

乌梁素海和岱海沉积物有机碳的形态特征

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, 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,开展湖泊沉积物中有机碳的形态特征研究,对比分析了2个湖泊沉积物有机碳的形态特征及其差异性。结果表明,乌梁素海沉积物中总有机碳(TOC)含量范围为4.50~22.83 g·kg⁻¹,平均11.80 g·kg⁻¹;重组碳(HFOC)含量范围为3.38~21.67 g·kg⁻¹,平均10.76 g·kg⁻¹;轻组碳(LFOC)含量范围为0.46~1.80 g·kg⁻¹,平均1.04 g·kg⁻¹;易氧化碳(ROC)含量范围为0.62~3.64 g·kg⁻¹,平均2.11 g·kg⁻¹。岱海沉积物中TOC的含量范围为6.84~23.46 g·kg⁻¹,平均14.94 g·kg⁻¹;HFOC的含量范围为5.27~22.23 g·kg⁻¹,平均13.89 g·kg⁻¹;LFOC的含量范围为0.76~1.57 g·kg⁻¹,平均1.05 g·kg⁻¹;ROC的含量范围为1.54~7.08 g·kg⁻¹,平均3.62 g·kg⁻¹。2个湖泊沉积物中的TOC均以HFOC为主,HFOC对TOC的积累有重要作用。乌梁素海沉积物中TOC和HFOC含量均低于岱海,2个湖泊LFOC含量相近,但乌梁素海沉积物中LFOC占TOC的质量分数高于岱海。2个湖泊表层沉积物腐殖质(HS)均以胡敏素(HM)为主,富里酸次之。乌梁素海表层沉积物中HM占HS总量的质量分数介于43.06%~77.25%,平均62.15%;岱海表层沉积物中HM占HS总量的质量分数介于49.23%~73.85%,平均65.30%。紧结态为2个湖泊沉积物腐殖质的主导形态,松结态次之。乌梁素海表层沉积物中紧结态占腐殖质总量的59.17%~67.92%,平均67.92%;岱海表层沉积物中紧结态占腐殖质总量的65.49%~81.04%,平均66.38%。总体上,2个湖泊沉积物碳库均为相对稳定碳库,但PQ值、LFOC/TOC、松紧比以及不同结合形态的HA/FA均揭示,乌梁素海沉积物有机质的腐殖化程度较低,腐殖质的活性较高,乌梁素海沉积物碳库不及岱海稳定。

关键词:湖泊;沉积物;有机碳;腐殖质;形态

中图分类号:X143 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2011)03-0658-09

Characteristics of Organic Carbon Forms in the Sediment of Wuliangsuhai and Daihai Lakes

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

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

Abstract: The characteristics and differences of organic carbon forms in the sediments of the Wuliangsuhai and the Daihai Lakes with different eutrophication types were discussed in the present study. The results showed that the range of total organic carbon content (TOC) in Wuliangsuhai Lake was 4.50~22.83 g·kg⁻¹ with the average of 11.80 g·kg⁻¹. The range of heavy-fraction organic carbon content was 3.38~21.67 g·kg⁻¹ with the average of 10.76 g·kg⁻¹. The range of light-fraction organic carbon content was 0.46~1.80 g·kg⁻¹ with the average of 1.04 g·kg⁻¹; The range of ROC content was 0.62~3.64 g·kg⁻¹ with the average of 2.11 g·kg⁻¹, while the range of total organic carbon content in Daihai lake was 6.84~23.46 g·kg⁻¹ with the average of 14.94 g·kg⁻¹. The range of heavy-fraction organic carbon content was 5.27~22.23 g·kg⁻¹ with the average of 13.89 g·kg⁻¹. The range of light-fraction organic carbon content was 0.76~1.57 g·kg⁻¹. The range of ROC content was 1.54~7.08 g·kg⁻¹ with the average of 3.62 g·kg⁻¹. The results indicated that the heavy-fraction organic carbon was the major component of the organic carbon and plays an important role in the accumulation of organic carbon in the sediments of two Lakes. The content of light-fraction organic carbon was similar in the sediments of two lakes, whereas, the contents of total organic carbon and heavy-fraction organic carbon in the sediment of Wuliangsuhai Lake were less than those in the sediment of Daihai Lake, and the value of LFOC/TOC in the Wuliangsuhai Lake was larger than that in the Daihai Lake. The humin was the dominant component of the sediment humus, followed by fulvic acid in the two lakes. The values of HM/HS in the sediments of Wuliangsuhai lake range from 43.06% to 77.25% with the average of 62.15% and values of HM/HS in the sediments of Daihai lake range from 49.23% to 73.85% with the average of 65.30%. The tightly combined humus was the dominant form in the sediment humus of two lakes, and the followed was loosely combined humus. As a whole, the carbon storage of two lakes were all relatively stable, but the values of PQ, LFOC/TOC, the ratio of loosely to tightly combined humus and HA/FA revealed that, in the sediment of Wuliangsuhai, the humification degree of organic matter was lower than that of Daihai, while the activity of humus was higher than that of Daihai, thus the carbon storage is less stable than that of Daihai.

