

张晓晶, 卢俊平, 张圣微, 等. 大河口水库表层沉积物有机质特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2835–2843.

ZHANG Xiao-jing, LU Jun-ping, ZHANG Sheng-wei, et al. Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of Dahekou Reservoir, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2835–2843.

# 大河口水库表层沉积物有机质特征及来源解析

张晓晶, 卢俊平\*, 张圣微, 马太玲, 张自豪

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:**为深入分析水库生态系统的污染来源和水环境的营养状况, 本文对大河口水库表层沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)含量的分布特征、碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )和C/N值的组成进行分析, 探讨了沉积物中有机质的来源。结果表明: 大河口水库表层沉积物以远源搬运的风成沉积物为主, TOC含量在1.38%~3.52%, 平均值为2.34%; TN分布范围在0.06%~0.21%, 平均值为0.11%;  $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围在-2.69%~-2.41%, 平均值为-2.54%,  $\delta^{15}\text{N}$ 范围在0.19%~0.54%, 平均值为0.39%。通过端元混合模型对沉积物有机质来源进行定性和半定量分析表明, 陆生C3植物、土壤有机质和淡水水生植物是大河口水库沉积物有机质的3种主要来源, 其中陆生C3植物贡献最大, 其次是土壤有机质, 个别断面有淡水水生植物来源。研究表明, 大河口水库整体的初级生产力不高, 有机质来源组成差异较小, 有机质来源大都为外源。

**关键词:**大河口水库; 有机质; 碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ ); 氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ ); 来源

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)12-2835-09 doi:10.11654/jaes.2019-0531

## Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of Dahekou Reservoir, China

ZHANG Xiao-jing, LU Jun-ping\*, ZHANG Sheng-wei, MA Tai-ling, ZHANG Zi-hao

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** To further analyze the pollution source of reservoir ecosystem and nutritional status of water environment, the total organic carbon (TOC) distribution characteristics, total nitrogen (TN), and composition of carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ), nitrogen isotope ( $\delta^{15}\text{N}$ ) and C/N value were analyzed in this paper. In addition, the source of sediment organic matter was determined. The results showed that the surface sediments of Dahekou Reservoir were mainly aeolian sediments transported from distant sources. TOC ranged from 1.38% to 3.52%, with an average of 2.34%. TN ranged from 0.06% to 0.21%, with an average of 0.11%. The  $\delta^{13}\text{C}$  values ranged from -2.69% to -2.41%, and the average was -2.54%. The  $\delta^{15}\text{N}$  ranged from 0.19% to 0.54%, and the average was 0.39%. According to the qualitative and semi-quantitative analysis of the sources of sediment organic matter by end element hybrid model, the terrestrial C3 plants, soil organic matter, and freshwater aquatic plants were the main sources of organic matter in sediment of Dahekou Reservoir. Among them, the contribution of terrestrial C3 plants was the most, followed by soil organic matter, and only one section had the source of freshwater aquatic plants. The primary productivity of Dahekou Reservoir is not high, the source composition of organic matter has little difference, and the source of organic matter is mostly exogenous.

**Keywords:** Dahekou Reservoir; organic matter; carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ); nitrogen isotope ( $\delta^{15}\text{N}$ ); sources

沙区人地关系具有极端脆弱性和风险性。截至2014年, 北方沙区(新疆、内蒙古、青海、甘肃、河北、陕西、宁夏)占全国沙漠化土地总面积的83.82%<sup>[1]</sup>, 而

其湖泊面积仅有近 $2 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 占全国湖泊面积的25%、储水量的30%左右。区域气候干旱, 降水稀少, 水资源极为宝贵, 水资源和水环境能否得到有效保护

收稿日期: 2019-05-13 录用日期: 2019-08-05

作者简介: 张晓晶(1983—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 实验师, 从事水环境保护和水污染控制研究。E-mail: nmndzxj@imau.edu.cn

\*通信作者: 卢俊平 E-mail: ljpcu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669023, 51869021); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17072)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51669023, 51869021); The Scientific Research Project of the Higher Education Institutions of Inner Mongolia Autonomous Region, China(NJZY17072)

是关系到区域生态安全和可持续发展的战略问题<sup>[2]</sup>。沙源区风沙输移量大,风沙污染来源广泛,且其携带的污染物质成分复杂,尤其是沙源区内广泛分布的干涸盐湖湖底蓄积了大量污染物质,携带这些污染物的风沙所到之处不仅空气恶化,生物受破坏,而且对沙源区水库水体产生严重污染。

根据不同来源的有机质由不同的C/N比值和稳定同位素组成,越来越多的学者利用沉积物中稳定同位素碳、氮以及C/N比值来指示水生态系统中有机质来源和碳、氮循环随时间的变化。国外学者<sup>[3-6]</sup>对世界各地不同类型水体表层沉积物中有机质含量的分布特征,碳、氮同位素组成及影响因素等展开研究;国内学者<sup>[7-13]</sup>利用稳定碳、氮同位素集中对海洋、河流和湖泊等环境中初级生产力变化、营养物质示踪和有机物质的地球化学进行研究。然而,对于干旱区和沙源区水体沉积物有机质分布特征和来源的研究尚不够深入,已有的研究主要集中在博斯腾湖,于志同等<sup>[14]</sup>研究表明博斯腾湖表层沉积物中有机碳主要来自湖泊内部浮游生物的残体。

