

达里诺尔湖表层沉积物中腐殖质的分布特征

赵万苍, 何江*, 宋文杰, 吕昌伟, 刘华琳, 王凤娇

(内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要:基于达里诺尔湖富营养化日趋严重的现实,开展了湖泊表层沉积物中腐殖质形态空间分布和污染特征研究。结果表明,表层沉积物中腐殖质形态水平分布均表现经向分异特征,胡敏素的分布特征主导了腐殖质的水平分布格局。达里诺尔表层沉积物中胡敏素是腐殖质中的主导形态,占总有机碳的 74%~94%,占腐殖质的 80%~90%。深水区表层沉积物中松结态胡敏酸和稳结态胡敏酸含量高于浅水区,揭示由水深导致的氧化还原条件是影响胡敏酸分布的因素之一。腐殖质本身矿化率很低,但它能促进其他有机质的矿化,腐殖质形态与总有机碳、有机氮显著相关。达里诺尔湖表层沉积物中有机指数基本为中清洁水平,湖区西南部有机污染较湖区东北部严重,湖区西部有机污染较湖区东部严重。

关键词:沉积物;腐殖质;形态;达里诺尔

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)02-0341-06

The Spatial Distribution of Humus Components and Species and the Pollution Characters of the Surface Sediments in the Dailinuoer Lake, China

ZHAO Wan-cang, HE Jiang*, SONG Wen-jie, LV Chang-wei, LIU hua-lin, WANG feng-jiao

(College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: On the basis of the eutrophication of the Dailinuoer Lake, the spatial distribution of humus components and species and the pollution characters of the surface sediments in this lake were discussed in this work. The results showed that the content of total organic carbon (TOC) in the surface sediments varied from $7.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $65.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with the average of $36.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; the content of humin(HM) from $6.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $58.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with average of $32.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; The contents of humic acid(HA) and fulvic acid(FA) from $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $4.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively; Then the content of organic nitrogen (ON) in the surface sediments from $0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $8.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with average of $3.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The horizontal distribution of humus species in surface sediments indicated different character with longitude variation. The spatial distribution patterns were dominated by the humus. In surface sediments from the Dalinuoer Lake, the dominant form of humus was HM which accounted for 74%~94% of TOC and 80%~90% of humus. In the surface sediments of deepwater area the content of LCHA and SCHA was higher than shallow water area, which indicated that redox conditions caused by water depth was one of the reasons affecting the humus distribution. The mineralization rate of humic substances was low, but it could promote other organic mineralization. The species of humus and TOC, ON significantly correlated. Organic index in surface sediments was rather cleanly. Organic pollution in the southwest area was more serious than the northeast and it was more serious in the west area than the east area of the lake.

Keywords: sediments; humus; components and species; the Dailinuoer Lake

腐殖质(Humic substances, HS)是一类无定型、多分散物质的混合物,颜色从棕色到黑色不定。腐殖质是亲水的酸性物质,其分子量大,为几百甚至几千道尔顿,在酸性或碱性溶剂中,通过对土壤进行萃取、分馏分离可得到这类物质。HS 主要分为:胡敏素(Humins, HM), 胡敏酸(Humic acid, HA)和富啡酸

(Fulvic acid, FA)^[1-4]。HA 和 FA(合称腐植酸^[5])是水-沉积界面起重要作用的溶解性有机碳^[6]。腐植酸物质是维持生命的贮库和生物圈的保护者,是运转大多数生命物质甚至毒性物质的极好工具。相对分子量较高的 HA 代表着腐殖质化第一阶段,然后通过细胞外微生物降解成为 FA 直至矿化。腐殖质与粘粒形成有机无机复合体,由于其结合方式和松紧程度不同,可分为松结态(LC)、稳结态(SC)和紧结态(TC)3 种。

沉积物中的有机质主要以腐殖质形态存在。一般认为沉积物中腐殖质的含量约占总有机碳(TOC)的

收稿日期:2010-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(40863003)

