

# 地表流域有机碳地球化学研究进展

周 苗<sup>1</sup> 李思亮<sup>1\*</sup> 丁 虎<sup>2</sup> 覃蔡清<sup>1</sup> 岳甫均<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072; <sup>2</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)

**摘 要** 地球关键带的各个界面是有机碳发生剧烈分解转化的场所, 探讨关键带有机碳的动态变化、归趋及其控制过程, 是揭示地表流域中物质运输和能量传递规律的重要基础, 对维持生态系统平衡具有重要意义。本文介绍了国内外关于流域不同关键带有机碳的研究方法、来源、储量及其动态、周转过程等地球化学特征的研究进展, 以及现有研究存在的问题。建议将典型关键带作为一个整体来研究, 综合使用多种技术方法, 将短期高频次观测和长期定位观测研究相结合, 在典型小流域开展多界面、多过程、多时间尺度的长期同步观测和系统研究, 揭示控制关键带有机碳地球化学循环的关键因子及其作用机制。同时重视长时间尺度下有机碳循环对全球变化和人类活动的响应及反馈机制; 分析不同人为活动下, 大气-植物-凋落物-土壤-河流之间的碳交换特征及流域有机碳动态变化规律; 定量区分环境变化和人类活动对关键带有机碳地球化学行为的影响, 为碳循环模型优化及气候变化预测提供科学依据。

**关键词** 流域; 有机碳循环; 关键带; 碳周转; 碳水耦合

**Advances in study on organic carbon characteristics in the riverine systems.** ZHOU Miao<sup>1</sup>, LI Si-liang<sup>1\*</sup>, DING Hu<sup>2</sup>, QIN Cai-qing<sup>1</sup>, YUE Fu-jun<sup>2</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; <sup>2</sup>*State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*).

**Abstract:** The interfaces of the Earth's critical zones are the place where organic carbon is dramatically decomposed and transformed. The dynamics and fate of organic carbon serve as an important foundation of revealing the material transportation and energy transfer in the critical zones, which is of great significance to support the ecological system. The geochemical characteristics of organic carbon in riverine system is reviewed in this study, including the research methods, sources, storage, dynamics and turnover process of organic carbon. It is suggested that the the dynamics of organic carbon in the critical zones should be studied well for understanding carbon cycling in the riverine systems. Various technical methods, short-term high-frequency observation, long-term observation research in the multi-interface with multi-time scales should be conducted in typical critical zones, in order to reveal the key factors and its mechanisms of organic carbon dynamics and processes in the riverine systems. Furthermore, the response and feedback mechanism of organic carbon cycle to global change and human activities on long-time scales should be studied. Besides, the carbon exchange between interfaces of atmosphere-plant-litter-soil-river and the dynamics of organic carbon in watersheds should be further analyzed under different disturbance intensities of human activities. Understanding the impacts of environmental changes and human activities on the geochemical cycling of organic carbon in critical zones would benefit the optimization of carbon cycling model and climate change predictions.

**Key words:** watershed; organic carbon cycle; critical zone; carbon turnover; coupling water-carbon cycle.

国家自然科学基金项目(41571130072)和国家重点研发计划项目(2016YFA0601000)资助。

收稿日期: 2017-04-25 接受日期: 2017-07-28

\* 通讯作者 E-mail: siliang.li@tju.edu.cn

近地表区域岩石-土壤-生物-水-大气相互作用带被称为地球关键带,它决定着生命生长所需的物质和能量供应,是维系人类社会可持续发展的关键因素(Richter *et al.* 2015)。地表流域的各个界面是有机碳发生剧烈分解转化的活跃场所,有机碳的来源、迁移和转化等地球化学特征是地表流域生物地球化学循环的重要研究内容。有机碳是维持生态系统正常运转的关键物质,是异养型微生物重要的能量和营养来源,也是环境污染物的重要络合剂或吸附剂(Schlesinger *et al.* 2000)。它在地表环境介质(大气、土壤、岩石、水体和沉积物)中普遍存在,在生态系统的各种物理、化学和生物过程中都起着十分重要的作用。因此,探讨阐明地球关键带有机碳的来源、迁移及其转化等地球化学特征对于研究全球气候变化及区域生态系统安全,维持人类社会可持续发展等具有重要的意义(吴丰昌等 2008)。

地球关键带中的有机碳主要分布在大气、植被、凋落物、土壤和水体(沉积物)中,其产生和降解速率,在各库间的迁移特征和通量是多种物理、化学和生物过程综合作用的产物。自然条件下关键带有机碳的迁移和循环过程如图 1 所示(Houghton, 2003; Roulet *et al.* 2006; 刘丛强 2009)。植物通过光合作