作为沙源区水库的典型代表——大河口水库,地处浑善达克沙地京蒙沙源区腹地,也属于北方寒旱区。近年来,受自然和人为双重因素影响,浑善达克沙地生态环境逐年恶化,沙地植被遭到严重破坏,草场严重退化,流动沙丘面积逐年增加,草原已变成植被稀疏的沙地。同时,水库水体停留时间长、流动性差,容易出现季节性热分层现象<sup>[15]</sup>,使得底层水体长期处于厌氧还原状态,造成沉积物中营养物质持续向上覆水体释放,导致水质恶化。因此,沙源区水库特殊的地理环境特征必然会导致其沉积物有机质分布和来源有区别于其他地区的显著特征。研究沙源区水库沉积物中生源要素(碳、氮)及其同位素的变化对指示水域初级生产力水平,水体营养状况、演化过程以及物质来源具有举足轻重的作用<sup>[16-17]</sup>。本研究分析了大河口水库表层沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)的分布特征及碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )、氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )的组成,定性和半定量地阐述了水库沉积物有机质来源,为水库现代环境质量评价与管理提供可靠背景资料,对进一步研究水库生态系统营养物质碳、氮循环和富营养化防治具有重要的理论意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大河口水库坐落于锡林郭勒盟浑善达克沙地京

蒙沙源区、多伦县境内的滦河干流上,是一座以供水发电为主,兼顾防洪、农业灌溉、水产养殖等综合利用的中型水库。水库水域面积为17.26 km<sup>2</sup>,水深2.30~14.10 m,水流流速为0.05~0.13 m·s<sup>-1</sup>。吐力根河和滦河是水库地表水量的主要补给来源,其中西侧补给河流滦河的年径流量为3.47×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,多年平均水蚀模数为11.02 t·km<sup>-2</sup>,东侧补给河流土力根河的年径流量为1.23×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,多年平均水蚀模数为9.18 t·km<sup>-2</sup>。滦河流域河道悬移质泥沙含量较小,水库淤积的泥沙主要为推移质泥沙,来源于大河口水库库尾以上黑风河和吐力根河之间浑善达克沙漠的风积沙。多伦县属于温带季风性气候,多伦县年平均气温为2.1℃,年降水量为321.4 mm,年蒸发量为1 713.6 mm。水库11月上、中旬封冻,翌年4月上、中旬解冻,封冻期5个月,最大河心冰厚1.3 m。大河口水库由于受入库吐力根河和滦河水系上游生活、生产排污、马铃薯种植基地灌溉退水、地表径流、大气降尘等人为活动和自然的影响,水库水质污染较为严重,总体处于中度富营养化的状态<sup>[18]</sup>。

### 1.2 样品采集

按照我国《水和废水监测分析方法》中湖泊和水库监测点位的布设原则,根据大河口水库污染源分布及水库面积,将大河口水库采样断面分为5个常规沉积物监测断面。吐力根河入库处设置A-A断面、滦河与小河子汇合后入库处设置B-B断面、库边设置C-C断面、库中设置D-D、出口处布设E-E断面。每个断面根据水库水面宽度设置2条垂线,在垂线处布置监测点,用GPS定位各点经纬度坐标。本研究于2016年和2017年的丰水期,利用抓泥斗在10个点位采集表层约5 cm的沉积物样品,装入洁净的密封袋内,避光密封低温保存,带回实验室分析。沉积物样品在室温阴凉处自然风干,用玻璃棒压散,剔除杂质,置于冷冻干燥机中,待样品干燥至恒质量后,研磨过100目金属筛子,置于聚乙烯塑料袋中密封保存,用于测定有机碳、总氮含量和碳、氮同位素组成。

### 1.3 实验方法

将沉积物样品置于离心管中,做好标记,加入25 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup>的盐酸溶液,在60℃的水浴锅中恒温反应2 h去除无机碳,待样品溶液反应完全无气泡产生时,用超纯水洗至中性,离心,弃去溶液,将盛有样品的离心管放入鼓风干燥箱中烘干至恒质量,称量,并将烘干样品研细,过筛,将处理过的样品保存于干燥器中待分析<sup>[19]</sup>。