作者简介:赵万苍(1974—),男,硕士,主要研究方向为环境地球化学。

* 通讯联系人:何江 E-mail:ndjhe@imu.edu.cn

70%~80%,有的区域甚至达到 99%。有机质矿化过程中可释放出 C、N、P、S 等营养盐及大量 CO₂、CH₄ 等温室气体,可造成严重的水质恶化、水体富营养化^[7-8]。因此,有机质对沉积物中营养元素的迁移、转化等环境地球化学行为起着至关重要的作用^[9-10],在沉积物环境化学及污染化学中扮演着重要角色。我国学者已开展了西湖、昆明湖及黑龙江、松花江、黄河、长江、钱塘江、闽江等河流湖泊沉积物或悬浮物中有机质组成特征的研究^[11-13]。本文以达里诺尔湖为对象,开展了湖泊表层沉积物中腐殖质的结合形态及其空间分布特征研究,以期为该湖泊的治理提供科学依据和参考,同时也为干旱半干旱区高盐度湖泊与我国东部湿润区湖泊有机质的形态特征对比研究积累基础资料。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

达里诺尔(DLNE)湖位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗西北部(E116°25'~116°45',N 43°13'~43°23'),北依浑善达克沙地。达里诺尔湖属堰塞湖,为碳酸盐型半咸水湖泊,水质类型为氯化物重碳酸钙镁型水,盐分以碳酸盐为主,总碱度高达 53.57 mmol·L⁻¹,pH 平均值为 8.25(最高可达 9.6)。湖泊主要补给水源为贡格尔河、沙里河、耗来河、亮子河等入湖河流及地下水和雨水,湖泊四周发育沼泽和湿草甸,蒸发为湖水的主要损耗方式。近年来,气候干旱,湖水大量蒸发,水位连年下降,水质盐碱度不断提高,湖泊面积逐年萎缩,对达里诺尔国家自然保护区内的珍稀候鸟、渔业生产以及周边区域的可持续发展构成了潜在威胁和风险。

1.2 样品采集

依据《湖泊生态系统观测方法》,针对湖泊现存面积和生态系统特点设置采样点,于 2008 年 9 月对达里诺尔湖沉积物进行现场采集。沉积物用挪威 Swedaq 公司 KC mod A och B 型无扰动采样器采集,现场采集 10 cm 表层沉积物。沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,送回实验室于-24℃保存。现场用 GPS 定位。各采样点水深见表 1。

1.3 分析方法

有机质测定采用重铬酸钾氧化法;沉积物干样腐

殖质结合形态及胡敏酸和富啡酸均采用文献方法^[14-15]测定。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中腐殖质形态的分布特征

表层沉积物中有机碳的迁移转化主要受有机碳自身的结构特点、沉积物组成、根际环境及矿物质相互作用的影响。沉积物-水系统中存在大量的微生物、胶体和矿物颗粒,它们共同作用形成了氧化还原体系。诸多因素相互作用共同影响沉积物中腐殖质形态的归趋及其空间分布。

DLNE 湖表层沉积物中 TOC 的含量范围为 7.25~65.54 g·kg⁻¹,平均 36.37 g·kg⁻¹(图 1);HM 的含量范围为 6.40~58.16 g·kg⁻¹,平均 32.79 g·kg⁻¹(图 2),HA 和 FA 的含量范围分别为 0.27~3.5 g·kg⁻¹ 和 0.27~4.26 g·kg⁻¹(图 3~图 4),FA 的平均含量高于 HA。湖水的碱性环境(pH 最高可达 9.6)有利于 FA 的溶出,这

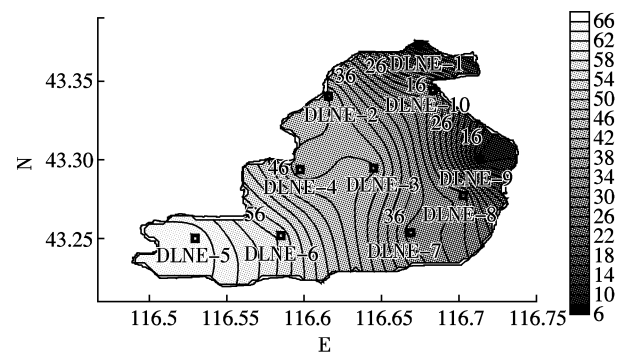


图 1 达里诺尔表层沉积物中 TOC 分布等值线(g·kg⁻¹)