用吸收固定大气  $\text{CO}_2$  合成为自身有机碳,其中一部分有机碳离开植物体,进入凋落物库中,植物凋落物一部分被微生物分解(Austin *et al.* 2010),未分解的部分植物凋落物与动物(残体及排泄物)和微生物(残体和分解、合成产物)成为自然条件下土壤有机碳的主要来源,而在侵蚀作用、淋溶作用等影响下土壤中的部分有机碳可转移到水体,为水生生态系统提供营养物质和能量。这些陆源有机碳在被河流输送到海洋的过程中,可能会被微生物分解或者沉降到底层水体沉积物中(刘丛强 2007),而沉积物中有机碳也可能再悬浮后随水体迁移(朱广伟等, 2001)。各库中的有机碳在迁移过程中发生降解(呼吸作用、有机碳矿化作用等),部分降解产物以  $\text{CO}_2$  或  $\text{CH}_4$  形式返回到大气,构成自然界碳循环的另一环节。最近几十年以来,有机碳的研究方法、含量(储量)及动态、来源、周转过程及关键带有机碳循环对全球气候变化和人类活动的响应和反馈机制等方面取得了许多进展。本文分析了国内外地表流域不同关键带有机碳地球化学特征的研究进展,深入探讨了当前地表流域有机碳方面研究所存在的问题,并提出了值得深入研究的方向,为今后的研究方向提供参考。

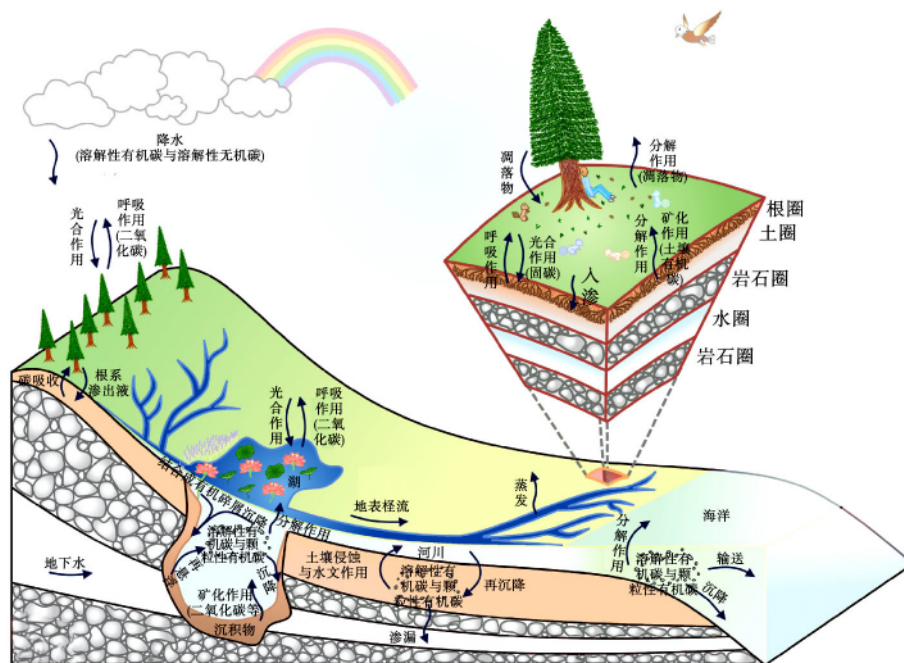


图 1 地球关键带有机碳迁移路径和循环过程示意图

Fig.1 Migration path and cycling process of organic carbon in the Earth's critical zone

Houghton, 2003; Roulet *et al.*, 2006; 刘丛强, 2009.

## 1 地表流域有机碳的形态、碳储量及动态

### 1.1 有机碳形态

碳的形态研究是碳循环研究的基础和前提,有机碳的形态分布对有机碳在关键带各个界面的迁移转化及归趋起关键作用。水体中有机碳根据孔径大小主要可分为两类,通常把水中能通过  $0.45\ \mu\text{m}$  滤膜的有机碳称为溶解态有机碳(DOC),被滤膜阻留的有机碳称为颗粒态有机碳(POC)(Mostofa *et al.*, 2009)。而土壤中的大部分有机碳是难以分解的稳定态化合物,只有少部分是活性有机碳组分(McLauchlan *et al.*, 2004)。颗粒态有机碳(POC)指粒径大于  $53\ \mu\text{m}$  的土壤有机碳,是土壤惰性碳库的一种,可以指示土壤总有机碳动态的早期变化(Chan, 1997)。其中以  $250\ \mu\text{m}$  颗粒粒径为界,POC可以进一步分为细颗粒有机碳(FPOC:  $53\sim 250\ \mu\text{m}$ )和粗颗粒有机碳(CPOC:  $250\sim 2000\ \mu\text{m}$ )(Fontaine *et al.*, 2007)。土壤和沉积物中活性碳组分常用可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、易氧化有机碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)、可矿化碳(MC)、轻组有机碳(LFOC)等来表征(沈宏等, 1999)。可溶解有机碳是用水或  $\text{K}_2\text{SO}_4$  等稀盐提取通过  $0.45\ \mu\text{m}$  微孔滤膜的土壤有机碳组分,是土壤有机碳中最活跃、易分解矿化、迁移转化的小分子有机化合物(王晶等, 2003)。易氧化性碳(EOC)是指土壤中容易受到植物、微生物的影响而发生氧化分解的土壤有机碳(沈宏等, 1999)。微生物生物量碳指的是土壤有机质中活的微生物总量,反映了土壤有机碳的降解能力(王晶等, 2003)。可矿化碳(MC)是指每单位微生物生物量分解有机物产生的  $\text{CO}_2$  量,代表了有机碳的已降解量(黄宗胜等, 2012)。可以反应土壤有机质的生物有效性、土壤的微生物活性、以及预测土壤有机质含量变化的趋势。轻组有机碳(LFOC)是土壤有机碳中土粒密度小于  $2.0\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  组分,可以指示土壤肥力的变化(王晶等, 2003)。