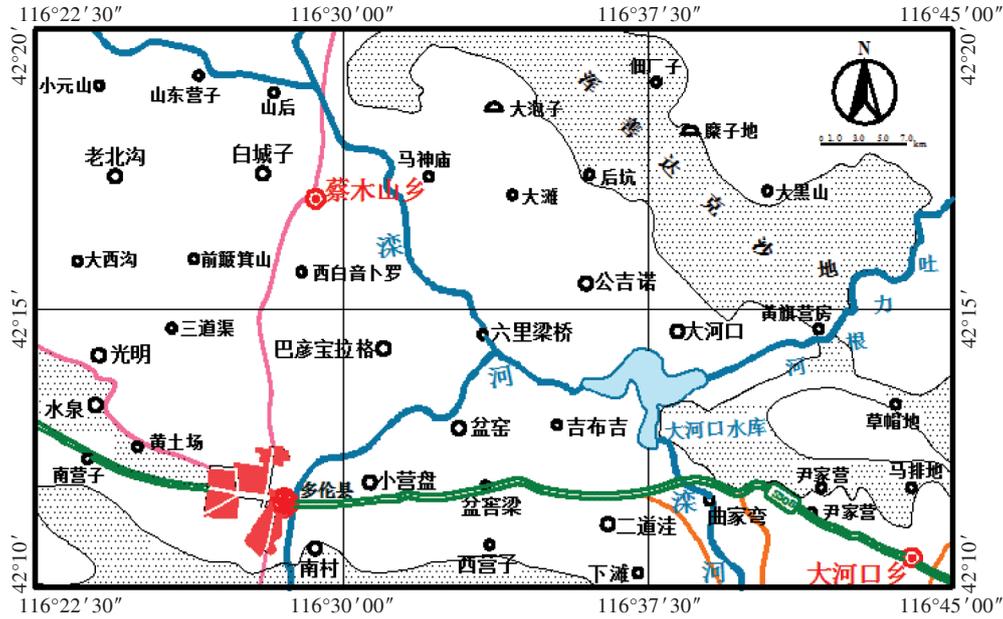


图1 大河口水库地理位置图

Figure 1 Location of Dahekou Reservoir

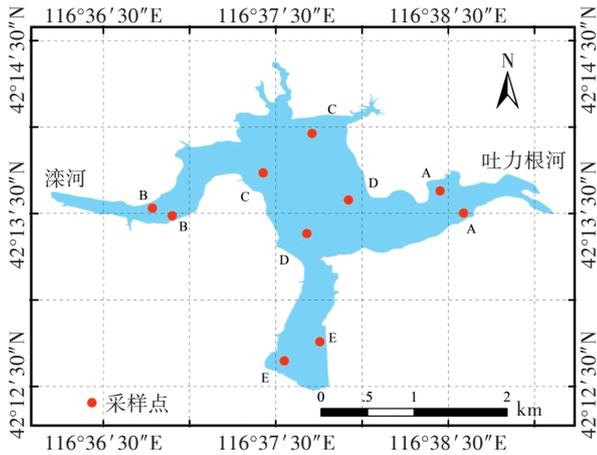


图2 大河口水库沉积物采样断面图

Figure 2 Sampling sections of sediment in Dahekou Reservoir

采用元素分析仪(FLASH EA2000, Thermo)测定有机碳和总氮含量,采用元素分析仪(FLASH EA1112)与质谱仪(MAT253)联用测定有机碳、氮同位素组成,有机碳、氮同位素分析的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 与 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 分别对应国际标准PDB与大气中的 $\text{N}_2$ ,以尿素( $\delta^{15}\text{N}=-0.15\%$ ,  $\text{TC}=20\%$ ,  $\text{TN}=46.6\%$ )为参考标准,仪器分析误差小于0.01%,计算公式为: $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) =  $(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 100\%$ ,式中: $R=^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $R=^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。

沉积物粒度分析采用德国新帕泰克公司生产的HELOS/OASIS激光粒度分析仪,每个样品重复测量3次,取平均值。本文采用当前应用较广的福克和沃德(Folk&Ward)公式计算粒度参数:平均粒径( $M_z$ )、偏

度( $S_k$ )、分选系数( $\sigma$ )和峰度( $KG$ ),计算公式为:

$$M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3}$$

$$S_k = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)}$$

$$\sigma = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6}$$

$$KG = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})}$$

式中: $M_z$ 为平均粒径; $S_k$ 为偏度; $\sigma$ 为分选系数; $KG$ 为峰度; $\varphi_x$ 为粒度累计到 $x\%$ 所对应的粒径。

有机质来源的半定量分析,采用以下三元混合模型进行量化:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{C3}} \times f_{\text{C3}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{soil}} \times f_{\text{soil}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{P}} \times f_{\text{P}}$$

$$C/N_{\text{sample}} = C/N_{\text{C3}} \times f_{\text{C3}} + C/N_{\text{soil}} \times f_{\text{soil}} + C/N_{\text{P}} \times f_{\text{P}}$$

$$1 = f_{\text{C3}} + f_{\text{soil}} + f_{\text{P}}$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 是有机质的碳同位素构成; $C/N$ 值是有机质中碳与氮元素的含量比; $f$ 指不同端元对应的贡献百分数,陆生C3植物记为C3、土壤有机质记为soil、淡水水生植物记为P。

## 2 结果与分析

### 2.1 大河口水库表层沉积物有机质特征

#### 2.1.1 表层沉积物粒度特征

粒度作为沉积物的基本属性之一,能够反映其物质来源以及不同粒度组分与沉积物源区的关系<sup>[20-21]</sup>。

本研究利用 Folk & Ward 公式计算  $M_z$ 、 $S_k$ 、 $\sigma$  和  $KG$  等粒度参数,同时采用国际制粒级分类、分级标准,分析大河口水库表层沉积物的粒度参数特征。如表 1 所示。

由表 1 可知:水库各采样断面表层沉积物中黏粒占比 0.43%~4.85%,中值为 2.11%;粉粒占比 8.28%~49.86%,中值为 23.42%;细砂占比 45.27%~90.98%,中值为 72.93%;粗砂占比 0.03%~3.22%,中值为 1.53%。水库表层沉积物主要以细砂和粉粒为主,含有少量的黏粒与粗砂,不含石砾。除 E-E 断面表层沉积物粒度组成呈现粉粒含量>细砂含量>黏粒含量与粗砂含量的特征外,其余 4 个断面表层沉积物粒度组成均表现为细砂含量>粉粒含量>黏粒含量与粗砂含量。

通过对粒度参数进行分析,结果表明:大河口水库表层沉积物平均粒径范围在 35.11~85.01  $\phi$ ,中值为 64.12  $\phi$ ,变化幅度较大,最小的是 E-E 断面,最大的是 C-C 断面。偏度范围在 0.02~0.71,偏度中值为 0.31,其中 B-B 和 D-D 断面处于正偏区间,A-A 和 E-E 断面处于极正偏区间,C-C 断面处于近对称区间,研究区整体偏度跨度较小。分选系数范围在 0.13~0.49,分选系数中值为 0.28,其中 A-A、B-B、C-C、E-E 断面分选性极好,D-D 断面分选性好,研究区分选性整体偏好,说明研究区沉积物颗粒大小较为均匀。峰态范围在 0.82~1.11,峰态中值为 0.92,其中 A-A、B-B、C-C、E-E 断面峰态平整,D-D 断面峰态中等。由水库沉积物的粒度组成和特征,综合考虑水库所在流域的水文地质、气候、地表径流和风力等条件,可以初步判断大河口水库沉积物大部分来自远源搬运的风成沉积,受人类活动影响较小。

### 2.1.2 表层沉积物碳氮含量的变化特征

大河口水库表层沉积物总有机碳(TOC)分布范围(图 3)为 1.38%~3.52%,平均值为 2.34%;总氮(TN)