Figure 1 Contour of TOC in DLNE surface sediment(g·kg⁻¹)

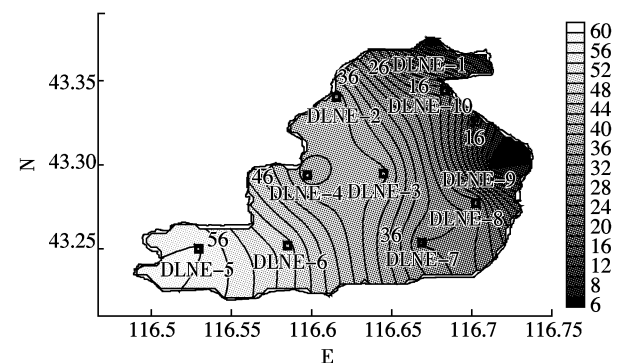


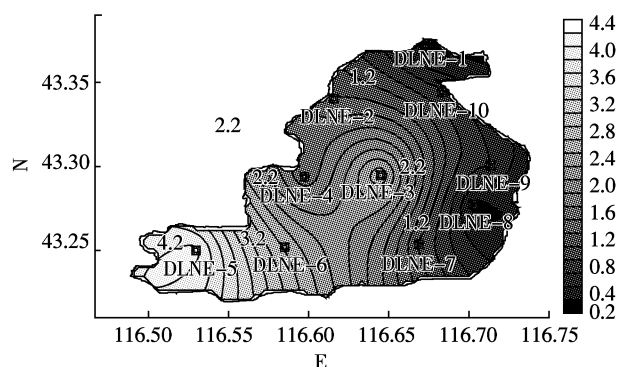
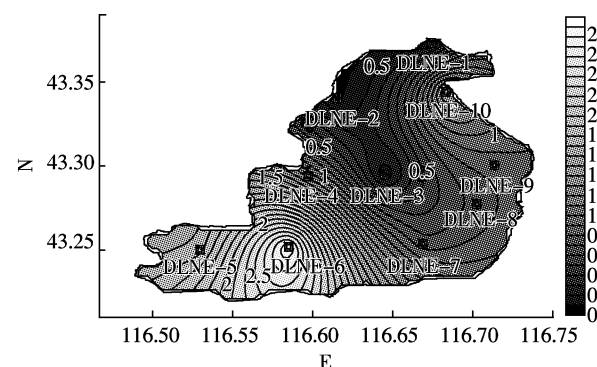
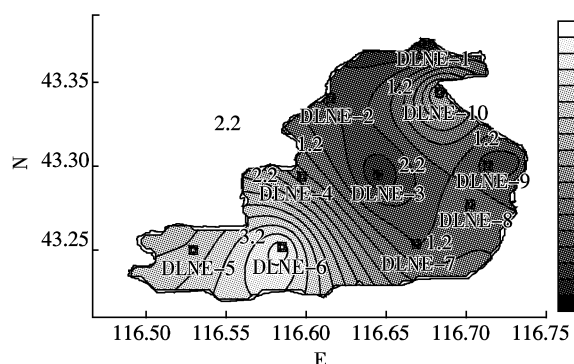
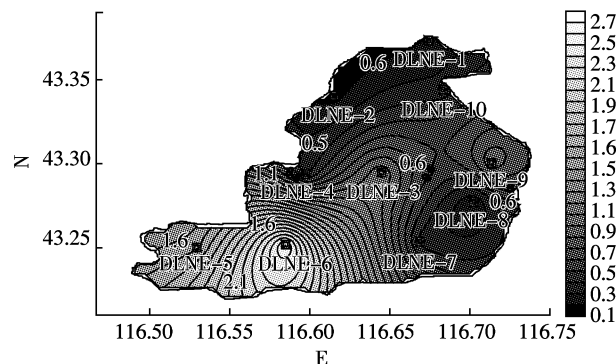
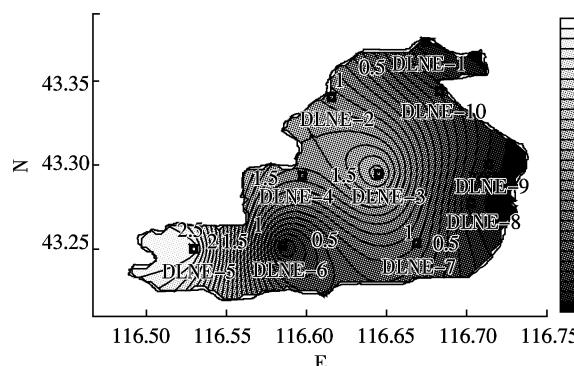
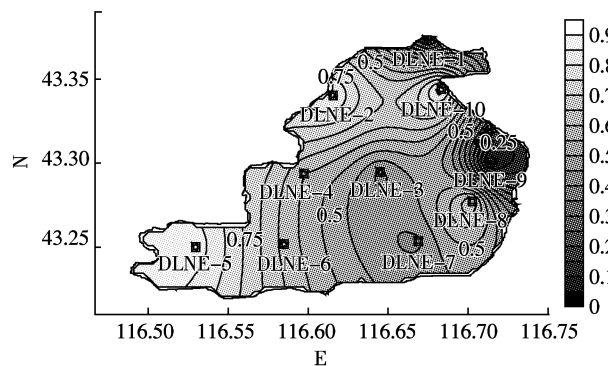
图 2 达里诺尔表层沉积物中 HM 分布等值线(g·kg⁻¹)