Key words: lake; sediment; organic carbon; humus; forms

收稿日期:2010-03-14; 修订日期:2010-10-05

基金项目:国家自然科学基金项目(40863003); 内蒙古自然科学基金项目; 内蒙古大学“科技创新团队”基金项目

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。

* 通讯联系人, E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

湖泊碳循环是陆地生态系统碳循环的重要组成部分^[1~3]。湖泊因其封闭和静水特征,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^[4]。随全球性湖泊富营养化的加剧,湖泊的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^[5]。

湖泊沉积物是陆地上重要的有机碳库。腐殖质占湖泊沉积物有机质总量的 70%~80%,甚至高达 99%^[6]。湖泊沉积物有机质的分解对全球碳循环有重要影响,有机碳的形态研究对有机碳的固定和循环机制研究具有重要意义。迄今为止,有关湖泊沉积物有机碳循环,特别是有机碳的形态特征及其碳循环意义研究未得到应有重视^[7~14]。本实验以富营养化类型不同的乌梁素海和岱海为对象,开展了湖泊沉积物中有机质及其组成特征的研究,对比分析了 2 个湖泊沉积物有机碳的组分特征及其差异性,以期对内蒙古高原湖泊湿地资源的合理开发与保护利用提供科学依据,为湖泊沉积物有机碳循环研究积累基础资料。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°47'~41°03'N, 108°43'~108°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 km²,80% 水域水深 0.8~1.0 m。农田退水是该湖最主要的补给水源,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^[15]。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 kg/m²,平均 12.85 kg/m²。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 9~13 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,正向芦苇沼泽→碱蓬盐化草甸→白刺荒漠方向演化^[16]。

岱海(40°29'27"~40°37'6"N, 112°33'31"~112°

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^[17],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 km²,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^[17];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,成为我国全球变化研究中备受重视的地区。

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 月对乌梁素海和岱海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 och B 型无扰动采样器采集,现场以 2 cm 间隔分层,沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于 -24℃ 冷冻保存。采样点用 GPS 定位。

1.3 实验方法

实验样品为乌梁素海及岱海表层(0~10cm)和柱状沉积物风干样。有机质总量用重铬酸钾氧化外加加热法(FHZDZTR0046)测定,易氧化碳(readily oxidizable carbon)用 KMnO₄ 氧化法^[18,19]测定,轻组有机质用比重分离方法测定^[20]。

腐殖质的结合形态和组成采用文献[21]方法分析。其中,松结态富里酸碳量为松结态有机碳总量与松结态胡敏酸碳量的差值,稳结态富里酸碳量为稳结态有机碳总量与稳结态胡敏酸碳量的差值,胡敏酸总量为松结态胡敏酸碳量与稳结态胡敏酸碳量之和,富里酸总量为松结态富里酸碳量与稳结态富里酸碳量之和,紧结态腐殖质碳量(即胡敏素碳量)为重组碳量与松结态碳总量和稳结态碳总量的差值。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中总有机碳及其形态特征

2 个湖泊表层沉积物中有机碳不同组分含量见表 1。

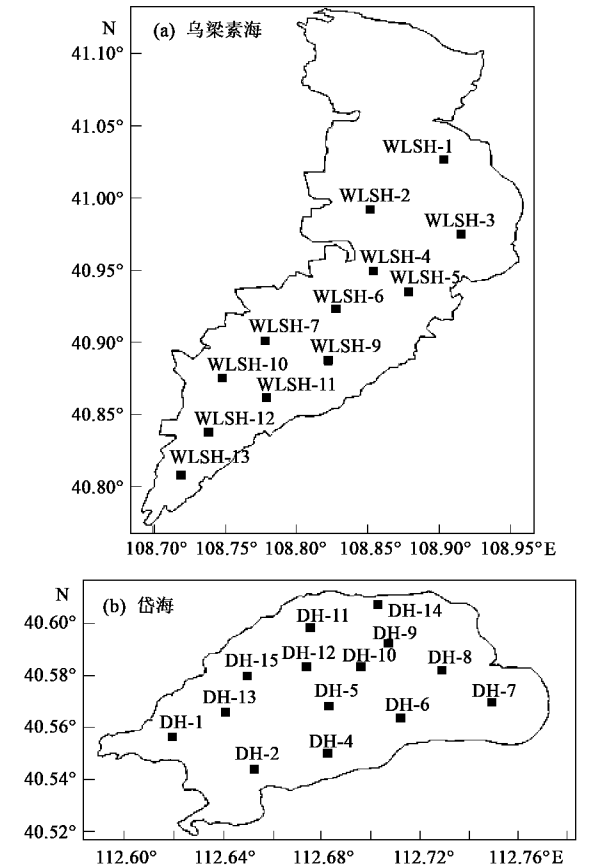


图1 乌梁素海和岱海样点分布

Fig. 1 Location of sampling sites in Wuliangsuhai Lake and Daihai Lake

表1 乌梁素海与岱海表层沉积物中有机碳不同组分的含量 /g·kg⁻¹

参数	乌梁素海			岱海		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
TOC	22.83	4.50	11.80	23.46	6.84	14.94
ROC	3.64	0.62	2.11	7.08	1.54	3.62
LFOC	1.80	0.46	1.04	1.57	0.76	1.05
HFOC	21.67	3.38	10.76	22.23	5.27	13.89