分布范围在 0.06%~0.21%,平均值为 0.11%。B-B 断面表层沉积物碳、氮含量均最小,E-E 断面均最大,说明 E-E 断面具有较高的初级生产力,营养盐输入较多,存在富营养化的风险。总体而言,大河口水库有机质降解较彻底,水库整体的初级生产力不高。

大河口水库表层沉积物的 C/N 比值范围在 13.96~31.45,平均值为 22.43,最大值在 D-D 断面,C/N 为 25.73;最小值在 E-E 断面,C/N 为 17.22。根据 C/N 值初步判断大河口水库沉积物有机质的潜在来源为陆源和水生植物来源。

### 2.1.3 表层沉积物碳氮同位素的变化特征

大河口水库表层沉积物有机碳同位素( $\delta^{13}C$ )分布范围(图 4)在 -2.69%~-2.41%,平均值为 -2.54%,最大值与最小值相差 2.82%,说明有机质来源组成差异较小,表层沉积物富集最轻的是 A-A 断面,最重的是 D-D 断面。表层沉积物氮同位素( $\delta^{15}N$ )范围在 0.19%~0.54%,平均值为 0.39%,最小值在 A-A 断面,最大值在 E-E 断面,不同采样点间差异较小。研究结果可初步判定大河口水库表层沉积物有机质来源中内源对 A-A 断面的影响可能较大,陆源有机质对 D-D 断面的影响较大,库区有机质的来源为多元混合,且表层沉积物中  $\delta^{13}C$  与  $\delta^{15}N$  之间具有较显著的线性关系( $r=0.62$ )。

## 2.2 大河口水库表层沉积物有机质来源分析

### 2.2.1 表层沉积物碳氮同位素与含量间的相关性分析

为了更好地分析  $\delta^{13}C$  在沉积过程中是否受成岩作用的影响,对测定数据进行分析整理并绘制了  $\delta^{13}C$  与 C/N 和 TOC 的关系,如图 5、图 6 所示。由图可见,大河口水库表层沉积物中有机碳同位素( $\delta^{13}C$ )与碳氮比(C/N)之间存在显著的相关性( $r=0.82$ ),有机碳同位素( $\delta^{13}C$ )与总有机碳(TOC)之间存在较明显的相关性( $r=0.66$ ),充分说明了大河口水库表层沉积物有

表 1 大河口水库表层沉积物粒级组成及粒度特征

Table 1 Size composition and characteristics of grain size in the surface sediment of Dahekou Reservoir

采样断面 Sampling section	粒级组成 Grain composition/%				粒度参数 Grain size parameters			
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	细砂 Fine sand	粗砂 Coarse sand	平均粒径 Mean grain size ( $M_z$ )	偏度 Skewness ( $S_k$ )	分选系数 Sorting coefficient ( $\sigma$ )	峰态 Kurtosis ( $KG$ )
	0~2 $\mu m$	2~20 $\mu m$	20~200 $\mu m$	200~2000 $\mu m$				
A-A	2.04	26.50	69.78	1.68	61.02	0.42	0.18	0.82
B-B	2.10	20.27	74.42	3.22	71.05	0.27	0.29	0.97
C-C	1.16	12.20	84.23	2.43	85.01	0.02	0.34	0.84
D-D	0.43	8.28	90.98	0.32	68.40	0.10	0.49	1.11
E-E	4.85	49.86	45.27	0.03	35.11	0.71	0.13	0.84

机质受到初期成岩作用影响较大。氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )与总氮(TN)和C/N值之间也具有明显的相关关系,相关系数分别为0.69和0.81,表明大河口水库表层沉积物有机质的来源为陆源和内源的共同作用。

### 2.2.2 有机质来源定性分析

本文采用 $\delta^{13}\text{C}$ 与C/N值相结合的方式对大河口

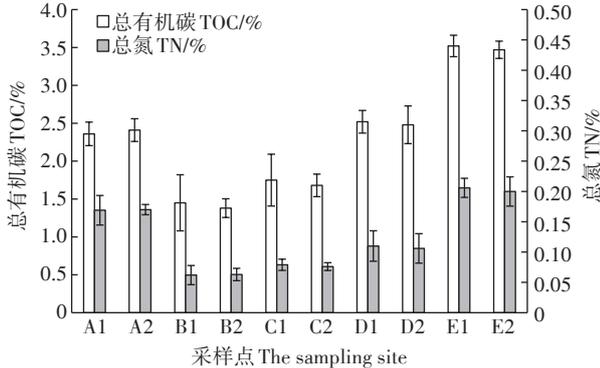


图3 大河口水库表层沉积物TOC、TN含量空间分布图

Figure 3 The content of TOC and TN in surface sediment of Dahekou Reservoir

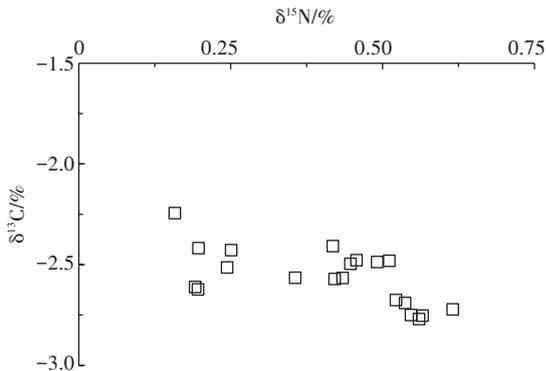


图4 大河口水库表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 的关系图

Figure 4 The relationship between  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  in the surface sediment of Dahekou Reservoir