Figure 2 Contour of HM in DLNE surface sediment(g·kg⁻¹)

表 1 达里诺尔湖采样点水深分布

Table 1 Depth of water in sampling point from the DLNE Lake

采样点位	DLNE1	DLNE2	DLNE3	DLNE4	DLNE5	DLNE6	DLNE7	DLNE8	DLNE9	DLNE10
水深/m	2	5	8	7	9	8	6.5	3	3.5	6.5

图3 达里诺尔表层沉积物中 FA 分布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 3 Contour of FA in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)图6 达里诺尔表层沉积物中 LCHA 分布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 6 Contour of LCHA in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)图4 达里诺尔表层沉积物中 HA 分布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 4 Contour of HA in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)图7 达里诺尔表层沉积物中 SCFA 布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 7 Contour of SCFA in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)图5 达里诺尔表层沉积物中 LCFA 分布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 5 Contour of LCFA in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)图8 达里诺尔表层沉积物中 SCHAs 分布等值线($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 8 Contour of SCHAs in surface sediment($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

是导致 FA 含量高于 HA 的主要原因。表层沉积物中松结态富啡酸(LCFA)的含量以 DLNE5 为最(达 $2.78 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),松结态胡敏酸(LCHA)和稳结态富啡酸(SCFA)的含量均以 DLNE6 为最(图 5~图 8),分别达 $2.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.90 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。HM 在表层沉积物腐殖质组成中占优(图 9);表层沉积物中有机氮(ON)的含量范围为 $0.30\sim 8.02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 10),平均 $3.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

空间分布上,湖区西南部 TOC、HM、HA、FA 和 ON 的含量均高于其他湖区(图 1~图 4,图 10),总体

表现由西南向东北逐渐降低的趋势。内源有机质、浮游生物和水生动物排泄物在深水区 and 浅水区(水深 $< 3.5 \text{ m}$)表层沉积物中腐殖化程度的差异与深浅水区氧化还原条件的差异性相关。湖滨区水域大气复氧容易达到水-沉积物界面,沉积物中有机质降解速度较快,然而外源有机质输入过大和沉积速率过大引起的浅水区缺氧,则可能造成湖滨区水域有机质来不及完全降解,从而造成湖滨区表层沉积物有机碳的含量较高。