2 个湖泊表层沉积物中的有机碳均以重组碳为主。乌梁素海重组碳占总有机碳的 75.01% ~ 97.37%, 平均 88.5%; 岱海重组碳占总有机碳的 77.05% ~ 95.35%, 平均 91.7%。重组有机质为主要存在于有机-无机复合体中的有机质, 主要成分为腐殖质(HS)^[22,23]。重组有机质的生物活性相对较低, 很难被微生物利用, 是土壤的稳定碳库^[24]。2 个湖泊轻组碳占总有机碳的百分比均较低。乌梁素海轻组碳占总有机碳的 2.63% ~ 24.99%, 平均 11.55%; 岱海轻组碳占总有机碳的 5.22% ~

22.95%, 平均 8.28%。轻组有机质由未分解彻底的植物残体及其碎片组成, 还包括少量活的微生物及其分泌物等, 具有易被微生物分解和利用等特性。轻组有机质具有较高的周转速率^[25]、相对高的 C/N 比^[26]、相对密度显著低于土壤矿物, 被认为是土壤的活性碳库。高比例的重组有机碳和低比例的轻组有机碳说明 2 个湖泊表层沉积物中碳库相对稳定, 重组碳对总有机碳的积累有相当重要的作用。

岱海表层沉积物中易氧化碳的含量是乌梁素海的 1.72 倍。易氧化碳能很好地反映土壤中活性有机碳的含量, 是土壤中活性有机碳含量的重要指示因子。而活性有机碳是土壤中有效性较高、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那部分有机质^[20,27], 2 个湖泊沉积物中微生物量及其活性的差异也证实了这种活性有机碳含量的差别。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。本研究小组前期研究结果表明, 岱海表层沉积物(以干重计)中微生物磷脂的平均含量(73.65 nmol/g)为乌梁素海(58.12 nmol/g)的 1.27 倍(数据未发表), 表明岱海表层沉积物中微生物量及其活性均较高。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沉积物中的活性有机碳而造成易氧化碳含量降低。而岱海为深水藻型湖泊, 加之岱海水动力条件和沉积环境相对稳定, 有利于有机碳的沉积与活性有机碳的保存。易氧化碳含量的差异也揭示了不同富营养类型湖泊对其有机质形态的影响。

2.2 沉积物柱芯中总有机碳及其形态特征

WLSH-1 沉积柱芯中总有机碳含量随深度呈明显下降趋势。WLSH-5 沉积柱芯中, 0 ~ 15 cm 深度内总有机碳含量总体恒定, 然后随深度逐渐增加, 至 20 cm 处达到峰值, 再随深度下降至 25 cm 处。25 cm 以后, 有机碳含量基本稳定。DH-5 沉积柱芯中总有机碳含量随深度略有波动但总体仍表现恒定。DH-10 沉积柱芯中总有机碳含量随深度而缓慢降低(图 2)。一般认为, 土壤有机碳含量与土层深度密切相关, 随深度增加呈指数下降趋势^[28~31]。本研究结果表明, 除 WLSH-1 柱芯中总有机碳的垂向分布基本呈指数下降外, 其它柱芯中总有机碳的垂向分布均不符合此规律, 即使同一湖泊不同湖区沉积柱芯中总有机碳的垂向变化也存在较大差异。造成这种差异的原因目前还不是很明确, 可能与流域的气候、环境条件变化和突发事件有关, 需要更多深入的研究。此外, 2 个湖

