

# 碳同位素在湿地碳循环研究中的应用及进展\*

陈玲<sup>1,2</sup> 王中良<sup>1,3\*\*</sup>

(<sup>1</sup>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 550002; <sup>2</sup>中国科学院研究生院,北京 100049; <sup>3</sup>天津师范大学,天津市水资源与水环境重点实验室,天津 300387)

**摘要** 湿地碳库是区域生态系统最重要的碳库之一,湿地碳循环是全球碳循环的重要环节。在湿地碳循环研究中,传统方法越来越不能满足人们对湿地中碳循环微观机理的了解,而碳同位素方法因其特殊的物源和过程示踪价值成为湿地碳循环研究的重要手段。本文从湿地碳循环的主要研究对象和基本研究方法出发,讨论了碳同位素方法的基本原理及其在碳循环研究中的优势,分析了碳同位素方法在湿地生物过程、水体、沉积物和土壤以及温室气体排放等方面的应用,归纳总结了碳同位素在我国湿地生态系统碳循环研究中的不足及未来发展方向。

**关键词** 湿地; 碳循环; 同位素; 生物地球化学过程

中图分类号 P597; X142 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)7-1862-08

**Applications of carbon isotopic method in wetland carbon cycle and related research advances.** CHEN Ling<sup>1,2</sup>, WANG Zhong-liang<sup>1,3\*\*</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(7): 1862 - 1869.

**Abstract:** Wetland carbon pool is one of the important carbon sinks in regional ecosystems, while wetland carbon cycle is an important link in global carbon cycle. However, in the researches of wetland carbon cycle, traditional methods cannot meet our requirements for investigating microscopic mechanisms. Carbon isotopic method, due to its special merit in providing source-and process information, has been used as one of the most important tools, helping us probe more detailed mechanisms of wetland carbon cycle. Aiming at the main objects and the basic methods in wetland carbon cycle research, this paper introduced the basic principles of carbon isotopic method and its advantages in carbon cycle research, and summarized the applications of this method in researching wetland biological processes, water body, sediment, and soil, as well as the greenhouse gases emission from wetland. The deficiencies of carbon isotopic research in wetland ecosystem carbon cycle in China and the future directions of this research were also discussed.

**Key words:** wetland; carbon cycle; isotope; biogeochemical process.

气候变化和一系列全球性生态环境问题已经引起各国政府和科学界的高度重视,碳循环成为当前全球变化研究领域中的焦点问题之一(丁仲礼等, 2009; 朴世龙等, 2010)。作为陆地生态系统的重要

碳库,湿地生态系统储存了地球约 20% 的碳,在稳定全球气候变化中占有重要的地位,湿地碳循环构成了全球碳循环的重要环节。多数国家都对本国湿地碳循环进行了研究,根据研究目的的不同主要分为五个方面: 1) 对湿地水体碳循环的研究,包括不同形态碳的含量测定及地球化学迁移转化过程等(余婕等, 2008; 李慧垠等, 2011)。2) 对湿地植被、动物的研究,主要集中在植物水分利用、植被类型对

\* 中国科学院重要方向项目(kzcx2-yw-137)、国家重点基础研究计划前期研究专项(2010CB434806)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0954)和天津市科技计划项目(10JCZDJC24800和10SYSYJC27400)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: wangzhongliang@vip.skleg.cn

收稿日期: 2012-02-17 接受日期: 2012-04-13

碳循环过程的影响、食物网物质循环和食源研究等方面(全为民,2007;殷树鹏等,2008;曾庆飞等,2008)。3)对湿地土壤和沉积物碳循环过程的研究,以有机碳含量和分布以及碳稳定同位素组成为主(彭佩钦等,2005;迟传德等,2006;张远等,2011)。4)对湿地气体排放过程及机理研究,其中以甲烷排放为研究热点(Chasar *et al.* 2000;黎明和李伟,2009)。5)含C温室气体的监测研究,主要有微气象学法、箱法、定量遥感法以及理论模式计算法(王俊峰,2008)等。

在上述系列研究中,技术方法主要依赖于化学量化分析和通量监测等传统手段,而对于湿地碳循环的微观过程和源/汇示踪很难深入进行。而碳同位素的示踪作用可以实现这一功能,因此以碳同位素(包括稳定碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  和放射性同位素  $\Delta^{14}\text{C}$ ) 来示踪物质来源和地球化学过程成为了国内外学者研究湿地生态系统碳循环的重要手段之一。稳定碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )不仅可以区分碳源,也可示踪循环过程的各个环节产物,从而对碳的迁移转化过程进行示踪(李思亮等,2004)。通过计算植物残体及土壤有机质中的 $^{14}\text{C}$ 含量,可以得到碳的存留时间和各碳库间的碳转移速率(韦莉莉等,2005;朱书法,2006;黎明和李伟,2009)。国内外学者在生态系统碳同位素研究领域开展了广泛的研究,尤其是在重建生态系统中的碳动力学过程、模拟大气 $\text{CO}_2$ 浓度上升对碳循环过程的影响以及土壤有机质周转周期等领域。

