

· 专题 10: 表层地球系统生物地球化学循环及其生态环境效应 ·

草海表层沉积物有机质空间分布与来源识别

杨海全, 陈敬安*, 曾艳, 王敬富, 计永雪, 徐丹

中国科学院 地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

湖泊沉积物作为流域地表运移物质和大气散落物质的宿体, 连续、敏感、高分辨地记录了区域及全球环境信息, 是研究过去环境变化的重要档案馆 (Graney *et al.*, 1995; 万国江等, 2000)。沉积物包含了丰富的生物与环境信息, 沉积物有机质保存了原始生产力转变过程及自然因素控制的水质变化等重要信息 (Wu *et al.*, 2004)。沉积物中有机质来源包括内源 (主要是藻类和水生植物) 和外源 (主要是流域侵蚀带来的陆源植物碎屑) (陈敬安等, 2002)。不同来源的有机碳由于其光合作用、碳同化作用和碳源同位素组成不同, 因而具有特定的稳定碳同位素组成, 可以指示水生系统中有机碳的不同来源, 有机质的稳定碳同位素组成和 C/N 值被认为是判断有机质来源的有效指标 (Yu *et al.*, 2015), 很多研究者将有机质碳同位素组成与 C/N 值结合起来示踪有机质的不同来源。

研究沉积物中有机碳的空间分布和来源变化, 对阐明水生生态系统中碳氮磷的迁移转化过程以及控制内源负荷和防治富营养化具有重要指导价值。本文通过对草海表层沉积物有机碳、氮含量和碳同位素组成的对比研究, 揭示草海沉积物有机碳的不同来源及贡献大小, 为草海湿地保护和富营养化防治提供科学依据与理论指导。

1 草海表层沉积物 TOC、TN、C/N 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量空间分布

草海表层沉积物 TOC 含量变化范围为 6.86%~34.85%, 均值为 $23.30 \pm 7.80\%$, 高出红枫湖、太湖、鄱阳湖等湖泊 10 倍甚至更高。这与草海湿地水生植物繁茂有关, 较高的湖泊初级生产力对草海有机碳贡献非常大 (陈毅凤等, 2001)。大量的水生植物和藻类死亡后累积在沉积物表层, 短期内很难被降解, 致使表层沉积物中有机碳含量远远高于其他

湖泊。毗邻县城的东部湖区近年来水污染严重, 沉水植物大幅减少, 导致该地区沉积物 TOC 含量不高, 而草海出水口的西北湖区水流速度较快, 沉积物 TOC 含量也明显低于其他湖区 (杨海全等, 2016)。表层沉积物 TN 含量在 0.93%~4.00% 之间, 均值为 $2.52 \pm 0.76\%$, 空间分布特征与 TOC 接近, 东部湖区较低, 湖心和西南湖区较高, 出水口湖区最低。相关性分析显示草海表层沉积物中 TN 与 TOC 含量呈显著正相关 ($R=0.9338, p<0.01$), 表明草海表层沉积物中 TOC 与 TN 来源一致, 且氮绝大部分以有机态形式存在于有机质中。表层沉积物有机碳稳定碳同位素组成变化范围为 $-28.49\text{‰} \sim -18.19\text{‰}$ 之间, 均值为 $23.30\text{‰} \pm 2.88\text{‰}$ 。东部湖区相比其他湖区明显偏负, 变化范围为 $-26.48\text{‰} \sim -28.49\text{‰}$, 此处为全湖水体污染最严重区域。其余湖区有机碳稳定碳同位素值变化集中在 $-20.82\text{‰} \sim 24.64\text{‰}$ 之间, 位于西南湖区的 17 号采样点最正 (-18.19‰), 该区域水质较好, 沉水植物繁茂。表层沉积物 C/N 值变化范围为 7.36~11.12, 均值为 9.13 ± 1.17 , 未表现出明显的差异。

2 草海表层沉积物有机碳来源分析

根据沉积物有机质稳定碳同位素组成和 C/N 值可确定其有机碳的来源。稳定碳同位素组成反映了生物体光合作用中碳同化作用的动力学过程及其碳源的同位素组成。由于不同的光合途径, C4 植物吸收 CO_2 效率更高, 因此体内碳同位素较 C3 植物偏正。一般认为陆生高等植物的 C/N 值较高, 而低等植物和藻类有机氮含量较高, 因此湖泊浮游植物的 C/N 值较低。沉积物 C/N 值越高, 说明沉积物中有机质更多来源于陆源输入, C/N 值较低则反映了更多藻类来源及湖区初级生产力较高。

研究表明湖泊水生藻类植物含较多的蛋白质,

基金项目: 贵州省科学技术基金项目; 贵州省科技重大专项计划项目 (黔科合重大专项字 [2016] 3022 号)

第一作者简介: 杨海全 (1987-), 男, 博士后, 研究方向: 湖泊生物地球化学循环. E-mail: yanghaiquan@vip.skleg.cn.