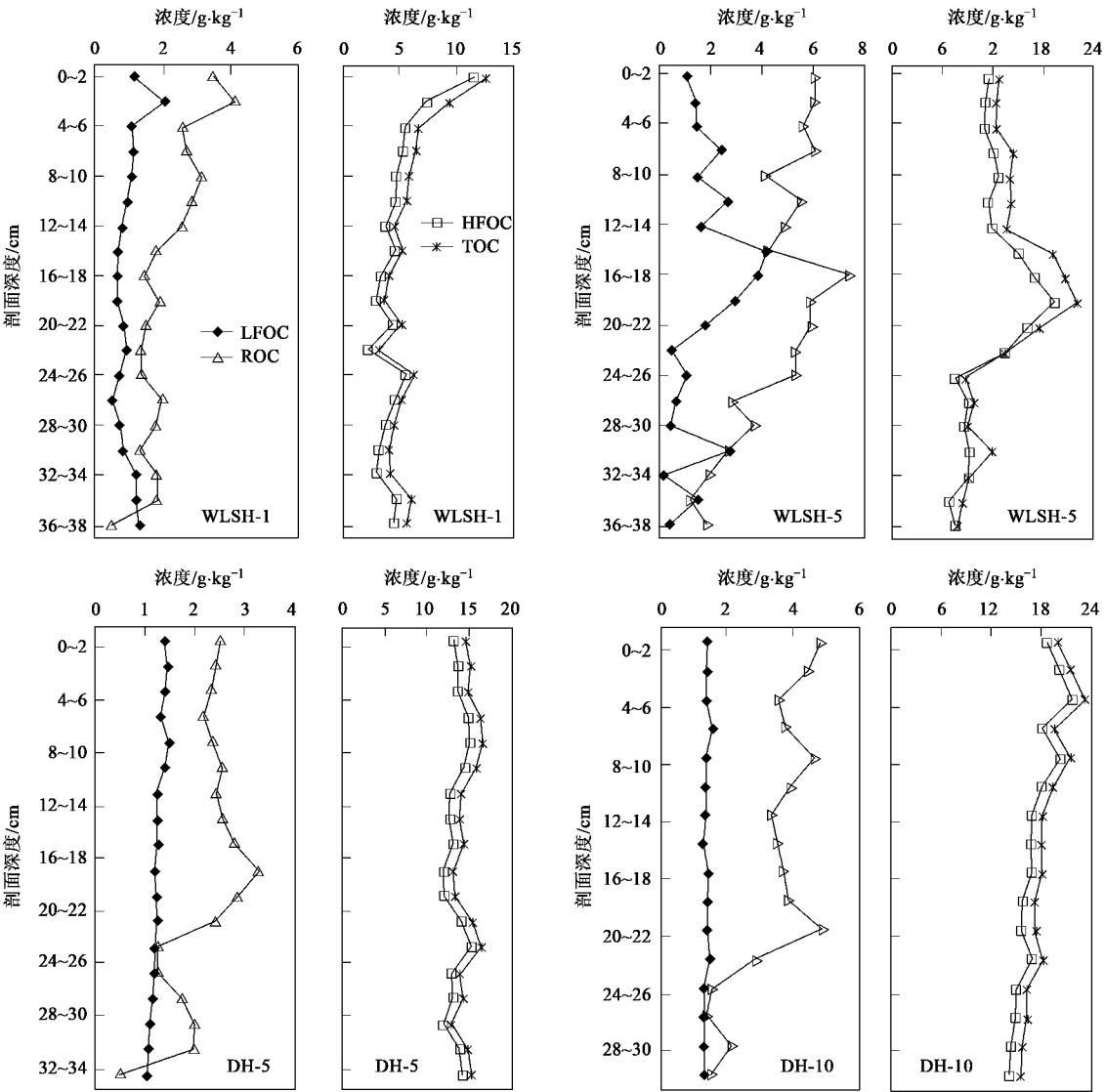


图2 乌梁素海与岱海柱芯沉积物中有机碳不同组分的含量

Fig. 2 Concentrations of different organic carbon species in WLSH and DH sediment cores

泊沉积柱芯中重组碳的垂向变化趋势与总有机碳完全一致,主要是由于重组碳是有机碳的主要组成部分,乌梁素海和岱海沉积柱芯中重组碳与总有机碳的相关系数分别高达0.97和0.99.

计算结果表明,2个湖泊沉积柱芯中的有机碳仍以重组碳为主. WLSH-1和WLSH-5沉积柱芯中重组碳占总有机碳的平均质量分数分别为81.71%和87.91%,DH-5和DH-10沉积柱芯中重组碳占总有机碳的平均质量分数(DW)分别为91.42%和92.42%. 以上研究结果揭示乌梁素海沉积物中有机质的可被分解程度高于岱海,岱海沉积物碳库较乌梁素海相对稳定. 这可能与2个湖泊有机质来源,以及2个湖泊沉积柱芯中微生物量及其活性的

差异有关. 至于2个湖泊沉积柱芯中易氧化碳含量的差异,除与微生物量碳的含量有关外,可能还与乌梁素海沉积柱芯中轻组碳占总有机碳的比例高于岱海有关.

2.3 沉积物腐殖质组成

2个湖泊表层沉积物腐殖质(HS)均以胡敏素(HM)为主. 乌梁素海表层沉积物中HM占HS总量的质量分数(DW)介于43.06%~77.25%,平均62.15%;岱海表层沉积物中HM占HS总量的质量分数介于49.23%~73.85%,平均65.30%.

2个湖泊表层沉积物中富里酸(FA)均高于胡敏酸(HA),乌梁素海和岱海表层沉积物中FA最高可分别占HS总量的36.31%和32.24%,平均分别

为 24.45% 和 19.26% (表 2). 此研究结果与太湖沉积物中 HS 组成^[32] 相似, 但与土壤 HS 组成存在差异^[33,34]. 酸性和缺氧条件有利于 HA 的形成^[35~37], 碱性和富氧条件有利于 FA 的形成^[38~42]. 乌梁素海和岱海均呈弱碱性条件, 因而均有利于 FA 的形成. 此外, 乌梁素海为浅水草型湖泊, 大气复氧作用以及植物残体分解时 FA 形成的速度大于 HA 等均有利于 FA 的形成与积累.

Piccolo^[43] 认为, HA 和 HM 代表了土壤持久稳定有机碳库的绝大部分. HM 是土壤有机质中最难分解的组分^[44]. 依据 HA 和 FA 的溶解性及活化度^[45,46], 认为 HA 更为稳定. 同一土壤不同 HS 组分的分解速率依次为腐殖质的酸提取组分 > FA > HM

> HA, HA 和 HM 的酸解组分 > 酸解残渣^[47]. 但迄今为止, 关于 HS 组分的稳定性问题仍没有具体结论^[48]. 尽管如此, 结合本文的综合研究结果, 仍可初步推测, 2 个湖泊表层沉积物总体上为相对稳定碳库, 并且岱海沉积物碳库比乌梁素海更为稳定.