本文从湿地碳循环的主要研究手段和方法对比出发,综述了同位素方法在碳循环研究中的技术优势和应用原理,总结了利用碳同位素方法研究湿地系统的生物地球化学过程的现状和进展,旨在深入了解碳同位素方法在湿地碳过程中的应用,为合理开发利用湿地、防治富营养化和污染、增加碳汇以及减缓全球变暖提供科学依据。

## 1 碳同位素在湿地碳循环研究中的优势及其重要性

根据《湿地公约》的定义,湿地是指水深不超过6 m的水域,包括沼泽、泥炭地、红树林、河流、湖泊、滩涂、稻田、堰塘、水库以及浅海等(张文菊等,2003;迟传德,2006)。是水陆相互作用形成的多功能的、兼有陆生和水生特点的独特自然生态系统,是地球上生产力最高的生态系统之一(于洪贤和黄璞

2008)。它具有涵养水资源、维持生物多样性、蓄洪防旱、促淤造陆、降解污染物、调节气候等重要作用,被称为“地球之肾”。

碳是湿地生态过程的主要生源要素之一,它决定了湿地的生态与环境过程,所有其他重要元素的生物循环过程都与碳密切相关。湿地碳循环的研究对认识水环境变化、水生态过程、元素循环以及其相互作用具有重要的指示意义。湿地碳循环研究的最基本环节包括了碳输入、碳积累与固定过程和碳分解与碳输出过程,是了解碳库长期变化的重要手段(迟传德,2006;段晓男等,2006)。湿地碳循环的传统研究方法主要分为两大类,一是循环过程及化学反应的量化示踪法(Benner *et al.*, 1993),二是温室气体通量监测(包括微气象学法、箱法和定量遥感法等)。传统研究方法注重湿地碳循环量的研究,但由于湿地内部之间以及内部和外界之间的生物地球化学过程的复杂性和物源的多样性,传统的研究无法准确探讨湿地碳循环过程、环境演化以及人类活动对湿地的影响等。

对湿地碳循环的研究,主要包括对碳的各形态(DIC、PIC、DOC和POC)浓度的测定,从而讨论各形态之间的相互转化,但是传统的方法往往无法完成对浓度和同位素值的全面研究,因此对如何产生这些通量的认识即更微观的机理性研究难以深化。元素比值(如C/N比值)法在沉积物有机质来源的研究中比较常用,但是仅仅运用常规的C/N比难以准确区分沉积有机质的来源。由于土壤有机质的组分具有不同物理化学属性和周转时间,因此传统的土壤普查方法很难精确探测到几十年之内气候变化和土地利用变化对土壤碳储量的影响。

天然存在的碳同位素作为示踪剂对于研究全球碳循环有着非常重要的意义。稳定同位素无放射性、安全、准确,还具有综合长期地球化学变化和联系不同系统成分的能力,起着在时间、空间上联络的作用,在地球化学研究中具有独特的应用价值(曾芳和毛治超,2010)。它对研究碳的生物转化途径和地球化学循环有重要作用,因此被广泛用于探讨各种生态环境中的物质来源和迁移规律(Zhang *et al.*, 1995;蔡德陵等,2002;韦莉莉等,2005)。例如,沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定可以追溯有机质的来源,从而可以更加灵敏地揭示碳循环的干扰和恢复过程(于贵瑞等,2005)。稳定碳同位素方法已经成为识别湿地生态系统中各类碳形态物质来源的

有效方法之一,对监测流域植被组成、环境变迁是一种非常有效的指标,为中短时间尺度环境变化研究提供了一条新的途径。同时,稳定同位素技术解决了湿地碳循环过程中许多其他研究方法不能解决的问题,在追溯土壤有机质来源、研究土壤有机质及其组成的周转及重现 C3/C4 植被变化历史方面的应用日趋成熟,利用  $\delta^{13}\text{C}$  值对土壤碳酸盐进行区分、研究土壤系统内部碳元素的转移也展现出良好的前景,比传统的方法更为稳定、准确(蔡德陵等 2003; 张林等 2010)。

另外,在技术方法上,碳同位素手段也有其优势的一面。例如,在进行生物组织对环境变化响应的研究中,由于受时间和技术限制,用于生理试验的样本数量往往受到限制,而生物组织中的碳同位素却整合了较长时间跨度的环境信息,可以对不同环境变化和胁迫信息进行综合评估。进行同位素分析的样品不仅限于保存时间很短的生物组织,同时对组织分解残留物如蜡叶、纤维素甚至化石也可以进行分析,这大大延长了人类可以研究碳循环的历史时间(刘海燕和李吉跃 2007)。

## 2 碳同位素方法的基本原理

自然界中,碳元素具有两种稳定的同位素 $^{13}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}$ ,其中 $^{12}\text{C}$ 丰度 = 98.89%, $^{13}\text{C}$ 丰度 = 1.11%(Nier, 1950)。通常所说的稳定碳同位素比值,即为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值,以 $\delta^{13}\text{C}$ 表示,使用千分差单位(‰),即:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 1000$$

碳同位素分析标准为 PDB,即产于美国南卡白垩系皮迪组(Pee Dee Formation)的拟箭石(Belem-

nite),其“绝对” $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = (11237.2 \pm 90) \times 10^{-6}$ ,定义其 $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ (Hayes *et al.*, 1982; Hoefs 2004)。