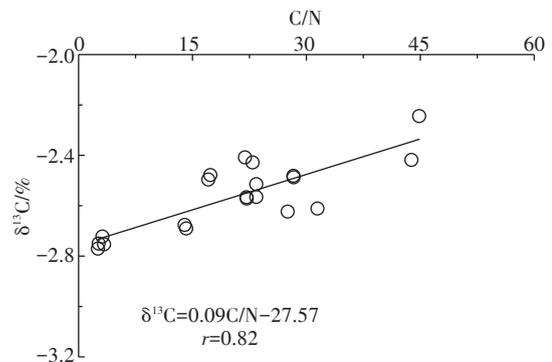
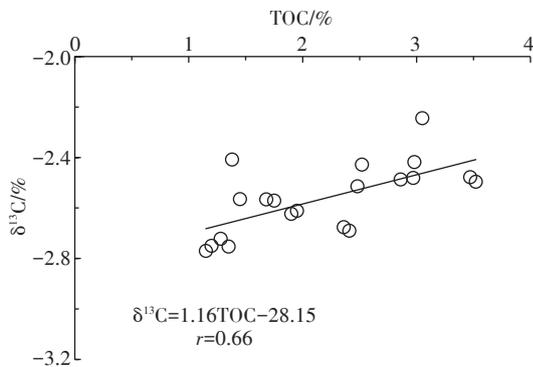


图5 大河口水库表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 与C/N和TOC的线性关系

Figure 5 The linear relationship among  $\delta^{13}\text{C}$  with C/N and TOC in the surface sediment of Dahekou Reservoir

水库表层沉积物有机质的来源进行定性分析。一般水体中沉积物有机质来源分为两种:(1)内源有机质:包含浮游生物、藻类及淡水水生植物,(2)外源有机质:包含土壤有机质及陆生植物(C3和C4植物)<sup>[22]</sup>。前人已对沉积物有机质来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N比值范围进行了归纳,本研究对库区周围土壤端元进行了测定。经过上述分析比较,初步将端元物质设定为浮游生物、淡水水生植物、土壤有机质、陆生C3植物和陆生C4植物5种。所选定端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N分布范围如表2所示。

将典型沉积物有机质来源 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值的分布范围绘制成五端元关系图(图7a)。由图可知,沉积物有机质来源集中在陆生C3植物、淡水水生植物和土壤有机质三端元中,为此进一步绘制三端元关系图(图7b),定性分析各端元的来源贡献。结果表明:大河口水库表层沉积物有机质来源中陆生C3植物贡献相对较大,为主要来源;淡水水生植物和土壤有机质贡献次之。

### 2.2.3 有机质来源半定量分析

为深入分析大河口水库沉积物有机质的来源,量化每个端元物质的贡献率,本研究采用三元混合模型进行定量分析。这个模型的原理是不同端元 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值在沉积物形成过程中的保守性和质量守恒定律<sup>[29]</sup>。根据上述对大河口水库有机质来源的定性判断,认为陆生C4植物和浮游生物对沉积物有机质的贡献相对较小,故忽略这2个端元,将端元物质简化确定为:陆生C3植物、土壤有机质和淡水水生植物。

根据表2分别将各端元分布范围的中间值作为特征值进行模型计算,得到的各端元值为:(1)土壤有机质: $\delta^{13}\text{C}=-2.30\%$ ,C/N=10.30;(2)陆生C3植物: $\delta^{13}\text{C}=-2.65\%$ ,C/N=29;(3)淡水水生植物: $\delta^{13}\text{C}=-2.86\%$ ,

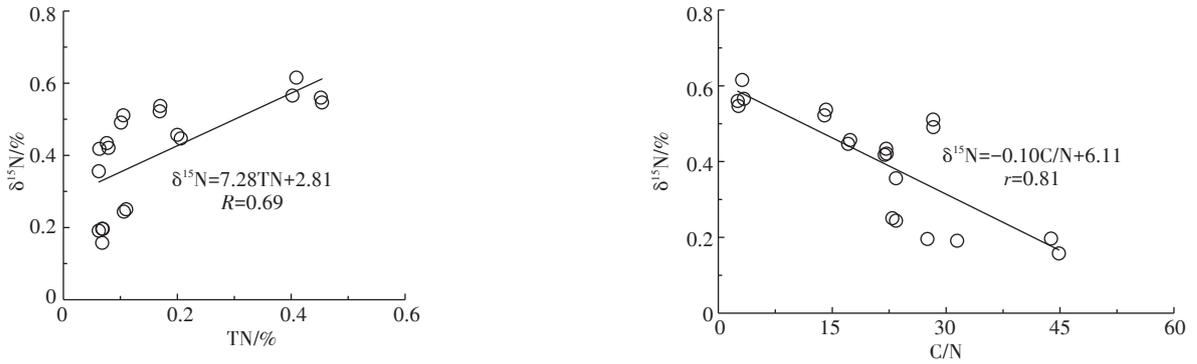
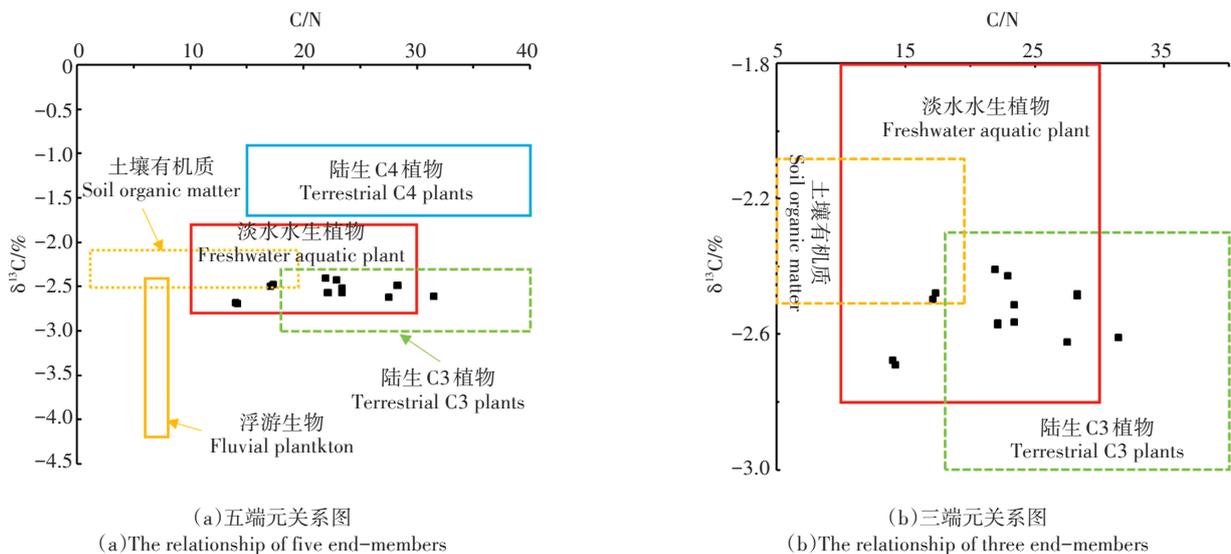