PQ 为 FA 占腐殖酸的质量分数, 可作为腐殖化程度的指标, 表征 HS 组成的变化^[49]. 乌梁素海沉积物的 PQ 值介于 11.45% ~ 57.69%, 平均为 34.55%; 岱海沉积物的 PQ 值介于 25.40% ~ 66.43%, 平均为 45.90% (表 2). 2 个湖泊表层沉积物的 PQ 值变化较大, 揭示 2 个湖泊的腐殖化程度存在空间差异.

表 2 表层沉积物腐殖质组成

Table 2 Concentration of humus composition in WLSH and DH surface sediments

项目	HA/g·kg ⁻¹	HA/%	FA/g·kg ⁻¹	FA/%	PQ ¹⁾ /%	HM/g·kg ⁻¹	HM/%	
WLSH	WLSH-1	0.60	17.75	0.44	13.02	57.69	2.34	69.23
	WLSH-3	2.69	12.41	6.09	28.04	13.00	12.91	59.55
	WLSH-4	0.50	4.70	3.83	36.31	11.45	6.22	58.99
	WLSH-5	1.36	15.27	2.73	30.78	33.16	4.79	53.95
	WLSH-6	1.76	12.23	2.40	16.69	42.29	10.24	71.07
	WLSH-7	0.67	6.23	3.06	28.56	17.92	6.98	65.20
	WLSH-9	1.34	21.89	1.22	19.89	52.39	3.58	58.23
	WLSH-10	0.93	9.06	2.68	26.03	25.82	6.68	64.92
	WLSH-11	1.36	29.36	1.28	27.59	51.55	1.99	43.06
	WLSH-12	0.79	5.14	2.70	17.62	22.58	11.86	77.25
DH	DH-1	1.88	18.53	3.27	32.24	36.49	4.99	49.23
	DH-2	1.47	17.77	1.34	16.21	52.29	5.45	66.02
	DH-4	0.92	17.53	0.47	8.86	66.43	3.88	73.61
	DH-5	1.69	12.17	1.96	14.11	46.32	10.27	73.73
	DH-6	1.48	6.64	4.34	19.51	25.40	16.42	73.85
	DH-7	2.01	15.56	1.81	14.03	52.58	9.08	70.41
	DH-9	2.99	15.37	2.26	11.61	56.98	14.20	73.02
	DH-10	2.91	18.79	4.71	30.36	38.22	7.88	50.85
	DH-11	3.21	15.23	3.57	16.97	47.30	14.27	67.80
	DH-12	1.71	16.84	2.92	28.72	36.96	5.53	54.45

1) PQ (%) = HA / (HA + FA)

WLSH-1 沉积柱芯中 HA、HM 和 FA 随深度的变化趋势与该沉积柱芯中重组碳的变化趋势基本相似, 并以 HA 和 FA 为主, HM 含量较低 (图 3). WLSH-5 沉积柱芯中 HM (包括 HA) 的垂向变化与该沉积柱芯中重组碳随深度的变化趋势十分相似, 也在 15 ~ 25

cm 深度内出现峰值, 反映了该沉积柱芯中 HS 组成以 HM 和 HA 为主的特点. DH-5 沉积柱芯中 HA、HM 和 FA 随深度的变化与该沉积柱芯中重组碳的分布特征也基本相似, 但在 20 cm 深度以下, HM 和 HA 随深度增加的趋势较重组碳明显, 揭示随深度增加, 沉

积物碳库的稳定性增大. DH-10 沉积柱芯中 HA、HM 和 FA,特别是 HM 与该沉积柱芯中重组碳的垂向变化趋势基本相似,反映了该沉积柱芯中 HS 组成以 HM 为主的特点. 总体上,除 WLSH-1 外,其它 3 个柱芯中的 HS 组成均以 HM 为主.

PQ 值的计算结果表明,WLSH-1 沉积柱芯表层及底层腐殖化度较高,中间层较低;WLSH- 5 和 DH-10沉积柱芯表层及底层腐殖化度低于中间层;DH-5 沉积柱芯拥有最高的 PQ,揭示岱海湖心区腐殖化程度较高.

