量也越高^[6,31]。可见,影

响湖泊沉积物中有机质组分的因素是多方面的。

4 结 论

1) 长江中下游浅水湖泊 11 个采样点沉积物的有机质含量为 9.80~110.04 g/kg。城市湖泊沉积物均较自然湖泊沉积物污染严重,有机质含量均较自然湖泊沉积物高,平均值是自然湖泊的 5 倍以上。

2) 由化学分组了解到活性有机质(LOM)含量为 2.48~26.32 g/kg,占总机质的 19.62%~31.86%;溶解性有机质(DOM)含量为 1.13~3.40 g/kg,占总机质的 2.41%~11.59%;污染严重的月湖、玄武湖有机质和各组分有机质的含量高于污染较轻的鄱阳湖、洪泽湖、太湖和洞庭湖。表明湖泊沉积物中有机质含量及组分含量与湖泊沉积物污染程度关系密切。

3) 由物理分组法了解到沉积物轻组有机质含量在 0.34~9.78 g/kg,占总有机质的 2.25%~16.89%;重组有机质含量在 8.68~100.26 g/kg,占总有机质的 83.11%~97.75%。轻组有机质基本被彻底分解,所含的少量有机质大部分为很难分解的重组有机质。

4) DOM 紫外-可见吸收光谱中 E_3/E_4 值为 3~6,表明浅水湖泊沉积物 DOM 腐殖化程度较低,芳香性较小,而分子量的分布应以小分子量的富里酸为主,大分子量的腐殖酸含量相对较少。

5) OM 中的 LOM、DOM、LFOM 两两之间呈现显著的相关性;且均与沉积物 TP、CEC 和粉沙粒(Silt)存在显著的正相关关系,与粗沙粒(Sand)、 SiO_2 存在显著的负相关关系。

【参考文献】

- [1] 朱广伟,陈英旭.沉积物中有机质的环境行为研究进展[J].湖泊科学,2001,13(3):272-279.
Zhu G W, Chen Y X. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments [J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(3): 272-279. (in Chinese)
- [2] D'Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column [J]. J Environ Qual, 1994, 23(5): 928-936.
- [3] Gachter R, Wehrli B. Ten years of artificial mixing and oxygenation: no effect on the internal phosphorus loading of two eutrophic lakes [J]. Environ Sci Tech, 1998, 32(3): 3659-3665.
- [4] Koning N, Roos J C. The continued influence of organic pollution on the water quality of the turbid Modder River [J]. Water S A, 1999, 25(6): 285-292.

- [5] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,4(3):193-202.
Qing B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 4(3): 193-202. (in Chinese)
- [6] Wang S R, Jin X C, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediments compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 289: 339-346.
- [7] 王东红,黄清辉,王春霞,等.长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布[J].环境科学,2004,25(增刊):27-30.
Wang D H, Huang Q H, Wang C X, et al. Temporal and spatial distribution of total nitrogen and its species in shallow eutrophic lakes of China [J]. Environmental Science, 2004, 25(sup): 27-30. (in Chinese)
- [8] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem, Eng Aspects, 2007, 297: 154-162.
- [9] Von Lützowa M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 3(7): 2183-2207.
- [10] 吴建国,徐德应.土地利用变化对土壤有机碳的影响——理论、方法和实践[M].北京:中国林业出版社,2004:28-30.
Wu J G, Xu D Y. Effect of land use variation on soil organic carbon——Theory, method and practice [M]. Beijing: China Forest Press, 2004: 28-30. (in Chinese)
- [11] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:121-134.
Nanjing Institute of Soil, Chinese Academy of Science. Soil and physical chemistry analysis [M]. Shanghai: Shanghai Technology Press, 1978: 121-134. (in Chinese)
- [12] Baham J, Sposito G. Chemistry of water-soluble, metal-complexing ligands extracted from an anaerobically digested sewage sludge [J]. J Environ Qual, 1983, 12(1): 96-100.
- [13] 于荣,许明岗,王伯仁.土壤活性有机质测定方法比较[J].土壤肥料,2005(2):49-52.
Yu R, Xu M G, Wang B R. Study on methods for determining labile organic matter of soils [J]. Soil Fertilizer, 2005(2): 49-52. (in Chinese)
- [14] Janzen H H, Campbell C A, Brabdt A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1799-1806.
- [15] 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.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513-519. (in Chinese)
- [16] Haynes R J, Swift R S, Stephen R C. Influence of mixed crop-

- ping rotations (Pastures-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils [J]. *Soil Tillage Res.*, 1991, 19: 77-87.
- [17] Olk D C. A chemical fractionation for structure-function relations of soil organic matter in nutrient cycling [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1013-1022.
- [18] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fraction based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [19] Johns M M, Skogley E O. Soil organic matter testing and labile carbon identification by carbonaceous resin capsules [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, 58: 751-758.
- [20] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为 [J]. *环境化学*, 2003, 22(5): 427-433.
- Xu Z J, Liu G S, Liu W P. Environmental characteristic and behavior of dissolved organic matter in soils [J]. *Environmental chemistry*, 2003, 22(5): 427-433. (in Chinese)
- [21] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, 28(11): 1853-1858.
- [22] Artinger R, Buckau G, Geyer S, et al. Characterization of groundwater humic substances: influence of sedimentary organic carbon [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(1): 97-116.
- [23] 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强. 洱海沉积物间隙水中溶解性有机质的地球化学特征 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 338-344.
- Fu P Q, Wu F C, Liu C Q. Geochemical characteristics of dissolved organic matter in the sediment pore water of Erhai lake [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 338-344. (in Chinese)
- [24] Leenheer J A, Groué J-P. Characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(1): 19A-26A.
- [25] 倪进治, 徐建明, 谢正苗. 土壤轻组有机质 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 1(2): 58-64.
- Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Soil light fraction organic matter. Techniques and equipments for environmental pollution control [J]. 2000, 1(2): 58-64. (in Chinese)
- [26] Strickland T C, Sollins P. Improved method for separating light and heavy fraction organic matter from soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1390-1393.
- [27] 武云天, Schoenau J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- Wu Y T, Schoenau J J, Li F M. Concepts and relative analytical techniques of soil matter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717-722. (in Chinese)
- [28] 张文菊, 吴金水, 肖和艾, 等. 三江平原典型湿地部面有机碳分布特征与积累现状 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 558-562.
- Zhang W J, Wu J S, Xiao H A, et al. Profile distribution characteristics and accumulation of organic carbon in typical wetlands in SANJIANG plain [J]. *Advance in Earth Science*, 2004, 19(4): 558-562. (in Chinese)
- [29] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究 [J]. *环境科学研究*, 2004, 17(增刊): 24-29.
- Meng F D, Jiang X, Jin X C. Physico-Chemical characteristics of the sediments in lakes from the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(sup): 24-29. (in Chinese)
- [30] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1994, 26: 1647-1656.
- [31] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669-681.
- [32] Franzluebbers A J, Haney R L, Hons F M. Active fraction of organic matter in soils with different texture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 1367-1372.
- [33] 陈华林. 沉积物对有机污染物的不可逆吸附行为研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 32-60.
- Chen H L. Irreversible sorption behaviors of organic pollution in sediments [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 32-60. (in Chinese)