同位素示踪技术手段需要满足两个条件,一是要有同位素分馏效应存在,二是不同来源物质具有特定的同位素组成。自然界有两大主要碳库:有机碳和碳酸盐,前者轻(-9‰ ~ -34‰),后者重(-2‰ ~ 2‰)(Clark & Fritz, 1997; 郑永飞和陈江峰, 2000; 刘丛强 2007)。无论是无机还是有机碳,在它们的形态和组成发生转变时都存在明显的同位素分馏效应。根据不同物质来源的有机质中稳定碳同位素的成分存在的明显差别,可对有机质的物源进行判别(Cifuentes *et al.*, 1988; Goering *et al.*, 1990; Montoya *et al.*, 1992; Sachs *et al.*, 1999; 韦莉莉等 2005)。地表主要碳储库的碳同位素组成分布范围见图 1。

碳同位素的分馏机理主要有两个:(1)  $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-} - \text{CaCO}_3$ 体系中的碳同位素交换引起的同位素分馏。 $\text{CO}_2$ 气体与各种水溶碳酸根原子团之间的碳同位素交换反应使碳酸盐富集 $^{13}\text{C}$ ,总的来说, $^{13}\text{C}$ 趋于富集在碳的高价化合物中,即: $\text{CH}_4(^{13}\text{C} \text{最亏损}) \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_3^{2-} (^{13}\text{C} \text{最富集})$ 。(2) 生物过程中的动力学效应,光合作用是最主要的动力学分馏机制。在光合作用中,通常存在下列化学反应: $6\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_{11} + 6\text{O}_2$ 。这是单向反应,空气中的 $^{12}\text{CO}_2$ 键比 $^{13}\text{CO}_2$ 易破裂,因此光合作用时植物组织优先吸收 $^{12}\text{CO}_2$ ,使有机物中富集 $^{12}\text{C}$ ,而空气则富集 $^{13}\text{C}$ 。因此,在湿地生态系统碳循环过程中,稳定碳同位素组成不仅可以示踪碳源,也可示踪循环过程的各个环节产物,从而对碳迁移转化过程进行示踪。

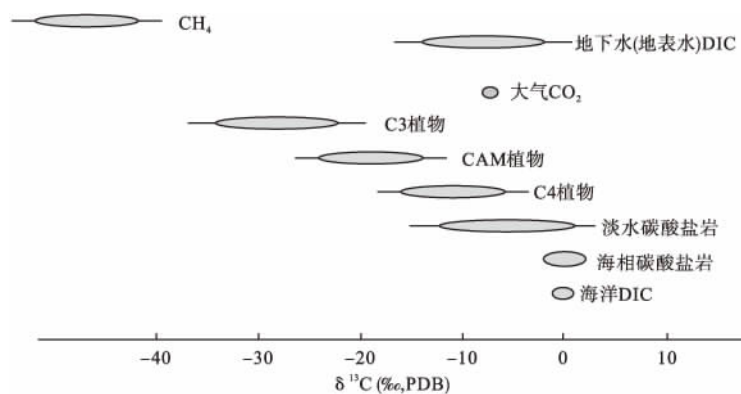


图 1 地表环境中不同碳库的碳同位素组成

Fig. 1 Carbon isotopic composition of different carbon pools

数据引自 Clark & Fritz, 1997; 郑永飞和陈江峰 2000; 刘丛强 2007。

此外,还有一种核反应形成的放射性同位素 $^{14}\text{C}$ ,在湿地碳循环研究中也广泛采用(韦莉莉等,2005;朱书法2006;黎明和李伟,2009)。 $^{14}\text{C}$ 产生于大气中,其半衰期为5730 a。大气中的 $^{14}\text{C}$ 迅速转变为 $\text{CO}_2$ 分子,均匀分布于大气中。植物通过光合作用可以吸收大气 $\text{CO}_2$ 中的 $^{14}\text{C}$ ,因此植物体内通常保持一定数量的 $^{14}\text{C}$ 。植物死亡后,光合作用停止,不再吸收 $\text{CO}_2$ ,植物残体内的 $^{14}\text{C}$ 随放射性的衰减而含量逐渐下降。因此,通过计算植物残体及土壤有机质中的 $^{14}\text{C}$ 含量,可以计算碳的存留时间和各碳库间的碳转移速率(黎明和李伟,2009)。

### 3 碳同位素在湿地碳循环研究中的应用实例

#### 3.1 同位素在湿地生物过程中的应用

在湿地生物过程的碳同位素分馏效应中,光合作用是最主要的动力学分馏机制。湿地植物吸收 $\text{CO}_2$ 合成有机质,这一反应优先吸收 $^{12}\text{C}$ 。大气中 $\text{CO}_2$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 $-8\text{‰}$ ,在向植物细胞内部扩散的过程中,产生了约 $-4\text{‰}$ 的分馏。根据光合作用途径不同(C3、C4和CAM途径),其分馏值各不相同。大多数植物进行C3循环来固定碳,使得它们的 $^{13}\text{C}$ 较为亏损, $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-22\text{‰} \sim -34\text{‰}$ ,而利用C4循环固定碳的植物其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-9\text{‰} \sim -17\text{‰}$ (Smith & Epstein,1971; Farquhar *et al.*,1989)。CAM植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般介于C3和C4植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 之间。湿地水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围较宽,为 $-11\text{‰} \sim 50\text{‰}$ (Keeley & Sandquist,1992)。河流、湖泊和湿地植物的碳同位素组成记录了区域气候因子和影响植物碳同化以及生理因子的相关信息,结合水体DIC浓度及形态的分析可以反映水体环境因素的影响(林清和王绍令,2001;刘海燕和李吉跃,2007;何书林等,2010)。