图6 大河口水库表层沉积物 δ<sup>15</sup>N 与 C/N 和 TN 的线性关系

Figure 6 The linear relationship among δ<sup>15</sup>N with C/N and TN in the surface sediment of Dahekou Reservoir



(a) 五端元关系图  
(a) The relationship of five end-members

(b) 三端元关系图  
(b) The relationship of three end-members

实心点表示沉积物有机质的数据点, 矩形表示不同端元 δ<sup>13</sup>C 和 C/N 的范围  
Solid point is the data point of organic matter, and rectangle is the range of δ<sup>13</sup>C and C/N for different end-members

图7 大河口水库表层沉积物 δ<sup>13</sup>C 和 C/N 值的端元关系图

Figure 7 The relationship of end-members between δ<sup>13</sup>C and C/N values in the surface sediment of the Dahekou Reservoir

C/N=15.1。根据以上端元值对大河口水库表层沉积物各监测断面有机质来源进行定量计算, 利用数值计算方法编制三元混合模型, 求出方程近似解, 即为端元贡献率, 计算结果见表3所示。

由表3可知, 大河口水库表层沉积物中, A-A断面有机质的主要来源为淡水水生植物(66.73%), 土

壤有机质贡献次之(30.27%), 陆生C3植物贡献率最小(3%左右)。根据实际采样调查A-A断面为河流入库断面, 水深浅、水流速度慢, 整个水库只在这个断面的浅滩处生长有芦苇等水生植物。B-B、C-C和D-D断面有机质主要来源为陆生C3植物(68.36%、60.88%、88.51%), 土壤有机质贡献次之(40.77%、

表2 典型沉积物有机质来源的 δ<sup>13</sup>C 和 C/N 值的分布

Table 2 Distribution of δ<sup>13</sup>C and C/N values of typical sources of sedimentary organic matter

有机质来源 Source of organic matter	δ <sup>13</sup> C/‰ Carbon isotope	C/N C/N ratio	数据来源 Data source
陆生C3植物 Terrestrial C3 plants	-3.0~-2.3	>18	[23-26]
陆生C4植物 Terrestrial C4 plants	-1.7~-0.9	>15	[23-26]
浮游生物 Plankton	-4.2~-2.4	6~8	[23-24, 26-28]
淡水水生植物 Freshwater aquatic plant	-2.8~-1.8	10~30	[23-24, 26-28]
土壤有机质 Soil organic matter	-2.51~-2.08	1.10~19.49	本研究测定值

29.11%、34.86%),淡水水生植物贡献最小或基本不存在。这些断面水深较深,最深处可达10多米,且受多风沙天气影响水流速度很急,基本没有水生植物生长。E-E断面有机质主要来源为土壤有机质(53.57%),陆生C3植物贡献次之(33.75%),淡水水生植物贡献最小(12.69%)。该断面为水库出水断面,库区周围沙化土壤会随着大风和水土流失进入水库影响到沉积物有机质的来源。总体来看,大河口水库表层沉积物有机质的贡献主要以陆生C3植物和土壤有机质为主,除A-A断面外,水生植物贡献较小,说明大河口水库初级生产力相对较好。

### 3 讨论

研究从有机碳、氮同位素和C/N比值角度证实大河口水库表层沉积物有机质来源主要受自然陆源(植被和土壤有机质)和内源(水生植物)的混合影响,且不同采样断面各来源的贡献率存在一定程度的差异。总体而言,大河口水库生产力较低,沉积物有机质主要来源于陆生C3植物和土壤。大河口水库的入库河流——滦河和吐力根河携带的有机物也会对水库沉积物有机质的陆源输入产生一定贡献,这方面的定量化研究有待于日后进一步加强。通过对大河口水库周围典型地块土壤类型和粒度特征调查发现,退化的草原、活化的沙地和裸露坡耕地在水库周围大面积分布,为沙尘暴的形成提供了有利条件。固定沙地一旦被破坏,沙尘物质极其丰富,已有研究表明浑善达克

固定沙地有机质的含量为3.09%,受风沙流远源搬运和输移的影响,大气降尘中携带的有机质势必会对水库水体产生一定影响。所以,对于沙源区大河口水库来说,大气降尘可能也是沉积物有机质的一个特有来源,我们后续正在开展降尘和入库河流中有机质的碳、氮同位素监测,以期更全面地揭示沉积物中有机质的来源。