而且,各个关键区域中不同形态有机碳在一定程度上相互影响、相互制约、相互转换。水生系统中特别是流域水体碳的赋存形态的变化规律和迁移转化研究一直是人们研究的重点(鲍红艳, 2013; 陈鑫, 2014)。近年来国内外对土壤和湖泊沉积物中的活性有机碳也进行了广泛的研究,如植被、水热条件(温度和降雨等气候因素)、土地利用和耕种方式

等对土壤中团聚物、活性有机碳含量及其形态分布特征的影响等。由于土壤活性有机碳的结构和化学成分比较复杂,同时不同区域的土壤类型、结构、性质的地带性差异,因此对活性有机碳的各个指标之间的相关性及其控制机制还缺乏系统认识(刘丛强, 2009; 丁永建等, 2013)。

### 1.2 碳储量及动态变化

**1.2.1 有机碳储量** 关键带中的有机碳主要分布在大气、植被、凋落物、土壤和水体(沉积物)这些环境介质中(Janzen, 2004)。其中,大气碳库中绝大部分都是无机碳(Houghton, 2007),而在陆地生态系统中,土壤碳库储量最为丰富,因而国内外对土壤碳库量进行了广泛研究(Scharlemann *et al.*, 2014)。据估计,全球土壤有机碳库量约为  $1400\sim 1500\ \text{Pg}$ (Hiederer *et al.*, 2011; Scharlemann *et al.*, 2014),是大气碳库( $780\ \text{Pg}$ )的 2 倍,是陆地植被碳库( $550\pm 100\ \text{Pg}$ )的 2~3 倍,是凋落物碳库( $300\ \text{Pg}$ )的 4~5 倍(Houghton, 2007; 刘留辉等, 2009)。不同学者提出的大气碳库、陆地植被碳库、海洋碳库等的估算值都很接近,但是,土壤有机碳的估算结果存在较大的差异,这主要是由于不同学者所采用的资料数据、研究方法、采样方法不同以及土壤空间分布变异性较大所导致(刘留辉等, 2009; 丁永建等, 2013)。因此,借助地面观测以及遥感、地理信息技术获取流域陆地生态系统相关信息,完善土壤、植被、气候气象相关数据库,建立统一的观测统计方法和实验方法来研究土壤有机碳储量和动态变化是未来一个重要的研究方向(裴会敏等, 2012)。而水体系统是陆地表层系统的重要组成部分,全球每年大约有  $0.051\ \text{Pg}\ \text{C}$  有机碳滞留在湖泊中(Downing *et al.*, 1993)。水体系统不仅与大气和陆地生态系统有着强烈的碳交换,而且其内部也存在着活跃的碳产生、分解和沉积。而目前湖泊沉积物的碳储量、固碳潜力以及气候变化和人为活动对湖泊碳通量的影响程度、影响机制等是全球碳循环研究的薄弱环节(王跃思等, 2008)。

**1.2.2 有机碳动态变化的研究进展** 有机碳在关键带各个介质(大气、植物、土壤和水体)中发生着剧烈分解转化和跨介质迁移(吴丰昌等, 2008),因而关键带各介质中有机碳储量、组成上表现出明显的时间和空间差异性。近年来,全球气候变化加剧和人为活动强度增强极大地改变了关键带各个介质中的有机碳储量和迁移转化等行为。而土壤和水是

地球关键带的核心组成部分,其有机碳的储量十分丰富而且分解转化过程复杂,认识土壤和水体碳动态特征是理解关键带有机碳迁移转化的关键,因此学者们主要集中在对土壤和水体中有机碳动态变化过程的研究。