在湿地生态系统中,各生物种群间的摄食关系、营养物质和能量流动是一个难题,而碳稳定同位素方法为这一难题的研究提供了新的手段。当食物中的碳稳定同位素组成发生变化时,动物体内的碳稳定同位素组成也发生相应的变化,就可推断动物的摄食情况。万祎等(2005)利用碳氮稳定同位素分析了渤海湾食物网主要生物种的营养层次,直观反映了各生物种间食物关系。全为民(2007)分析了长江口盐沼湿地主要优势大型无脊椎动物和游泳动物的食源,估算了动物消费者的营养级和构建了长江口盐沼湿地的简化食物网模型。曾庆飞等

(2008)总结了利用稳定同位素技术揭示水域食物网中物质的循环途径和探究消费者、生产者间的营养关系的方法。稳定同位素在水生生物的洄游及迁移路线和生长过程中食性变化研究中均有应用(曾芳和毛治超,2010)。

#### 3.2 同位素在湿地水体碳循环研究中的应用

水体悬浮物记录了流域土壤侵蚀的信息,反映了土壤有机碳和植被的动态变化。由于不同环境形成的POC碳同位素组成明显不同,因此 $\delta^{13}\text{C}$ 值还可以记录流域的水土流失状况。有机物的碳同位素研究已经被证实是研究海洋、河口以及湖泊中生物地球化学过程的有效示踪剂。POC和DOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 已经被成功用于判断有机碳的来源,并且可以帮助了解有机物的循环,因此对源的判断对掌握整个水生生态系统中碳的迁移转化具有重要意义(陈毅凤等,2001)。

Cai等(1988)和Barth等(1998)利用稳定碳同位素法分别研究了亚马逊河及其主要支流以及St. Lawrence上游区域的POC来源。吴莹等(2002)和余婕等(2008)结合C/N比值法对长江悬浮颗粒物稳定碳氮同位素的季节变化规律进行了研究,估算了不同物质的贡献。魏秀国等(2003,2010)研究了珠江水体中悬浮颗粒有机碳的含量及其稳定同位素组成和分布,分析了C4和C3植物的影响,揭示了流域植被破坏和恢复过程以及土壤侵蚀状况的变化趋势。许斐等(2011)分析了长江干流一年内表层悬浮物样品的粒度、POC及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值,揭示了三峡水库建设对长江下游颗粒有机碳通量及同位素组成的影响。李慧垠等(2011)综合利用水化学特征、形态含量分析和碳氮稳定同位素方法对密云水库、野鸭湖湿地和北运河水体中POC和表层沉积物进行研究,表明密云水库夏季颗粒有机质受C3植物和水生植物的共同影响,冬季水生藻类对有机质的贡献增大。

湿地生态系统研究中,溶解无机碳(DIC)是重要研究内容之一。光合作用与呼吸作用是影响水体DIC同位素组成变化的主要因素,这主要表现在水体DIC同位素组成与浓度呈反相关。光合作用形成有机质时, $^{12}\text{C}$ 被优先利用,使水体DIC浓度降低,同时水体中 $^{13}\text{C}$ 的富集使得 $\delta^{13}\text{C}$ 增加;相反,呼吸作用增强时,有机质分解释放大量的 $^{12}\text{C}$ 进入水体,使湖水DIC浓度增加, $\delta^{13}\text{C}$ 降低(闫慧等,2011)。植物根系、凋落物和土壤有机质具有显著

不同的  $\delta^{13}\text{C}$  值,肖胜生等(2009)曾利用同位素判别法来推断生物呼吸作用所产生的  $\text{CO}_2$  的来源。而湿地输入性 DIC 则主要来自流域土壤有机质分解所释放的  $\text{CO}_2$ ,其  $\delta^{13}\text{C}$  大多数在  $-32\text{‰} \sim -20\text{‰}$ (李甜甜等 2007; 焦树林等 2008),水体中 DIC 含量和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  变化反映了碳的地球化学行为和生物地球化学循环特征(李思亮等 2004; 李干蓉等 2009; 吴春勇等 2011)。