同时,对比了国内一些水体如渤海、潮白河流域、巢湖、太湖等对表层沉积物有机质碳、氮同位素分布特征和来源解析的相关研究发现:大河口水库 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化不大,与渤海的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相接近,鄱阳湖的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较大;渤海表层沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化最小,大河口水库 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化比渤海稍大些,与鄱阳湖类似,太湖表层沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化最大。利用 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N比值来指示沉积物中有机质的来源分布,结果显示:渤海及河口表层沉积物受陆源有机质的影响;潮白河流域和鄱阳湖沉积物有机质为混合来源,既有外源土壤有机质,又有自身水生植物来源;太湖沉积物有机质来源以湖泊自生为主,包括水生植物和藻类;北京市公园湖泊沉积物有机质主要来源为外源污水有机质。本研究大河口水库沉积物有机质来源既有内源——水生植物,又有外源——土壤和陆生植物,其中以土壤有机质为主要来源。

此外,在对有机质来源进行定量分析时,能否选择合适的端元,准确划分和定义沙源区水库沉积物有机质的各潜在来源,将直接影响到分析的精度和可靠性。由于目前国内利用稳定同位素研究有机质来源时,各端元的划分和端元值的选取主要是从国外的研究中获取,但自然地理条件、植被类型的不同均有可能使得各潜在来源的稳定同位素值发生改变,这样会给有机质来源的准确分析带来困难。

### 4 结论

(1)大河口水库表层沉积物粒度以细砂和粉粒为主,其次为黏粒和粗砂,由入库到出库平均粒径明显变细,分选性较好。大河口水库沉积物以远源搬运的风成沉积物为主。

(2)大河口水库表层沉积物碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )分布范围在-2.69%~-2.41%,氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )范围在0.19%~0.54%, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 之间具有较显著的线性关系。

(3)通过端元混合模型对沉积物有机质来源进行定性和半定量分析表明:大河口水库表层沉积物有机质来源可能为淡水水生植物、土壤有机质和陆生C3

表3 不同来源对大河口水库表层沉积物有机质的贡献百分数(%)

Table 3 The contribution of different end-members substances in the surface sediment of Dahekou Reservoir (%)

采样断面 Sampling section	$f_{\text{C3}}$	$f_{\text{soil}}$	$f_{\text{p}}$
A-A	2.65	31.64	65.71
	3.36	28.89	67.75
B-B	68.85	26.67	4.48
	67.87	54.87	-22.74
C-C	60.62	28.67	10.71
	60.64	29.55	9.81
D-D	73.22	49.33	-22.55
	71.68	34.66	-6.34
E-E	32.43	52.46	15.11
	35.07	54.67	10.26

注: $f_{\text{C3}}$ 、 $f_{\text{soil}}$ 和 $f_{\text{p}}$ 分别代表来自陆生C3植物、土壤有机质和淡水水生植物的来源贡献百分含量。

Note:  $f_{\text{C3}}$ 、 $f_{\text{soil}}$  and  $f_{\text{p}}$  represent percentage of contributions from terrestrial C3 plants, soil organic matter, and freshwater aquatic plants.

表4 不同研究区沉积物中碳、氮同位素和C/N值变化范围

Table 4 Variation ranges of carbon and nitrogen isotopes and C/N values in sediments of different study areas

研究区 Research area	$\delta^{13}\text{C}/\%$ Carbon isotope	$\delta^{15}\text{N}/\%$ Nitrogen isotope	C/N C/N ratio	有机质来源 Source of organic matter	数据来源 Data source
渤海 Bohai sea	-2.38~-2.17	0.44~0.56	10~53	水生有机质	[13]
环渤海河河口区 River estuary area around Bohai sea	-2.64~-2.18	0.15~1.02	1~37	陆源有机质	[13]
潮白河流域 Chaobai river basin	-2.78~-2.16	0.13~0.67	8.5~13.7	土壤有机质水生植物	[16]
鄱阳湖 Poyang Lake	-2.84~-1.86	0.33~0.68	8.4~16.2	土壤有机质水生植物	[11]
太湖 Taihu Lake	-2.45~-1.93	0.45~1.52	5~10	水生植物藻类	[12]
北京城市公园湖泊 Lakes from Beijing park	-2.76~-2.21	0.10~1.03	8.3~30.3	污水有机质	[14-15]
大河口水库 Dahekou Reservoir	-2.69~-2.41	0.19~0.54	14~31.5	陆源有机质	本研究实测