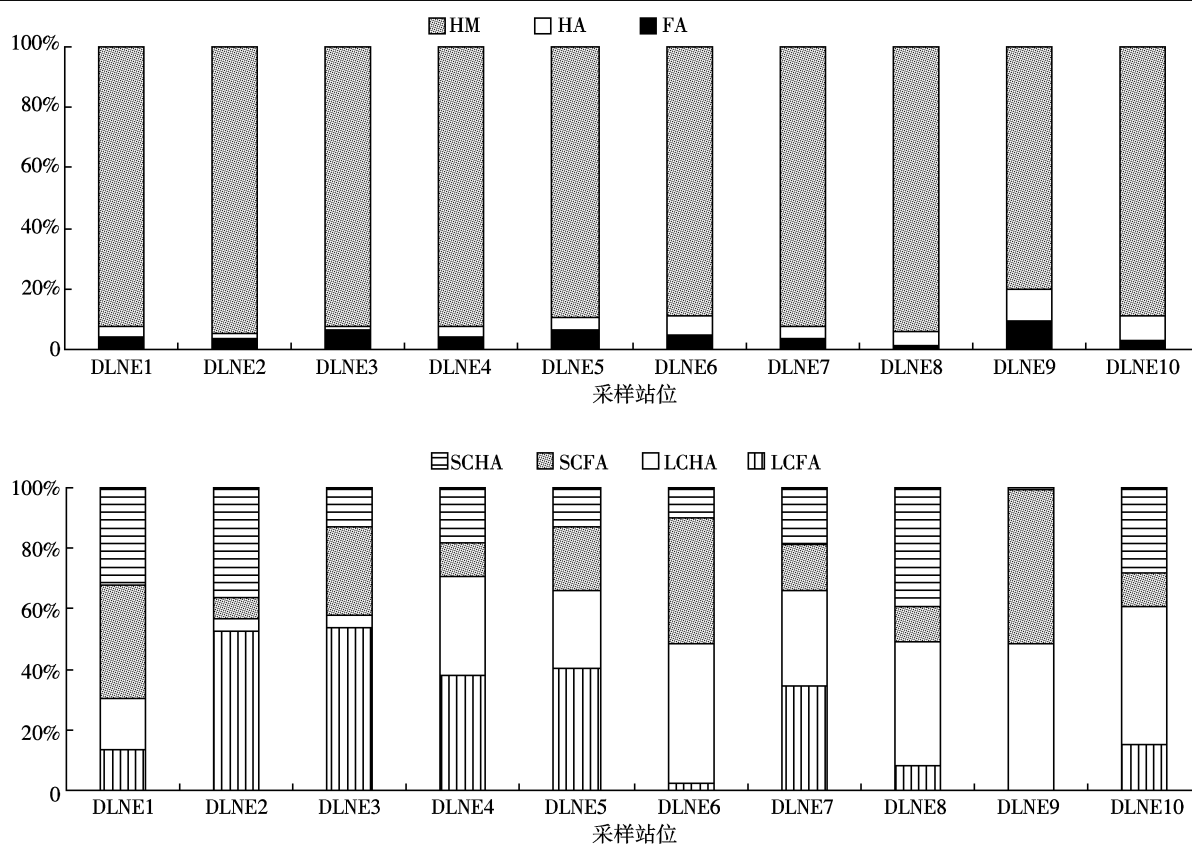
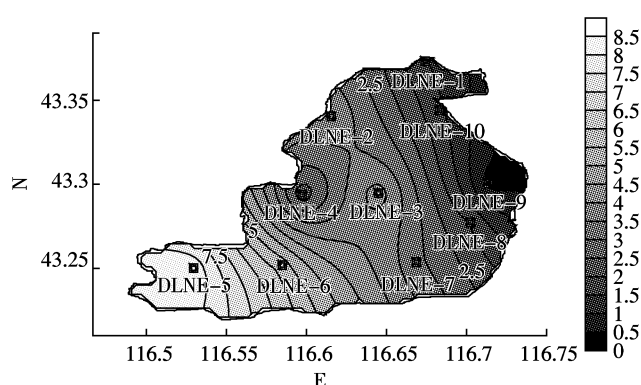


图9 达里诺尔表层沉积物中腐殖质组分及结合形态的百分含量

Figure 9 Fraction of humus in surface sediment

图10 达里诺尔表层沉积物中ON分布等值线($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Figure 10 Contour of ON in surface sediment($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