### 3.3 同位素在湿地土壤和沉积物中的应用

湿地沉积物碳含量及碳同位素组成反映了区域生态环境变化的特点,沉积物中有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值具有一定反映气候冷暖波动的意义(沈吉等,1996; 谢远云等 2004),其包含的生物和理化信息,可以揭示  $\text{CO}_2$  浓度的变化、湖泊水位波动、湖区生态与植被变迁以及气温变化等重要信息(周志华等 2007),对于重建湖泊古生产力变化(葛晨东等 2007)、沉积有机质的来源以及随后的沉积演化过程具有重要意义(吴敬禄等,2005; 王立群等,2007; 张远等,2011)。利用碳同位素还能研究湿地土壤中不同颗粒大小或密度有机质的周转情况(Doane *et al.*, 2003; Ellerbrock & Kaiser 2005; 陈庆强等 2007),以及不同生态利用方式和不同环境条件对土壤有机质含量的影响(Spaccini *et al.*, 2006; 丁喜桂等 2011; 张月鲜等 2011)。

近年来,湿地自生碳酸盐和降解残留纤维素的碳同位素组成在区域气候与环境变化方面的应用研究发展迅速,揭示了水体与大气  $\text{CO}_2$  的交换程度、降水量的多少、流域 C3 和 C4 植被变化情况、水生生物光合作用或呼吸作用强弱、湖泊生产力大小、湖泊水体化学特征和湖水不同深度层的有机质变化过程等重要的气候和环境信息(陈敬安等 2002; 徐玉慧等 2006; 曾承 2010; 朱正杰等 2011)。

### 3.4 同位素在温室气体排放过程中的应用

湿地还是  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  等温室气体的主要来源,是大气/湿地界面研究的热点,其中重要而有效的研究手段之一也是碳同位素法(Sugimoto & Wada, 1993; Tyler *et al.*, 1997; Kruger *et al.*, 2002; 张广斌等 2011)。Chasar 等(2000)用碳同位素示踪法对泥炭沼泽和苔藓泥炭地甲烷产生来源进行了示踪,揭示了甲烷的浓度、排放率、排放出的  $\text{CH}_4$  中稳定同位素比值等均受自然植被的影响。Chanton 等(2002)利用稳定碳同位素技术对新老芦苇湿地  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  浓度的昼夜变化进行研究,证明  $\text{CH}_4$  浓

度的昼夜变化与芦苇中  $\delta^{13}\text{C}$  值变化趋势一致,气体的传输途径影响水生植物中的同位素分馏。

## 4 结 语

目前,中国湿地碳循环及温室气体源/汇效应的研究主要集中在泥炭地碳动态和主要营养元素在湿地物质循环中的化学过程方面(黄国宏等 2001; 刘景双等 2003; 迟传德等,2006),如温室气体排放(王毅勇等 2003, 2005; 宋长春等 2004)、生源要素滞留(吕宪国等,1995; 吕宪国和刘晓辉,2008)、沼泽湿地垦殖与退耕还湿过程中土壤碳组分变化研究等(张文菊等 2003; 宋长春等 2004)以及对全球变化的响应等(Cao & Fox 2009; Cyranoski 2009; Pan & Wang 2009);对于应用碳同位素对环境变化、土壤碳循环等方面也开展了一些工作(陶贞等 2004; 于贵瑞等 2005),然而相比于国外而言,以湿地碳循环及温室气体源汇效应为基本目标的同位素地球化学的研究相对较少。

随着碳同位素研究技术手段的提高,开发和研究新的生物标记物已经成为可能。生物标记法是根据生物体死亡后分子标志物经过一系列作用最终生成稳定的有机化合物,它与对应的生物源前身有一定的结构联系或相关性,从而具有指示环境与物源的作用,最常用的标志物有正构烷烃、脂类分子和多环芳烃等。多种示踪方法相结合的技术手段,将是稳定同位素方法发展的一个重要方向(陈敬安等, 2002; 张龙军等,2005; 李由明等,2007; 王立群等, 2007)。

另外,由于全球碳循环研究强调陆地生态系统短时间尺度的有机碳循环,因此忽略了对湿地无机碳的研究。碳酸盐的碳同位素不但可以定量区分土壤无机碳的来源和组成,还可以用来评价土地管理措施对土壤碳酸盐动态的影响(Jay *et al.*, 2007; 韦莉莉等 2008; 许文强等 2011)。因此,对湿地无机碳的研究将是今后湿地碳循环研究的重要前沿问题之一,值得进一步深入探讨(陈根等 2010; 张广斌等 2011)。

我国湿地面积分布广,位居世界第四,然而湿地的破坏也相当严重,因此研究湿地系统的固碳能力及碳循环过程对保护湿地生态环境及履行国际公约将起到极其重要的作用。本文针对湿地碳循环研究的传统方法和碳同位素方法进行了对比分析,系统讨论了碳同位素方法的基本原理,以及同位素方法

和传统研究方法联合使用在碳循环研究中的优势,并从生物过程、水体、沉积物和土壤以及温室气体排放等具体方面进行了实例应用探讨,归纳总结了目前国内碳同位素技术在研究湿地碳循环过程中的不足之处及未来发展方向。加强对湿地碳储库的研究,提出有针对性的管理手段和措施,对增加湿地碳汇、减缓气候变化有着全球性的重要意义。