* 通讯作者简介: 陈敬安 (1973-), 男, 研究员, 研究方向: 湖泊水库与环境. E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

其C/N一般小于10, 而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为 $-20\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 。陆源有机质富含腐殖质, TOC/TN一般大于10, 通常20~30之间、也有不少在30以上。C4植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-10\text{‰} \sim -16\text{‰}$, 均值为 -14‰ 。C3植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 一般为 $-23\text{‰} \sim -30\text{‰}$, 均值为 -27‰ (Meyers *et al.*, 1999; 唐珉等, 2006; 王雨春等, 2014)。为作图方便, 将C3、C4植物C/N值上限定为80, 再结合Meyers的研究, 将C3植物和C4植物C/N值下限分别确定为20和40。因此确定草海陆源输入的C3植物端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-23\text{‰} \sim 30\text{‰}$, C/N值为20~80。C4植物端元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-10\text{‰} \sim 16\text{‰}$, C/N值为40~80。根据草海藻类样品分析结果, 参考已有研究确定草海藻类端元 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-24\text{‰} \sim -31\text{‰}$, C/N值为4~10, 沉水植物端元 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-14.6\text{‰} \sim -19.9\text{‰}$, C/N值为13.2~18.6。

通过 $\delta^{13}\text{C}$ 与C/N作图绘制草海沉积物有机碳来源端元示意图。草海表层沉积物有机碳稳定碳同位素和碳氮比差异性较大。东部湖区少数几个点的表层沉积物主要来源于湖泊藻类初级生产, 较少受到陆源输入和沉水植物影响。该地区受到县城生活污水直接排入, 营养盐充足, 威宁地区光照时间较长 (张华海等, 2007), 适宜藻类生长。前人研究也表明该区域浮游植物总量和叶绿素a均大于其他湖区 (潘静等, 2012)。出水口区域沉积物有机碳基本来源于当地沉水植物。此处水流较快, 藻类物质很容易被带走。其余大部分湖区沉积物有机碳来源于沉水植物和藻类。陆源输入对草海表层沉积物有机碳贡献较小, 即使在主要入湖河流进入湖泊的东部区域也影响甚微。这是因为草海主要补给为大气降水和地下水, 几个主要入湖河流流量不大, 而且大部分被沿线居民截留用于农业灌溉, 所以陆源物质较难大量进入湖区。

根据前文分析, 研究区外源输入较少, 且草海流域C4植物分布非常少, 所以C4植物对沉积物有机碳的贡献很小, 可以忽略此端元。将草海沉积物

有机碳确定为以下3个端元: 藻类、沉水植物、陆源C3植物。混合模型为:

$$\begin{aligned} \delta^{13}\text{C}_s &= f_{\text{algae}} \delta^{13}\text{C}_{\text{algae}} + f_{\text{sp}} \delta^{13}\text{C}_{\text{sp}} + f_{\text{C3}} \delta^{13}\text{C}_{\text{C3}} \\ \text{C/N}_s &= f_{\text{algae}} \text{C/N}_{\text{algae}} + f_{\text{sp}} \text{C/N}_{\text{sp}} + f_{\text{C3}} \text{C/N}_{\text{C3}} \\ 1 &= f_{\text{algae}} + f_{\text{sp}} + f_{\text{C3}} \end{aligned}$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 为稳定碳同位素组成, C/N为碳氮含量比, s为沉积物, f为不同端元对应的贡献值, 下标algae为藻类端元, sp为沉水植物端元, c3为陆源C3植物端元。根据端元值范围均值或文献常用数据确定3个端元特征值, 其中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{algae}}$ 为 -30‰ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{sp}}$ 为 -16.6‰ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{C3}}$ 为 -27‰ , $\text{C/N}_{\text{algae}}$ 为6.6、 C/N_{sp} 为16.1、 C/N_{C3} 为21。

根据各采样点表层沉积物有机碳的稳定碳同位素组成和碳氮比数据, 用上述端元值进行模型计算得到3类端元对应的贡献率。计算结果显示绝大部分采样点主要来源为浮游藻类和沉水植物, 而陆源C3植物贡献值为负值。这与以上分析基本相符, 即草海表层沉积物有机碳主要来源于藻类生产和沉水植物, 陆源输入只影响到东部局部区域。基于以上分析, 为了较准确计算各采样点表层沉积物有机碳来源, 假设陆源C3植物端元只对1#、2#、5#3个采样点有贡献, 其余采样点忽略只有藻类和沉水植物2种端元, 将上述模型简化为二元混合模型。因为这2个端元值中稳定碳同位素组成的差异性较碳氮比的差异性大, 所以根据稳定碳同位素组成计算2个端元的贡献值更精确。结果表明, 草海表层沉积物有机碳3类端元中藻类贡献率为11.86%~88.71%, 均值为48.79%; 沉水植物贡献率为11.27%~88.14%, 均值为49.68%; 陆源输入影响较小, 贡献率范围为0%~16.50%, 均值为1.54%。靠近县城东部湖区表层沉积物有机碳主要来源为藻类(最大贡献率为88.71%), 其次为沉水植物, 外源输入贡献较小。西部湖区沉水植物繁盛, 沉积物有机碳主要来源于沉水植物(最大贡献率为88.14%), 藻类贡献较少。