土壤碳库是陆地生态系统最大的有机碳库,其碳动态决定了地球关键带有机碳的动态,在全球碳循环中起着关键作用。近年来,研究人员在陆地生态系统碳收支模型(Houghton 2007)、土壤有机碳动态影响因素的作用过程机制(包括侵蚀条件下土壤有机碳流失研究、有机碳的去向、土壤碳淋溶过程、人类活动如土地利用变化和土地管理措施对生态系统碳循环的影响以及其对全球气候变化的响应特征)(Dawson *et al.* 2007; Andrews *et al.* 2011; Regnier *et al.* 2014; Scharlemann *et al.* 2014)等方面开展了大量室内外研究,并取得了一些进展。但是各个影响因素之间的耦合作用十分复杂,而且我国一些长期定位试验站的数据积累不足,实测研究范围有限,在流域内缺乏对土壤有机碳动态变化的长期定位研究,因此目前对于地球关键带土壤有机碳动态的关键驱动因子、各种因素的作用机制尚不十分清楚。

水是关键带物质流动、能量循环与信息交换的主要载体(Feng *et al.* 2008; 李小雁 2011),水生系统的碳循环过程,特别是河流碳输出特征、内陆水体中碳的沉积和释放是目前关键带水体有机碳动态研究的重点。据估算,河流输入海洋的有机碳为  $0.46 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,DOC 和 POC 分别为  $0.26$  和  $0.20 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,是海洋碳库的一个重要的碳来源(Blair *et al.* 2012),而且在运输过程中内陆水体中的碳沉积和释放是不可忽视的(Battin *et al.* 2009)。此外,近年来的研究表明,河流和湖泊水体 DOC 有逐渐增加的趋势,这可能与气候变化、酸沉降降低(Monteith *et al.* 2007)、氮沉降增加(Findlay 2005)、农业活动(如土地利用方式的改变)(Garnett *et al.* 2000)、降雨量和径流量模式改变,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高有关(Evans *et al.* 2006),也可能是这几种因素综合影响的结果,但是目前还不清楚影响水体 DOC 这种大区域范围内增高的控制机制。

近年来,有机碳动态的研究方法也逐渐完善。国内外对土壤有机碳动态的研究方法主要包括普通法、非示踪方法、示踪方法(包括放射性同位素示踪法、稳定性同位素示踪法)、计算机模拟法、植物标志物、红外光谱法、核磁共振、电子自旋共振、质谱以

及气相色谱等(Bayer *et al.* 2000)。而且,随着科学的进步,各种新的研究思维和技术手段也逐渐被应用于有机碳动态的研究中,使人们能够更加精确评估重要界面碳交换通量,更系统揭示有机质的地球化学循环特征以及关键碳过程的控制机制。比如结合野外原位观测与室内实验研究碳动态(丁永建等 2013; 丁虎等 2015)、将长期定位实验观测和数值模型结合预测有机碳动态变化趋势(韩东亮等, 2014)等; $^{13}\text{C}$ -NMR 和 Py-FIMS 以及 FTIR 可以对土壤原样进行有机质化学组分进行测定,无需经过复杂的、富有争议的化学提取过程,所获取的信息可能更能代表土壤的真实水平(Kalbitz *et al.* 2003)。

**1.2.3 有机碳动态特征及其影响因素** 在自然和人文双重作用下,各个介质中有机碳分布存在明显的时间和空间差异性。近年来,学者们对湖泊水体、湖泊沉积物、土壤等中有机碳时空分布特征及其影响因素进行了广泛研究,并取得了一些进展(Kim *et al.* 2000; 黎文等 2006)。研究显示,气候、植被、土壤质地、海拔、土壤 pH、土壤微生物、土地利用方式等都会影响土壤有机碳分布(张珍明等 2017)。人为干扰(土地管理类型、周边大量的生产生活污水、工业废水的排入)(Sugiyama *et al.* 2004)、自然过程(全球变暖、降雨、洪水和干旱)、环境因素(温度)、土壤类型、水文特征、光合作用强度、生物活动如藻类活动、微生物降解过程、光降解的过程、金属离子络合和盐度都可能影响水体的 DOC 浓度(吴丰昌等 2008; Mostofa *et al.* 2009)。而沉积物的氧化还原条件、微生物活动、氧化物浓度、pH 等是影响沉积物有机碳分布的主要因素(朱广伟等 2001)。

此外,各个因素之间的作用强度存在叠加或抵消效应,导致有机碳的分布还具有明显的区域性特征,因此学者们对不同地区有机碳动态特征的研究结果可能不一致。如许多研究发现,湖泊表水层有机碳浓度比下层滞水层高,特别在夏季分层期(Sugiyama *et al.* 2004; 黎文等 2006; Mostofa *et al.* 2009),但是有些研究却显示,DOC 浓度在夏季中下层水体出现增大的现象(Kim *et al.* 2000; 黎文等 2006)。Li 等(2010)对后寨流域水体的各个重要观测点的研究发现,随着流量的增加,不同地区(裸岩、旱田、灌木、水稻田、水库旁边)地表水和地下水 DOC 含量变化趋势不同,而且变化程度也不同。这些现象反映了降雨对流域地表水和地下水中 DOC 的影响程度与流域地形地貌因子、水文条件、土壤特