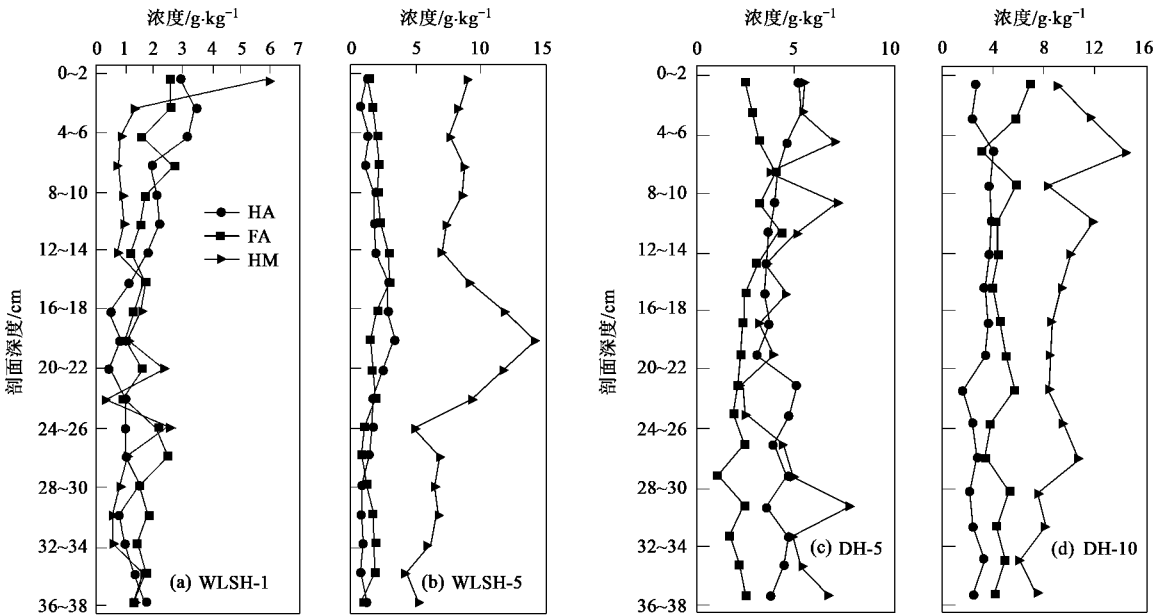


图3 沉积物柱芯中腐殖质组成

Fig.3 Concentration of humus composition in WLSH and DH sediment cores

2.4 沉积物腐殖质结合形态

2 个湖泊表层沉积物中腐殖质各结合形态占腐殖质总量的质量分数依序为紧结态>松结态>稳结态,紧结态为 2 个湖泊表层沉积物中腐殖质的主导形态,其次为松结态,稳结态的质量分数最低. 乌梁素海表层沉积物中紧结态占腐殖质总量的 59. 17% ~ 67. 92%, 平均 67. 92%;松结态占腐殖质总量的 16. 72% ~ 31. 89%, 平均 23. 87%;稳结态占腐殖质总量的 9. 92% ~ 15. 36%, 平均 12. 26% (图 4). 岱海表层沉积物中紧结态占腐殖质总量的 65. 49% ~ 81. 04%, 平均 66. 38%;松结态占腐殖质总量的 13. 39% ~ 21. 19%, 平均 21. 19%;稳结态占腐殖质总量的 5. 43% ~ 13. 53%, 平均 15. 37% (图 5). 2 个湖泊表层沉积物中腐殖质的松/稳比和松/紧比变化范围反映了湖泊表层沉积物受污染程度^[32]及表层沉积物中腐殖质的活性.

用不同提取剂处理得到不同结合形态的腐殖质后,调节 pH 值可得到不同结合形态的胡敏酸(HA)和富里酸(FA). HA/FA 值的大小可反映腐殖化程

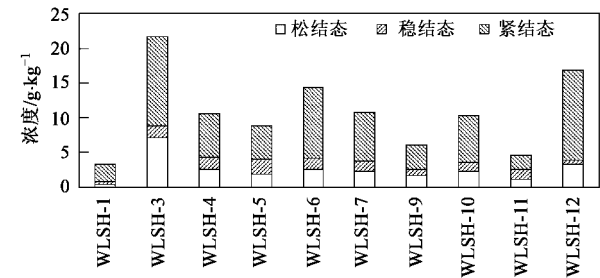


图4 乌梁素海表层沉积物腐殖质结合形态

Fig.4 Combined form humus in WLSH surface sediments

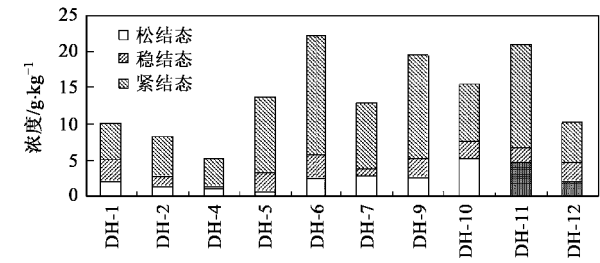


图5 岱海表层沉积物腐殖质结合形态

Fig.5 Combined form humus in DH surface sediments

度的高低^[50],比值高,则腐殖化程度高.

实验结果表明,乌梁素海表层沉积物松结态腐殖质中 HA 平均含量为 $0.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,FA 平均含量为 $1.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,HA/FA 值 <1 ;稳结态腐殖质中 HA 平均含量为 $0.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,FA 平均含量为 $0.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,HA/FA 值 <1 . 岱海表层沉积物松结态腐殖质中 HA 平均含量为 $1.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,FA 平均含量为 $1.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,HA/FA 值 >1 ;稳结态腐殖质中 HA 平均含量为 $0.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,FA 平均含量为 $1.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,HA/FA 值 <1 . 岱海表层沉积物腐殖质不同结合形态中 HA/FA 比值高于乌梁素海,表明岱海表层沉积物中有机质的腐殖化程度较乌梁素海高. HA/FA 和松/紧进一步揭示岱海沉积物碳库较乌梁素海稳定.