#### 参考文献

- 蔡德陵,张淑芳,张经. 2002. 稳定碳、氮同位素在生态系统研究中的应用. 青岛海洋大学学报, 32(2): 287 - 295.
- 蔡德陵,张淑芳,张经. 2003. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用. 质谱学报, 24(3): 434 - 440.
- 陈根,朱正杰,周兵. 2010. 湖泊沉积物碳酸盐碳、氧同位素研究进展. 四川地质学报, 30(1): 74 - 77.
- 陈敬安,万国江,汪福顺,等. 2002. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. 中国科学(D辑), 32(1): 73 - 80.
- 陈庆强,周菊珍,孟翎,等. 2007. 长江口盐沼滩面演化的有机碳累积效应. 自然科学进展, 17(5): 614 - 623.
- 陈毅凤,张军,万国江. 2001. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式. 湖泊科学, 13(1): 15 - 20.
- 迟传德,许信旺,吴新民,等. 2006. 安徽省升金湖湿地土壤有机碳储存及分布. 地球与环境, 34(3): 59 - 64.
- 迟传德. 2006. 安徽省升金湖湿地土壤碳、磷的分布研究(硕士学位论文). 南京: 南京农业大学.
- 丁喜桂,叶思源,王吉松. 2011. 黄河三角洲湿地土壤、植物碳氮稳定同位素的组成特征. 海洋地质前沿, 27(2): 66 - 71.
- 丁仲礼,傅伯杰,韩兴国,等. 2009. 中国科学院“应对气候变化国际谈判的关键科学问题”项目群简介. 中国科学院院刊, 24(1): 8 - 17.
- 段晓男,王效科,尹弢,等. 2006. 湿地生态系统固碳潜力研究进展. 生态环境, 15(5): 1091 - 1095.
- 葛晨东,王颖, Pedersen TF, 等. 2007. 海南岛万泉河口沉积物有机碳、氮同位素的特征及其环境意义. 第四纪研究, 27(5): 845 - 852.
- 何书林,吕光辉,杨晓东,等. 2010. 运用  $\delta^{13}\text{C}$  值对艾比湖湿地自然保护区主要植被的科属性质研究. 新疆农业科学, 47(7): 1421 - 1426.
- 黄国宏,肖笃宁,李玉祥,等. 2001. 芦苇湿地温室气体甲烷( $\text{CH}_4$ )排放研究. 生态学报, 21(9): 1494 - 1497.
- 焦树林,高全洲,刘昆. 2008. 珠江流域西江、北江河流溶解无机碳及其稳定同位素组成特征. 中山大学学报(自然科学版), 48(2): 99 - 105.
- 黎明,李伟. 2009. 湿地碳循环研究进展. 华中农业大学学报, 28(1): 116 - 123.
- 李干蓉,刘丛强,陈椽,等. 2009. 猫跳河流域梯级水库夏-秋季季节溶解无机碳(DIC)含量及其同位素组成的分布特征. 环境科学, 30(10): 2891 - 2897.
- 李慧垠,王广,季宏兵,等. 2011. 北京水源地水体中颗粒有机质的碳、氮同位素研究. 环境科学学报, 31(12): 2663 - 2671.
- 李思亮,刘丛强,陶发祥,等. 2004. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用. 地球化学, 33(2): 165 - 170.
- 李甜甜,季宏兵,江用彬,等. 2007. 赣江上游河流水化学的影响因素及DIC来源. 地理学报, 62(7): 764 - 775.
- 李由明,黄翔鹤,刘楚吾. 2007. 碳氮稳定同位素技术在动物食性分析中的应用. 广东海洋大学学报, 27(4): 99 - 103.
- 林清,王绍令. 2001. 沉水植物稳定碳同位素组成及影响因素分析. 生态学报, 21(5): 806 - 809.
- 刘丛强. 2007. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环. 北京: 科学出版社.
- 刘海燕,李吉跃. 2007. 稳定性碳同位素在揭示环境变化中的应用. 中国农学通报, 23(6): 217 - 221.
- 刘景双,王金达,李仲根,等. 2003. 三江平原沼泽湿地  $\text{N}_2\text{O}$  浓度与排放特征的初步研究. 环境科学, 24(1): 33 - 39.
- 吕宪国,何岩,杨青. 1995. 湿地碳循环及其在全球变化中的意义//陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社: 68 - 72.
- 吕宪国,刘晓辉. 2008. 中国湿地研究进展——献给中国科学院东北地理与农业生态研究所建所50周年. 地理科学, 28(3): 301 - 308.
- 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 2005. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系. 应用生态学报, 16(10): 1872 - 1878.
- 朴世龙,方精云,黄耀. 2010. 中国陆地生态系统碳收支. 中国基础科学, (2): 20 - 23.
- 全为民. 2007. 长江口盐沼湿地食物网的初步研究: 稳定同位素分析. 上海: 复旦大学.
- 沈吉,王苏民,羊向东. 1996. 湖泊沉积物中有机碳稳定同位素测定及其古气候环境意义. 海洋与湖泊, 27(4): 400 - 404.
- 宋长春,王毅勇,闫百兴,等. 2004. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态. 环境科学, 25(3): 168 - 172.
- 陶贞,沈承德,易惟熙,等. 2004. 土壤碳动力学同位素研究进展. 地球科学进展, (5): 793 - 801.
- 万祎,胡建英,安立会,等. 2005. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次. 科学通报, 50(7): 708 - 712.
- 王俊峰. 2008. 长江源区沼泽与高寒草甸生态系统变化及其碳平衡对全球气候变化的响应(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 王立群,戴雪荣,华璐,等. 2007. 安徽龙河口水库沉积物碳、氮、磷地球化学记录及其环境意义. 海洋湖沼通报, (4): 59 - 64.
- 王毅勇,宋长春,闫百兴,等. 2003. 三江平原不同土地利用方式下湿地土壤  $\text{CO}_2$  通量研究. 湿地科学, 1(2): 111 - 114.
- 王毅勇,赵志春,宋长春. 2005. 三江平原毛果苔草湿地