性、植被群落类型和人为因素(土地利用类型、建筑水库)等相关(丁虎等,2011),流域水体 DOC 含量受到多重因素的综合影响,不同地区不同因素的影响程度不同,因此需要在关键带流域更系统地研究气候因子、生态因子、地貌因子(植被类型)、土地利用、降雨事件等相互耦合对关键带有机碳动态过程的影响机制,阐述了大气-水文-土壤-植被-河流之间的相互作用机制(刘丛强等,2009),这对揭示流域有机碳动态变化及地球化学循环规律具有重要作用。

### 1.3 碳通量

关键带各重要界面间都发生着强烈的碳交换,了解各重要界面间碳通量特征是揭示关键带碳迁移转化规律的基础和全球碳循环研究的重要环节,对阐明关键带物质循环、能量流动和信息传递规律具有十分重要的意义。

作为关键带的重要组成部分,陆地生态系统最具多样性,而且受人类活动影响最大,其碳循环过程最为复杂。国内外学者对典型陆地生态系统的初级生产力、生物量及其对人类活动和全球气候变化的响应机制进行了大量的观测研究来了解陆地生态系统碳收支特征,也取得了较多成果。研究表明,陆地生态系统每年净吸收约 2.6 Pg C 的  $\text{CO}_2$ (Raymond *et al.*, 2013)。已有学者利用森林清查资料估算了一些地区陆地生态系统的碳汇值,如 1990—2007 年全球森林碳汇为每年  $2.4 \pm 0.4$  Pg C (Houghton *et al.*, 2007),美国大陆每年的碳汇速率是 0.2~1.3 Pg C (Pacala *et al.*, 2001),欧洲每年是 0.2~0.4 Pg C (Schulze *et al.*, 2000)。草地生态系统碳循环的研究多集中于土壤呼吸碳通量以及其对人为活动干扰和全球气候变化的响应(王跃思等,2008)。近年来,由于环境因素和人为活动如开垦湿地为农田等的共同影响,湿地的碳汇功能正在逐渐下降。其中北方高纬度湿地因其碳储量较高是目前的研究重点(王跃思等,2008)。但是,陆地生态系统碳循环的空间分布特征、碳源、碳汇强度的时间变化特征、环境变化和人为活动对碳收支影响机制以及在长时间尺度上碳循环的变化特征等仍需要进一步深入研究(王跃思等,2008)。

河流是连接陆地生态系统和海洋的纽带,全球每年大约有 0.46 Pg 有机碳从陆地生态系统通过河流输入海洋,和大气-海洋间的净碳交换量处于同一个数量级(Blair *et al.*, 2012)。学者们对各国河流有

机碳的输出通量及其性质也进行了广泛研究。目前,我国河流有机碳通量的研究较多集中在长江、黄河和珠江的输出特征,如研究表明,我国长江、黄河、珠江每年输出到海洋的溶解态有机碳分别为 1.8、0.06 和 0.38 Tg C (Ni *et al.*, 2008),但是对河流碳通量的变化趋势的长期观测研究较少,而且在运输过程部分有机碳会在内陆水体中发生降解、沉积等过程。据估算,全球大湖泊和小湖泊中碳的沉积速率大约分别为 5 和 72  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$  (Dean *et al.*, 1998),全球每年 0.051 Pg C 有机碳沉积存储在湖泊中(Downing *et al.*, 1993)。但是,目前国内外对内陆湖泊碳收支、变化趋势及其对人为活动的响应机制等方面的研究较为薄弱(王跃思等,2008)。此外,水体系统还与大气有着强烈的碳交换,全球河流每年大约会向大气释放 1.8 Pg C 的  $\text{CO}_2$  (Wehrli, 2013)。河流-大气碳交换量不仅存在明显的区域性差异,而且受全球气候变化和人类活动的影响,但是目前由于研究区域代表性不足、长期定位实测数据缺乏以及对人类活动的响应机制研究不足等导致全球水-气界面碳交换估算存在差异(丁虎等,2015)。