与表层沉积物不同,2 个湖泊沉积柱芯中腐殖质的主导形态有所差异. WLSH-1 沉积柱芯中腐殖质的 3 种结合形态含量相差不大,但以稳结态为主,松结态次之,紧结态含量最低,3 种结合形态随深度

的变化与前述该沉积柱芯中 HM、HA、FA 及重组碳的趋势仍然相似(图 6). WLSH-5 沉积柱芯中腐殖质以紧结态为主导形态(占腐殖质总量的 80% 以上),与该沉积柱芯中 HM 和重组碳的垂向分布特征一样,紧结态在中间层 15~25 cm 处出现峰值区,表层 0~8 cm 以及底层 24~38 cm 稳结态含量高于松结态,中间层松结态高于稳结态,中间层腐殖质活性较高. DH-5 沉积柱芯中,松结态明显低于另 2 个结合形态. DH-10 柱芯中腐殖质以紧结态为主导形态(占腐殖质总量的 42%~68%),松结态含量略低于稳结态. DH-5 和 DH-10 沉积柱芯中腐殖质各结合形态随深度的变化趋势也大致与前述 2 个剖面中 HM、HA、FA 及重组碳的趋势相似. 2 个湖泊沉积柱芯中腐殖质的主导形态及各结合态随深度的变化仍然揭示岱海沉积物腐殖质的活性较低,沉积物碳库较乌梁素海更为稳定的规律.

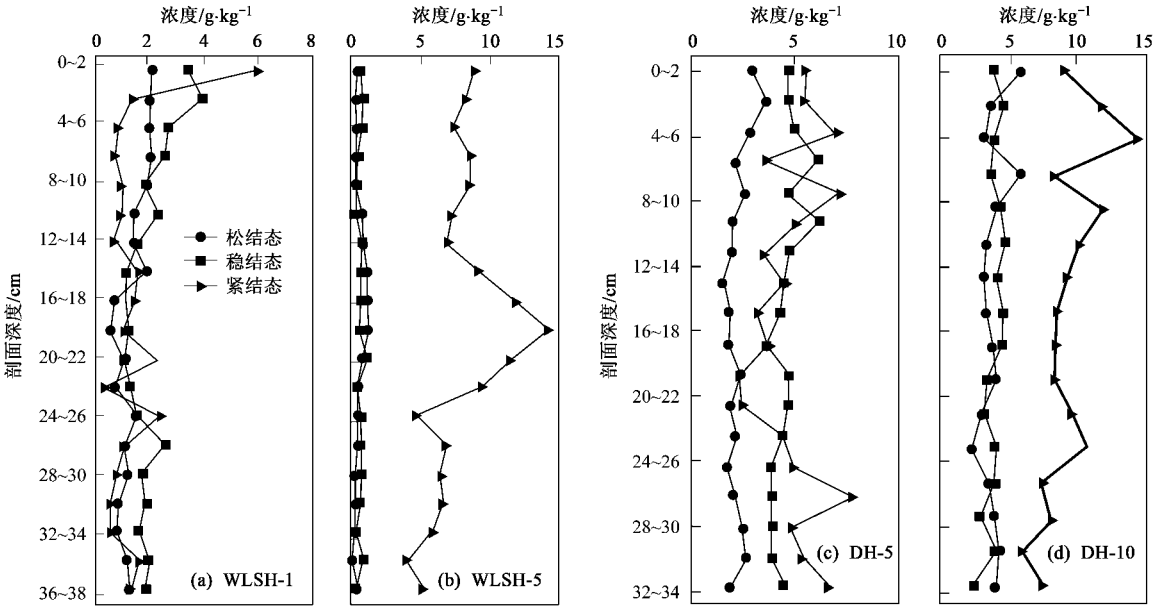


图 6 沉积物柱芯腐殖质结合形态
Fig. 6 Combined form humus in WLSH and DH sediment cores

3 结论

(1)2 个湖泊沉积物中总有机碳以稳定的重组碳为主,重组碳对总有机碳的积累有重要作用. 乌梁素海沉积物中总有机碳和重组碳含量均低于岱海,2 个湖泊轻组碳含量相近,但乌梁素海沉积物中轻组碳占总有机碳的质量分数高于岱海.

(2)2 个湖泊沉积物腐殖质均以胡敏素为主,富里酸次之. 紧结态为 2 个湖泊沉积物腐殖质的主导形态,松结态次之. 总体上,2 个湖泊沉积物碳库均

为相对稳定碳库,但 PQ 值、LFOC/TOC、松紧比以及不同结合形态的 HA/FA 均揭示,乌梁素海沉积物有机质的腐殖化程度较低,腐殖质的活性较高,乌梁素海沉积物碳库不及岱海稳定.

参考文献:

[1] Waddington J M, Griffis T J, Rouse W R. Northern Canadian wetlands : net ecosystem CO₂ exchange and climatic change [J]. Climate Change,1998,40: 267-275.
[2] Frolking S, Roullet N T, Moore T R , et al. Modeling Northern peatland decomposition and peat accumulation [J]. Ecosystems,