- CH<sub>4</sub> 排放研究. 湿地科学, **3**(1): 37-41.
- 韦莉莉, 严重玲, 叶彬彬, 等. 2008. C3 植物稳定碳同位素组成与盐分的关系. 生态学报, **28**(3): 1270-1278.
- 韦莉莉, 张小全, 侯振宏, 等. 2005. 全球气候变化研究的新技术——稳定碳同位素分析的应用. 世界林业研究, **18**(2): 16-19.
- 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 等. 2003. 珠江水体悬浮物颗粒有机碳稳定同位素组成及分布特征. 地理科学, **23**(4): 471-476.
- 魏秀国, 卓慕宁, 郭治兴, 等. 2010. 东江流域土壤、植被和悬浮物的碳、氮同位素组成. 生态环境学报, **19**(5): 1186-1190.
- 吴莹, 张经, 张再峰, 等. 2002. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布. 海洋与湖沼, **33**(5): 546-552.
- 吴春勇, 苏小四, 郭金森, 等. 2011. 鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水水化学演化的多元统计分析. 世界地质, **30**(2): 244-253.
- 吴敬禄, 林琳, 刘建军, 等. 2005. 太湖沉积物碳氮同位素组成特征与环境意义. 海洋地质与第四纪地质, **25**(2): 25-30.
- 肖胜生, 叶功富, 董云社. 2009. 木麻黄沿海防护林土壤呼吸动态及其关键因子. 中国环境科学, **29**(5): 531-537.
- 谢远云, 何葵, 康春国, 等. 2004. 湖泊沉积物有机质碳同位素的气候意义: 以江汉平原江陵剖面为例. 哈尔滨师范大学学报(自然科学版), **20**(5): 96-99.
- 徐玉慧, 姜霞, 金相灿, 等. 2006. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化. 环境科学, **27**(5): 869-873.
- 许斐, 杨守业, 展望, 等. 2011. 三峡水库建设对长江下游颗粒有机碳通量及碳同位素组成的影响. 地球化学, **40**(2): 199-208.
- 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 2011. 土壤碳循环研究进展及干旱区土壤碳循环研究进展. 干旱区地理, **34**(4): 614-620.
- 闫慧, 李中轩, 陈杰. 2011. 花溪河水溶解无机碳同位素的季节变化. 地球与环境, **39**(3): 300-304.
- 殷树鹏, 张成君, 郭方琴, 等. 2008. 植物碳同位素组成的环境影响因素及在水分利用效率中的应用. 同位素, **21**(1): 46-53.
- 于贵瑞, 王绍强, 陈泮勤, 等. 2005. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用. 地球科学进展, **20**(5): 568-577.
- 于洪贤, 黄璞祯. 2008. 湿地碳汇功能探讨: 以泥炭地和芦苇湿地为例. 生态环境, **17**(5): 2103-2106.
- 余婕, 刘敏, 许世远, 等. 2008. 长江口潮滩有机质稳定碳同位素时空分布与来源分析. 地理研究, **27**(4): 847-854.
- 曾承. 2010. 湖泊自生碳酸盐碳同位素在环境变化中的应用. 盐湖研究, **18**(2): 1-6.
- 曾芳, 毛治超. 2010. 稳定碳同位素分析技术及其在地球化学中的应用. 石油天然气学报, **32**(2): 228-231.
- 曾庆飞, 孔繁翔, 张恩楼, 等. 2008. 稳定同位素技术应用
- 于水域食物网的方法学研究进展. 湖泊科学, **20**(1): 13-20.
- 张林, 孙向阳, 高程达, 等. 2010. 稳定同位素比例质谱仪在土壤碳循环研究中的应用. 分析仪器, (1): 18-23.
- 张远, 张彦, 于涛. 2011. 太湖典型湖泊沉积物外源有机质贡献率研究. 环境科学研究, **24**(3): 251-258.
- 张广斌, 马静, 徐华, 等. 2011. 稻田甲烷产生途径研究进展. 土壤, **43**(1): 6-11.
- 张龙军, 宫萍, 张向上. 2005. 河口有机碳研究综述. 中国海洋大学学报(自然科学版), (5): 737-744.
- 张文菊, 童成立, 赵世伟, 等. 2003. 湿地碳循环过程与计算机模拟研究. 西北植物学报, **23**(6): 1049-1055.
- 张月鲜, 李素艳, 孙向阳, 等. 2011. 荒漠草原土壤有机质碳稳定同位素特征研究. 水土保持学报, **25**(3): 164-168.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社.
- 周志华, 李军, 朱兆洲. 2007. 龙感湖沉积物碳、氮同位素记录的环境演化. 生态学杂志, **26**(5): 693-699.
- 朱书法. 2006. 贵州典型陆地生态系统土壤有机碳含量及碳同位素组成(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 朱正杰, 陈敬安, 李航, 等. 2011. 贵州草海沉积物碳酸盐碳同位素异常正值的发现及其环境指示意义. 湖泊科学, **23**(5): 681-685.
- Barth JAC, Veizer J, Bernhard M. 1998. Origin of particulate organic carbon in the upper St. Lawrence: Isotope constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, **162**: 111-121.
- Benner R, Bodungen B, Farrington J, et al. 1993. Measurement of dissolved organic carbon and nitrogen in natural waters: Workshop report. *Marine Chemistry*, **41**: 5-10.
- Cai DL, Tan FC, Edmond JM. 1988. Sources and transport of particulate organic carbon in the Amazon River and Estuary. *Estuarine Coastal Shelf Science*, **26**: 1-14.
- Cao L, Fox AD. 2009. Birds and people both depend on China's wetlands. *Nature*, **460**: 173.
- Chanton JP, Arkebauer TJ, Harden HS, et al. 2002. Diel variation in lacunal CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> concentration and δ<sup>13</sup>C in *Phragmites australis*. *Biogeochemistry*, **59**: 287-301.
- Chasar LS, Chanton JP, Glaser PH, et al. 2000. Methane concentration and stable isotope distribution as evidence of rhizospheric processes: Comparison of a fen and bog in the glacial Lake Agassiz peatland complex. *Annals of Botany*, **86**: 655-663.
- Cifuentes LA, Sharp JH, Marilyn LF. 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware Estuary. *Limnology and Oceanography*, **33**: 1102-1115.
- Clark ID, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: Lewis Publishers.
- Cyranoski D. 2009. Putting China's wetlands on the map. *Nature*, **458**: 134.
- Doane TA, Devereux OC, Horwath WR. 2003. Short-term soil

- carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems. *Geoderma*, **114**: 319–331.
- Ellerbrock RH, Kaiser M. 2005. Stability and composition of different soluble soil organic matter fractions evidence from  $\delta^{13}\text{C}$  and FTIR signatures. *Geoderma*, **128**: 28–37.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT. 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **40**: 503–537.
- Goering J, Alexander V, Haubensack N. 1990. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **30**: 239–260.
- Hayes ML, Pennings NJ, Serrianni AS, et al. 1982. Epimerization of aldoses by molybdate involving a novel rearrangement of the carbon skeleton. *Journal of the American Chemical Society*, **104**: 6764–6769.
- Hoefs J. 2004. Stable Isotope Geochemistry. Berlin: Springer Verlag.
- Jay Q, Jason A, Claudio L, et al. 2007. Soils at the hyperarid margin: The isotopic composition of soil carbonate from the Atacama Desert, Northern Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**: 3772–3795.
- Keeley JE, Sandquist DR. 1992. Carbon: freshwater plants. *Plant, Cell & Environment*, **15**: 1021–1035.
- Kruger M, Eller G, Conrad R, et al. 2002. Seasonal variation in pathways of  $\text{CH}_4$  production and in  $\text{CH}_4$  oxidation in rice fields determined by stable carbon isotopes and specific inhibitors. *Global Change Biology*, **8**: 265–280.
- Montoya JP, Wiebe PH, McCarthy JJ. 1992. Natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in particulate nitrogen and zooplankton in the Gulf Stream region and warm-core ring 86A. *Deep Sea Research (Part A)*, **39**: 363–392.
- Nier AO. 1950. A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon, and potassium. *Physical Review*, **77**: 789–793.
- Pan X, Wang B. 2009. Time for China to restore its natural wetlands. *Nature*, **459**: 321.
- Sachs JP, Repeta DJ, Goericke R. 1999. Nitrogen and carbon isotopic ratios of chlorophyll from marine phytoplankton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**: 1431–1441.
- Smith BN, Epstein S. 1971. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio for higher plants. *Plant Physiology*, **47**: 380–410.
- Spaccini R, Mbagwu JSC, Conte P, et al. 2006. Change of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia. *Geoderma*, **132**: 9–19.
- Sugimoto A, Wada E. 1993. Carbon isotopic composition of bacterial methane in a soil incubation experiment: Contributions of acetate and  $\text{CO}_2/\text{H}_2$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**: 4015–4027.
- Tyler SC, Bilek RS, Sass RL, et al. 1997. Methane oxidation— and pathways of production in a Texas paddy field deduced from measurements of flux,  $\delta^{13}\text{C}$ , and  $\delta\text{D}$  of  $\text{CH}_4$ . *Global Biogeochemical Cycles*, **11**: 323–348.
- Zhang J, Quay PD, Wilbur DO. 1995. Carbon isotope fractionation during gas–water exchanges and dissolution of  $\text{CO}_2$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**: 107–114.
- 
- 作者简介 陈玲,女,1986年生,硕士研究生。主要从事环境地球化学研究。E-mail: yjamwawj@126.com
- 责任编辑 魏中青
-