## 2 地表流域有机碳的来源

流域中有机碳输入主要包括自然和人为两种输入方式,前者包括大气沉降、植物光合作用吸收  $\text{CO}_2$  合成有机碳,富有机碳地质源(岩石等)输入、冰川融化(Hood *et al.*, 2009)、永冻层土壤解冻(Stubbins *et al.*, 2012)等;后者包括化石燃料燃烧、施肥、工业废水、生活污水的排放(Griffith *et al.*, 2009)等。然而,有机碳进入关键带不同介质后的地球化学行为并不是保守的,有机碳和无机碳的相互转换在碳的迁移过程中普遍存在,给特定介质中有机碳的来源辨识带来困难。陆地生态系统中碳的来源是关键带有机碳溯源研究中最重要内容,特别是内陆水体,作为地表土壤和植被碳循环信息的集成器,是关键带碳生物地球化学研究的重要工具(Dagg *et al.*, 2004),因此区分水体有机碳的来源尤为重要。水环境中有机碳的来源可分为内源和外源,前者与生物活动关系密切,主要由水体微生物、浮游植物或藻类分解产生;而后者是从外部输入的有机碳,包括大气降雨、土壤、植物碎屑、岩石源有机碳、生活污水、工业废水等。由于侵蚀和淋溶作用等过程大量外源有机碳的输入以及河水的水力停留时间比较短暂,大多数河流有机碳主要来源是外源,来源于流域水

土侵蚀过程,内源有机碳贡献较少(Tesi *et al.*, 2007)。而对于人为干扰较小的湖泊,有机碳主要是内源,与水体浮游植物等的初级生产力和分解率有关(Pedersen *et al.*, 2005)。

近年来,极端气候事件(台风、洪水等)的频繁发生和人为活动强度增强(如污水排放)使河流和湖泊中外源有机碳的贡献比例逐渐增加。但是,陆地水体中外源有机碳的贡献比例在全球范围内范围较大,水体中不同来源有机碳的贡献比例存在着明显的地区性及季节性差异。这种差异很大程度上取决于土壤侵蚀强度和水体中自源有机碳的贡献量的平衡(郭威等,2016)。这种显著差异是流域环境性质(包括河流流域大小、流域地形地貌、土壤背景、植物的初级生产力和分解率、降水强度、气候条件、径流量、水动力过程、水体状态等)、人类活动强度(筑坝、蓄水、废水排放等)不同所导致的。这些因素相互作用、相互耦合,单独分析某些影响因素可能不能解释部分研究结论存在的差异,应综合考虑多种因素如环境因素(流域气候)、生物因素(植被类型等)、人为因素(耕作方式、施肥等)对河流有机碳来源、组成的影响(吴健敏等,2013)。

研究方法上,水体有机碳来源识别方法主要包括:同位素法(Mollenhauer *et al.*, 2016)、荧光光谱法(黎文等,2012)、紫外光谱法(傅平青等,2005)、核磁共振谱(张月玲,2016)、碳氮(C/N)比值法以及生物标志法(木质素、糖类、氨基酸等)(张玉龙等,2014)。不同的方法具有不同的优点和局限,综合使用多种研究方法和多种指标可以提供有机碳结构、组成和来源等方面更多、更准确的信息,能更系统阐明有机碳的来源、组成以及降解程度、时空分布特征,量化不同来源有机碳的贡献。因此,综合运用多种方法是进行生态系统有机碳循环研究的一个重要趋势(黎文等,2012)。如将碳氮同位素组成、氨基酸和木质素组成结合(张玉龙等,2014),综合利用生物标志物丰度和同位素法(Mollenhauer *et al.*, 2016),利用 $^{14}\text{C}$ 与有机碳质量(荧光光谱),联合使用同步和三维荧光光谱(黎文等,2012),BIT(Branched and Isoprenoid Tetractter)指标与木质素相结合揭示陆源有机碳贡献(Smith *et al.*, 2010),将固体核磁共振技术与同位素示踪技术结合(张月玲,2016),将磷脂脂肪酸分析技术(PLFA)、末端限制片段长度多态性技术(T-RFLP)和实时定量PCR技术等微生物方法和稳定碳同位素技术和气体遥感技术

等地球化学方法相结合(Fromin *et al.*, 2010)等。

### 3 有机碳周转速率及控制因素

有机碳的周转时间是估算碳通量的重要参数,明确各个主要有机碳库的周转速率及控制因素,对阐明关键带的碳动态变化机制和揭示有机碳循环规律具有十分重要的意义(刘丛强,2009)。但是由于关键带中的各个环境介质具有不同的特性,有机碳在关键带不同重要介质中的迁移转化过程和周转速率受到不同具体因素的影响。植被有机碳的周转速率主要受植物的初级生产力和分解率的影响。凋落物的周转速率受环境因素(主要包括温度和湿度)(Wang *et al.*, 2003)和凋落物品质的共同影响(Rejmánková *et al.*, 2006)。而土壤有机碳的周转速率受生物因素(包括植被类型和微生物)、非生物因素(包括温度、水分、土壤理化性质、地形地貌特征、水文情势、酸沉降、氮沉降、 $\text{CO}_2$ 浓度及土壤冻融等)和人为因素(土地利用和土地管理方式)的共同影响。大气降水和降雨形成的地表径流会冲刷土壤,将大量土壤有机碳带入河流,但是河流搬运的碳在迁移过程中可能会发生选择性降解、沉积等生物化学和物理过程(Ittekkot, 1988),使得只有一少部分的陆源碳会进入海洋碳库(Hernes *et al.*, 2006)。内陆水体中有机碳的降解、沉积等过程与有机碳的运输速率和其与微生物的反应速率密切相关,主要受水体中微生物群落特性、水文、地貌特征的影响(Mostofa *et al.*, 2009),而氧化还原条件是制约水体中的有机碳在沉积物-水界面间迁移转化的重要因素,是控制沉积物有机碳矿化速率的主要因素(朱维晃等,2010)。