LCFA、SCFA 及 LCHA、SCHA 是不同结合态下的 FA 和 HA 的含量, 分别表示不同结合程度的 FA 和 HA。研究表明,LCHA 和 LCFA 的空间分布差异较小(图5~图6), 而 SCHA 和 SCFA 的空间分布差异较大(图7~图8)。LCHA 与 SCHA 及 LCFA 与 SCFA 的空间分布均存在明显差异, 这可能从某种意义上揭示了 LCHA 与 SCHA 及 LCFA 与 SCFA 在结构和活性方面的差异。HA 在西南湖区及湖心区含量的差异与相应

湖区沉积物中 DO 含量及有机质来源有关。深水区表层沉积物中 LCHA 和 SCHA 含量高于浅水区, 揭示水深浅导致的氧化还原条件是影响 HA 分布的因素之一。HS 本身不易被微生物分解, 矿化率很低, 但它能促进其他有机质的矿化。在厌氧环境中, HS 可作为微生物呼吸的电子受体, 氧化小分子有机质, 产生 CO_2 。用 $\text{HA}/(\text{HA}+\text{FA})$ 可表示腐殖化程度的指标, 表征腐殖质组成的变化^[18]。研究表明, DLNE 3(湖心)腐殖质化最低($\text{HA}/(\text{HA}+\text{FA})$ 为 17%), DLNE8(湖区东部)腐殖质化最高($\text{HA}/(\text{HA}+\text{FA})$ 为 81%)(见图9)。湖区腐殖化程度与有机质来源、氧化还原条件有关。深水区一般处于厌氧(还原)环境, 有利于有机质的保存, 同时缺氧条件下, 厌氧微生物成为优势种群引起的腐殖化增强。浅水区大气复氧容易到达水-沉积物界面造成氧化环境, 不利于有机质保存。松结态腐殖质相对稳结态腐殖质的活性较大, 可能是 LCFA、LCHA 及 SCFA、SCHA 组成和结构的差异性造成的。

2.2 腐殖质形态、TOC 和 ON 相关性分析

腐殖质形态与 TOC 和 ON 相关性分析结果表明(表2), TOC 与 FA、HM 显著相关 ($P < 0.01$); TOC 与

表 2 腐殖质形态与 TOC 和 ON 的相关性分析($n=10$)

Table 2 Correlations analysis between HM species and TOC, ON ($n=10$)

	TOC	ON	SCHA	SCFA	LCFA	LCHA	HA	FA	HM
TOC	1	0.889**	0.717*	0.572	0.652	0.533	0.671*	0.859**	0.998**
ON		1	0.680*	0.621	0.691	0.526	0.655	0.925**	0.874**
SCHA			1	0.059	0.340	0.335	0.583	0.379	0.727.
SCFA				1	0.154	0.802**	0.709*	0.701*	0.534
LCFA					1	0-.039	0.044	0.784*	0.658
LCHA						1	0.961**	0.480	0.492
HA							1	0.525	0.638*
FA								1	0.839**
HM									1

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

SCHA、SCFA、LCFA、LCHA、HA 显著相关 ($P<0.05$); ON 与 FA、HM 显著相关($P<0.01$); ON 与 SCHA、SCFA、LCFA、LCHA 显著相关($P<0.05$)。

沉积物中有机质在矿化过程中可形成易降解的氨基酸等中间组分,而聚合和腐殖化等反应过程中可形成较难降解的成分^[19]。有机氮是沉积物中氮的主要存在形态,可分为颗粒态和溶解态两种,其中颗粒态主要包括碎屑和有机生物体,有 12%~72%的溶解有机氮能迅速被生物利用^[20]。腐殖质可能是氮矿化的潜在源。有机氮与腐殖质各形态显著相关性的内在机理需要深入研究,这有助于认识湖泊富营养化演化的过程和趋势,为富营养化的防治对策提供借鉴。

2.3 有机指数评价

腐殖质的研究有助于认识湖泊富营养化演化的过程和趋势,为富营养化的防治对策提供借鉴。本文采用有机指数和有机氮对达里诺尔表层沉积物的环境状况进行了评价^[21]。沉积物中有机指数的计算方法