植物在一定比例下的混合。

#### 参考文献:

- [1] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[R]. 北京: 国家林业局, 2015.  
State Forestry Administration P. R. China. A bulletin of status quo of desertification and sandification in China[R]. Beijing: State Forestry Administration, 2015.
- [2] 史培军, 王静爱, 陈婧, 等. 当代地理学之人地相互作用研究的趋向: 全球变化人类行为计划(HDP)第六届开放会议透视[J]. 地理学报, 2006, 61(2): 115-126.  
SHI Pei-jun, WANG Jing-ai, CHEN Jing, et al. The future of human-environment interaction research in geography: Lessons from the 6th open meeting of IHDP[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(2): 115-126.
- [3] Gireeshkumar T R, Deepulal P M, Chandramohanakumar N. Distribution and sources of sedimentary organic matter in a tropical estuary, south west coast of India(Cochin estuary): A baseline study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 66(1/2): 239-245.
- [4] Dang D H, Evans R D, Durrieu G, et al. Quantitative model of carbon and nitrogen isotope composition to highlight phosphorus cycling and sources in coastal sediments (Toulon Bay, France) [J]. *Chemosphere*, 2018, 195(3): 683-692.
- [5] Sampaio L, Freitas R, Múguas C, et al. Coastal sediments under the influence of multiple organic enrichment sources: An evaluation using carbon and nitrogen stable isotopes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(2): 272-282.
- [6] Sergio Contreras, Josef P Werne, A Araneda, et al. Organic matter geochemical signatures (TOC, TN, C/N ratio,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) of surface sediment from lakes distributed along a climatological gradient on the western side of the southern Andes[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 878-888.
- [7] 冀文豪, 郭匿春, 徐军, 等. 长江中游浅水湖泊沉积物碳氮同位素特征及其来源分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(6): 8-15.  
JI Wen-hao, GUO Ni-chun, XU Jun, et al. Carbon and nitrogen isotope characterization and source analysis of sediments from shallow lakes in the middle of Yangtze River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(6): 8-15.
- [8] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 1019-1025.  
WANG Mao-lan, LAI Jian-ping, HU Ke-tu, et al. Compositions and sources of stable organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments of Poyang Lake[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 1019-1025.
- [9] 倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞, 等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4661-4670.  
NI Zhao-kui, LI Yue-jin, WANG Sheng-rui, et al. The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4661-4670.
- [10] 王润梅, 唐建辉, 黄国培, 等. 环渤海地区河口及海洋表层沉积物有机质特征和来源[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 497-507.  
WANG Run-mei, TANG Jian-hui, HUANG Guo-pe, et al. Provenance of organic matter in estuarine and marine surface sediments around the Bohai sea[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 497-507.
- [11] 王春雨, 郭庆军, 朱光旭, 等. 稳定碳同位素技术在北京公园湖泊沉积物有机质来源分析与评价中的应用[J]. 生态学报, 2014, 33(3): 778-785.  
WANG Chun-yu, GUO Qing-jun, ZHU Guang-xu, et al. Applying stable carbon isotope techniques to detect different sources of organic matters in lake sediments from Beijing parks[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(3): 778-785.
- [12] 郭庆军, 王春雨, 朱光旭, 等. 氮同位素研究城市湖泊沉积物有机质来源和迁移过程——以北京为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(3): 532-538.  
GUO Qing-jun, WANG Chun-yu, ZHU Guang-xu, et al. Research on the source and migration process of organic matter of lake sediments using nitrogen isotope—A case study in Beijing[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(3): 532-538.
- [13] 卢风云, 刘竹青, 季宏兵. 潮白河上游有机质的碳、氮稳定同位素分析及来源探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1912-1922.  
LU Feng-yun, LIU Zhu-qing, JI Hong-bing. Carbon and nitrogen iso-

- topes analysis and sources of organic matter in the upper reaches of the Chaobai River near Beijing, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(12): 1912-1922.
- [14] 于志同, 王秀君, 赵成义, 等. 博斯腾湖表层沉积物无机碳及其稳定同位素空间异质性[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 250-257.
- YU Zhi-tong, WANG Xiu-jun, ZHAO Cheng-yi, et al. Spatial variations of inorganic carbon and isotopes in the surface sediment of the Lake Bosten[J]. *J Lake Sci*, 2015, 27(2): 250-257.
- [15] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 1039-1044.
- QIU Hua-bei, SHANG Li-hai, LI Qiu-hua, et al. Impacts of seasonal thermal stratification on the water environment of Wanfeng Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 1039-1044.
- [16] Fang J, Wu F, Xiong Y, et al. Source characterization of sedimentary organic matter using molecular and stable carbon isotopic composition of n-alkanes and fatty acids in sediment core from Lake Dianchi, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473/474: 410-421.
- [17] Gao X L, Yang Y W, Wang C Y. Geochemistry of organic carbon and nitrogen in surface sediments of coastal Bohai Bay inferred from their ratios and stable isotopic signatures[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(6): 1148-1156.
- [18] 卢俊平, 马太玲, 张晓晶, 等. 典型沙源区水库大气氮干、湿沉降污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2357-2363.
- LU Jun-ping, MA Tai-ling, ZHANG Xiao-jing, et al. Reservoir pollution by dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in typical sand area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2357-2363.
- [19] Fritz P, Fontes J C. Handbook of environmental isotope geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier, 1980.
- [20] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 150-154.
- YUAN Jie, CAO Guang-chao, E Chong-yi, et al. Grain size distributions of the surface soil deposit around Qinhai Lake and its implications[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 150-154.
- [21] 徐利强, 徐芳, 周涛发. 巢湖沉积物粒度特征及其沉积学意义[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1318-1324.
- XU Li-qiang, XU Fang, ZHOU Tao-fa. Grain-size features of lacustrine sediments from Chaohu Lake and its sedimentary implications [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1318-1324.
- [22] 李慧垠, 王广, 季宏兵, 等. 北京水源地水体中颗粒有机质的碳氮同位素研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2663-2671.
- LI Hui-yin, WANG Guang, JI Hong-bing, et al. Stable carbon and nitrogen isotope composition of particulate organic matter in water source of Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2663-2671.
- [23] Sarma VVSS, Arya J, Subbaiah Ch V, et al. Stable isotopes of carbon and nitrogen in suspended matter and sediments from the Godavari estuary[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68(2): 307-319.
- [24] Rostad C E, Leenheer J A, Daniel S R. Organic carbon and nitrogen content association with colloids and suspended particles from the Mississippi River and some of its tributaries[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 31: 3218-3225.
- [25] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 151: 1301-1346.
- [26] Boutton T W. Stable isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments[M]//Coleman C, Fry B, et al. Carbon Isotope Techniques, New York: Academic Press, 1991: 173-185.
- [27] Zhang Y, Zhang Y, Yu T. Contribution rate of exogenous organic matter in sediments from typical areas of Taihu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(3): 251-258.
- [28] Rosenbauer R J, Swarzenski P W, Kendall C, et al. A carbon, nitrogen and sulfur elemental and isotopic study in dated sediment cores from the Louisiana Shelf[J]. *Geo-Marine Letters*, 2009, 29(6): 415-429.
- [29] Volvoikar S P, Nayak G N, Mazumdar A, et al. Reconstruction of depositional environment of a tropical estuary and response of  $\delta^{13}C_{org}$  and TOC/TN signatures to changing environmental conditions[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 139: 137-147.