然而,各个碳库有机碳周转速率是密切相关的,如植被初级生产力强弱、凋落物产生与分解速率均直接影响土壤有机碳的含量及周转速率,进而影响内陆水体中碳的迁移转换(Galy *et al.*, 2015),从而影响陆源有机碳对海洋有机碳库的贡献率,而且还会影响在此过程中内陆水体中碳的沉积和释放。但是,目前以关键带作为整体进行的有机碳周转速率和控制因素方面的研究还比较缺乏,特别是控制因素究竟是什么作用起主导、有机碳运输的相关过程及其机制、量化自然过程、人为因素、地貌等在关键带有机碳循环整个过程中的相对贡献的认识比较缺乏,如对异质流域中水文、气候和地貌对河流碳运输期间的矿化、沉积等生物化学和物理过程的相对

贡献尚不清楚(Hoffmann *et al.*, 2016)。因此,在未来的研究中,需要对有机碳在各主要库的周转速率、平均停留时间、各库之间交换速率及其关键控制因素开展全面、系统的定量研究。

#### 4 展 望

有机碳是维持生态系统正常运转的关键物质。而传统研究将碳库分为植被碳库、土壤碳库、大气碳库、海洋碳库、化石燃料碳库(Janzen, 2004),不同学科分别研究地球表层的不同组分,研究对象较单一,缺乏多界面、多过程、多时间尺度的长期综合观测研究,因此对于侵蚀过程中土壤碳的“源汇”关系(裴会敏等, 2012)、土壤碳动态对全球气候变化的响应(Carvalhais *et al.*, 2014)、河流的碳年龄问题(Tittel *et al.*, 2013; Fellman *et al.*, 2014)、河口的碳源与碳汇的关系(Canuel *et al.*, 2016)、水体 DOC 逐渐增加的控制机制(Freeman *et al.*, 2004)等问题一直有待系统研究。而且过去对地球关键带重要界面有机碳迁移转化及其关键控制因子方面的研究较少,对有机碳来源辨识、各影响因素及影响的程度以及其关键控制机制(丁虎等, 2015)、水文、气候和地貌对河流碳输出特征、内陆水中碳的沉积和释放的相对贡献尚不清楚。今后的相关研究可着重在以下几个方面:

(1) 以关键带研究思维开展研究。最近几年的研究认为,关键带的各个有机质库之间并不是独立的,其动态变化与关键带岩石、土壤、生物、水、大气中涉及各个过程密不可分,陆地碳循环研究必须以“无界碳循环”(boundless carbon cycle)思维来开展研究(Battin *et al.*, 2009)。而我国目前对陆地生态系统小流域多界面有机碳循环的相关研究较少,对重要界面的某些关键机理与控制过程缺乏系统性的认识(刘丛强, 2009)。因此,今后应将各个典型子系统作为一个整体进行分析,关注有机碳关键带各圈层和各个重要界面的迁移转化规律(吴丰昌等, 2008),开展水土/沉积物-气-植被-岩石等多界面的同步观测和系统研究,揭示控制关键带有机碳动态变化的过程机制(Carvalhais *et al.*, 2014)。

(2) 关注有机碳与水文过程、养分循环、环境污染物的迁移等多过程的耦合关系。有机碳生物地球化学循环与水文过程、养分循环、各种污染物循环、微生物活动等密切相关(Carvalhais *et al.*, 2014)。但是由于这些过程相互影响相互制约,很难量化区

分这些过程对碳循环的贡献,所以对于其关键控制机制及其定量化贡献的认识不足;而且对于水文条件对陆地生态系统土壤-植被-大气之间碳循环的影响机制及定量化贡献方面的研究很少。因此,需要在我国典型流域深入研究在不同水文条件、气候、人为活动影响下,土壤侵蚀、河流碳通量、陆地生态系统有机碳的周转时间、平均停留时间、各库之间交换速率的变化特征及其机理,揭示有机碳与营养组分、环境污染物、水文过程的耦合关系及主要影响因子(吴丰昌等, 2008)。加强对人为来源有机碳的识别示踪和迁移的研究,定量化区分自然环境变化和人为活动对关键带有机碳迁移转化的影响,深入研究气候变化和人为干扰影响下,生物和非生物因素对碳周转、碳固定等过程的调控机制,特别是周期性干燥和湿润对水生生态系统中微生物的影响(Fromin *et al.*, 2010; Weise *et al.*, 2016)、微生物分解者对气候变化的响应,以及对碳转化过程的调控作用及其机制(尤业明, 2014)。