表 3 有机指数评价标准

Table 3 The grading standard of organic pollution appraise

有机指数	<0.03	<0.05	>0.05
类型	贫清洁	中清洁	污染
等级	I	II	III

表 4 达里诺尔湖表层沉积物有机污染评价结果

Table 4 The organic pollution appraise in DLNE surface sediment

采样点	DLNE1	DLNE2	DLNE3	DLNE4	DLNE5	DLNE6	DLNE7	DLNE8	DLNE9	DLNE10
有机指数	0.01	0.04	0.05	0.04	0.07	0.06	0.03	0.03	0.002	0.01
Grade	I	II	II	II	III	III	I	I	I	I
类型	贫清洁	中清洁	中清洁	中清洁	污染	污染	贫清洁	贫清洁	贫清洁	贫清洁

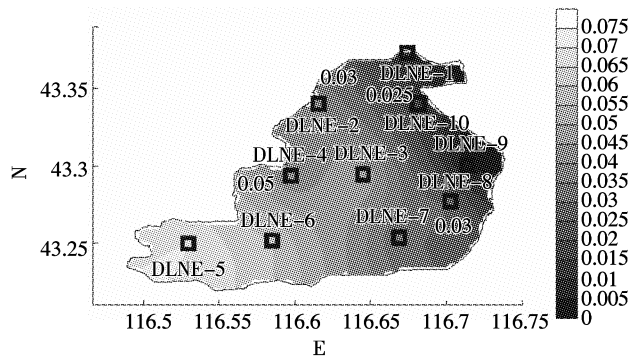


图 11 达里诺尔有机污染指数等值线分布

Figure 11 Contour of organic index in surface sediment

是:有机指数=有机碳(%) $\times$ 有机氮(%).有机指数评价标准见表 3^[22]。评价结果表明(表 4),达里诺尔表层沉积物中有机指数基本为中清洁水平,DLNE5 和 DLNE6 站位有机污染指数为Ⅲ级(污染)。评价结果显示(图 11),湖区西南部有机污染较湖区东北部严重,湖区西部有机污染较湖区东部严重。

达里诺尔湖富营养化趋势逐年加剧^[23-24]的事实可能与该湖为封闭性湖泊及外源有机质的不断输入和人为干扰(渔业、旅游业和周边工农业生产)有关。

3 结论

达里诺尔湖表层沉积物中 HA、FA、HM 等腐殖质组分,LCFA、LCHA、SCFA、SCHA 等腐殖质形态及 ON 等的空间分布格局存在差异性,但总体表现出深水区高于浅水区的趋势。相关分析表明,HA、FA、HM 等腐殖质组分与 TOC、ON 显著相关。

HM 是达里诺尔表层沉积物腐殖质的主导形态,占 TOC 的 74%~94%,占腐殖质的 80%~90%。腐殖质矿化过程中,HM 是相对不易被分解的物质并与矿物密切结合,FA、HA 是腐殖化的产物,在氧化条件下进而矿化。浅水区大气复氧充分有利于矿化,因此浅水区 FA、HA、LCFA、LCHA、SCFA、SCHA 在表层沉积物含量低是矿化较高的表征。

有机污染指数评价结果显示,有机污染已对达里诺尔湖形成潜在威胁,富营养化逐年加剧可能与该湖为封闭性湖泊及外源有机质的不断输入和人为干扰

(渔业、旅游业和周边工农业生产)有关。

参考文献:

- [1] Straub K L, Kappler A, Schink B. Enrichment and isolation of ferric-iron-and humic-acid-reducing bacteria[J]. *Methods in Enzymology*, 2005, 397:58-77.
- [2] Adani F, Spagnol M, Nierop K G J. Biochemical origin and refractory properties of humic acid extracted from maize plants; The contribution of lignin[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82(1):55-65.
- [3] Perminova I V, Hatfield K; Hertkorn N. Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: from theory to practice[M]. Kluwer Academic Pub: NATO Science Series, 2005: 3-36.
- [4] 武春媛, 李芳柏, 周顺桂. 腐殖质呼吸作用及其生态学意义[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1535-1542.
WU Chun-yuan, LI Fang-bai, ZHOU Shun-gui. Humus respiration and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1535-1542.
- [5] Peña-Méndez E M, Havel J, Patočka, J. Humic substances—compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine[J]. *J Appl Biomed*, 2005, 3:13-24.
- [6] Hruska J, Kranm P, McDowell W H, et al. Increased dissolved organic carbon (DOC) in central european streams is driven by reductions in Ionic strength rather than climate change or decreasing acidity[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(12):4320-4326.
- [7] 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]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):928.
- [8] Keppler F, Eiden R, Niedan V, et al. Halocarbons produced by natural oxidation processes during degradation of organic matter[J]. *Nature*, 2000, 403(6767):298-301.
- [9] 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 Guang-wei, CHEN Ying-xu. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments[J]. *Journal of Lake Science*, 2001, 13(3):272-279.
- [10] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1):1-12.
WU Feng-chang, WANG Li-ying, LI Wen, et al. Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(1):1-12.
- [11] 李震宇, 朱荫渭. 西湖沉积物有机质特征[J]. 环境化学, 1999, 18(2):122-126.
LI Zhen-yu, ZHU Yin-mei. Characteristics of sediment in West Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(2):122-126.
- [12] 王文华, 王淑琴, 徐维并, 等. 北京昆明湖底泥中有机物的表征[J]. 环境科学学报, 1995, 15(2):178-185.
WANG Wen-hua, WANG Shu-qin, XU Wei-bing, et al. Characterization of organic compounds in sediments of Kunming Lake in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2):178-185.
- [13] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
JIN Xiang-can. Pollution chemistry of sediments[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1992.
- [14] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组测定[J]. 土壤通报, 1983, 14(2):36-37.
FU Ji-ping. Determination of humus bound to soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1983, 14(2):36-37.
- [15] 毛海芳. 乌梁素海、岱海有机碳的地球化学特征[D]. 硕士学位论文, 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
MAO Hai-fang. Geochemistry characters of organic carbon in the Wu-liangsu hai and Daihai Lake[D]. Master thesis. Huhhot: Inner Mongolia University, 2009.
- [16] Cervantes F J, Velde S, Lettinga G, et al. Competition between methanogenesis and quinone respiration for ecologically important substrates in anaerobic consortia[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, 34(2):161-171.
- [17] Cervantes F J, de Bok F A M, Duong-Dac T, et al. Reduction of humic substances by halo-respiring, sulphate-reducing and methanogenic microorganisms[J]. *Environmental Microbiology*, 2002, 4(1):51-57.
- [18] 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: II. 对重组有机质中腐殖质组成和胡敏酸光学性质的影响[J]. 土壤学报, 1988, 25(3):252-261.
DOU Sen, JIANG Yan. Effect of Application of organic materials on the properties of humic substances in organo-mineral complexes of soils. II. Effect of organic materials on the humus composition and optical characteristics of humic acids in organo-mineral complexes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(3):252-261.
- [19] Burdige D J, Zheng S. The biogeochemical cycling of dissolved organic nitrogen in estuarine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(8):1796-1813.
- [20] Stepanauskas R, Leonardson L, Tranvik L J. Bioavailability of wetland-derived DON to freshwater and marine bacterioplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(6):1477-1485.
- [21] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM, TN, TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4):319-324.
SUI Gui-rong. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1996, 8(4):319-324.
- [22] Mudroch A, Azcue J, Azcue J M. Manual of aquatic sediment sampling [M]. CRC, 1995.
- [23] 董生旺. 达里诺尔湖碳、氮、磷的环境地球化学研究[D]. 硕士学位论文, 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
DONG Sheng-wang. Environmental geochemistry of carbon, nitrogen and phosphorus in the Dailinuoer Lake[D]. Master thesis. Huhhot: Inner Mongolia University, 2009.
- [24] 张玉, 王洪滨, 何江, 等. 内蒙古达里诺尔湖水水质现状调查[J]. 水产科学, 2008, 27(12):671-673.
ZHANG Yu, WANG Hong-bin, HE Jiang, et al. Investigation of water quality in the Dalinor Lake in Inner Mongolia [J]. *Fisheries Science*, 2008, 27(12):671-673.