- 2001, **4** (5): 479-498.
- [3] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇[J]. 生态学报, 2001, **21** (5): 827-833.
 - [4] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, **52** (3): 609-621.
 - [5] 杨洪. 武汉东湖碳循环过程和碳收支研究[D]. 北京: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2004.
 - [6] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 26-27, 72-74.
 - [7] Murata A, Takizawa T. Summertime CO₂ sinks in shelf and slope waters of the western Arctic Ocean [J]. Continental Shelf Research, 2003, **23** (8): 753-776.
 - [8] Broström G. The role of the annual cycles for the air - sea exchange of CO₂ [J]. Marine Chemistry, 2000, **72** (2-4): 151-169.
 - [9] Ogrinc N, Faganeli J, Pezdic J. Determination of organic carbon remineralization in near-shore marine sediments (Gulf of Trieste, Northern Adriatic) using stable carbon isotopes [J]. Organic Geochemistry, 2003, **34** (5): 681-692.
 - [10] Accornero A, Picon P, Bovée F, *et al.* Organic carbon budget at the sediment - water interface on the Gulf of Lions continental margin [J]. Continental Shelf Research, 2003, **23** (1): 79-92.
 - [11] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, *et al.* The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 2000, **290** (5490): 291-296.
 - [12] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, **263** (5144): 185-190.
 - [13] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? [J]. Aquatic Botany, 2001, **69** (2-4): 313-324.
 - [14] Bond G, Broecker W, Johnsen S, *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. Nature, 1993, **365** (6442): 143-147.
 - [15] 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.
 - [16] 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.
 - [17] 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.
 - [18] Logninow 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** (1): 47-52.
 - [19] 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.
 - [20] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, *et al.* Light-Fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**: 1799-1806.
 - [21] 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.
 - [22] 武天云, 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.
 - [23] 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.
 - [24] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, **26** (3): 56-60.
 - [25] Skjemstad J O, Vallis I, Mayers R J. Decomposition of soil organic nitrogen [A]. In: Henzell E F (ed). Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems [C]. Wallingford, England: CAB Int., 1988. 134-144.
 - [26] Theodorou C. Nitrogen transformations in particle size fractions from a second rotation pine forest soil [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1990, **21** (5-6): 407-413.
 - [27] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46** (7): 1459-1466.
 - [28] Arrouays D, Pelissier P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France [J]. Soil Science, 1994, **157**: 185-192.
 - [29] Pan G, Li L, Wu L, *et al.* Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20** (4): 456-463.
 - [30] 潘根兴, 孙玉华, 滕永忠, 等. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]. 应用生态学报, 2000, **11** (1): 69-72.
 - [31] 周萍, 张旭辉, 潘根. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12** (6): 765-771.
 - [32] 梁海清. 湖泊沉积物有机磷有机碳形态及其迁移转化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
 - [33] 平立凤, 窦森, 张晋京, 等. 草原及开垦后土壤有机质性质研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (5): 824-826.
 - [34] 刘育红, 裴海昆. 高寒草甸植被土壤腐殖质组成及性质的研究[J]. 土壤通报, 2004, **35** (5): 562-565.
 - [35] Turenne J F. Modes de humification et limatisation pozzolique dans deux toposéquences guyanaises [J]. Mémoires ORSTOM, 1977, **84**: 173.
 - [36] Schwartz D, Guillet B, Villemin G, *et al.* Les alios humiques des podzols tropicaux du Congo: onstituents, micro-et ultrastructure [J]. Pédologie, 1986, **36**: 179-198.
 - [37] Pagé F, Guillet B. Formation of loose and cemented B horizons in podzolic soils: evaluation of biological actions from micro morphological features, C/N values and ¹³C datings [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1991, **71**: 485-494.
 - [38] Andreux F. Genèse et propriétés des molécules humiques [A]. In: Bonneau M, Souchier B. Pédologie, Tome II: Constituants et propriétés du sol [C]. Paris: Masson, 1979. 97-122.
 - [39] Souchier B. Les podzols et la podzolisation en limates tempérés et montagnards [C]. Livre jubilaire du cinquantenaire. Paris: AFES, 1984. 77-96.

- [40] MacCarthy P, Malcolm R L, Clapp C E, *et al.* Humic substances in soil and crop sciences: selected readings [M]. Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America. Inc., 1990. 281.
- [41] Ferry B. Les humus forestiers des Ghâts Occidentaux en Inde du Sud Publication du Département d'Ecologie [M]. Paris: Institut Francais de Pondichéry, 1994. 260.
- [42] Duchaufour P H. Pédologie: Sol Egetation, Environment [M]. Paris: Abrégés, Masson, 1995.
- [43] Piccolo A. Humus and soil conservation [C]. Piccolo1 Humic Substances in Terrestrial Ecosystem1 Amsterdam: Elsevier, 1996. 2252-2641.
- [44] Fernandez I, Cabaneiro A, Carballas T. Thermal resistance to high temperatures of different organic fractions from soils under pine forests [J]. Geoderma, 2001, **104**: 281-298.
- [45] 于水强, 窦森, 张晋京, 等. 不同氧气浓度对玉米秸秆分解期间腐殖物质形成的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2005, **27** (5): 528-532.
- [46] 李学垣. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 32-46.
- [47] 窦森, Lichtfouse E, Mariotti A. C₃、C₄ 作物条件下土壤胡敏酸水解、热解及其产物的分组和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、GC-MS 鉴定研究 [J]. 土壤通报, 1995, **26** (6): 271-273.
- [48] 窦森. 土壤腐殖物质形成转化及其微生物学机理研究进展 [J]. 吉林农业大学学报, 2008, **30** (4): 538-547.
- [49] 窦森, 姜岩. 土壤施用有机物料后重组有机质变化规律的探讨 [J]. 土壤学报, 1988, **25** (3): 252-261.
- [50] 窦森, 张继宏, 须湘成, 等. 棕壤不同粒级微团聚体中有机质特性的研究 [J]. 土壤通报, 1992, **23** (2): 26-28.