(3) 完善生态环境观测研究网络,综合使用多种方法开展高频次观测研究。DOC 浓度可能在短时间内变化显著,观测频率的不同可能会造成较大差异(Strohmeier *et al.*, 2013)。因此,应加强推进我国生态环境观测研究网络的发展和完善,综合利用多种在线观测仪器对短时间尺度有机碳的动态特征进行高频次长期定位观测(丁虎等, 2016),这样能更好地揭示关键带有机碳的动态变化规律(Billett *et al.*, 2015)。此外,近年来随着非线性科学的迅速发展,熵函数、逸度模型已经广泛应用于研究污染物在多介质环境中的归趋行为(Strohmeier *et al.*, 2013)。而地球关键带也是多介质环境,也是具有耗散结构和混沌现象的开放系统,有机碳在关键带迁移转化的过程中,会涉及有机碳通过各类物理、化学和生物过程进行跨环境介质界面的迁移(丁永建等, 2013)。因此,可以借鉴将熵函数应用于研究有机碳在关键带循环规律,这对于阐明关键带有机碳的循环规律具有十分重要的意义。

#### 参考文献

- 鲍红艳. 2013. 溶解态和颗粒态陆源有机质在典型河流和河口的来源、迁移和转化(博士学位论文). 上海: 华东师范大学.
- 陈 鑫. 2014. 长江口及其邻近海域碳的迁移特征(硕士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 丁 虎, 郎赞超, 刘丛强. 2016. 土壤碳淋溶流失研究进展.

- 地球与环境, **44**(1): 139-146.
- 丁虎, 刘丛强, 郎赞超, 等. 2011. 桂西北典型峰丛洼地降雨过程中地表水溶解性碳和  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{DIC})}$  变化特征. 地学前缘, **18**(6): 182-189.
- 丁虎, 刘丛强, 郎赞超, 等. 2015. 河流水-气界面碳交换研究进展及趋势. 上海大学学报: 自然科学版, **21**(3): 275-285.
- 丁永建, 周成虎. 2013. 地表过程研究概论. 北京: 科学出版社.
- 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强. 2005. 洱海沉积物间隙水中溶解有机质的地球化学特性. 水科学进展, **16**(3): 338-344.
- 郭威, 叶丰, 连忠廉, 等. 2016. 珠江口水体有机碳的季节性变化. 热带海洋学报, **35**(4): 40-50.
- 韩东亮, 贾宏涛, 朱新萍, 等. 2014. DNDC模型预测新疆灰漠土农田有机碳的动态变化. 资源科学, **36**(3): 577-583.
- 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红. 2012. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征. 应用生态学报, **23**(8): 2165-2170.
- 黎文, 吴丰昌, 傅平青, 等. 2006. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化. 环境科学, **27**(10): 1979-1985.
- 黎文, 吴丰昌, 王静, 等. 2012. 河流-湖泊系统中溶解有机质的示踪及迁移. 环境科学研究, **25**(2): 133-139.
- 李小雁. 2011. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, **41**(12): 1721-1730.
- 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.
- 刘丛强. 2009. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环. 北京: 科学出版社.
- 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 等. 2009. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. 地学前缘, **16**(6): 1-12.
- 刘留辉, 邢世和, 高承芳, 等. 2009. 国内外土壤碳储量研究进展和存在问题及展望. 土壤通报, **40**(3): 697-701.
- 裴会敏, 许明祥, 李强, 等. 2012. 侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展. 水土保持研究, **19**(6): 269-274.
- 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 1999. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, **18**(3): 33-39.
- 王晶, 解宏图, 朱平, 等. 2003. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述. 生态学杂志, **22**(6): 109-112.
- 王跃思, 王迎红. 2008. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测. 北京: 科学出版社.
- 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 2008. 天然有机质及其在地表环境中的重要性. 湖泊科学, **20**(1): 1-12.
- 吴健敏, 郗敏, 孔范龙. 2013. 土壤溶解性有机碳动态变化影响因素研究进展. 地质论评, **59**(5): 953-961.
- 尤业明. 2014. 宝天曼森林土壤碳转化的微生物调控机制(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.
- 张玉龙, 冉勇. 2014. 珠江中下游颗粒有机质的碳氮稳定同位素、氨基酸和木质素组成及其地球化学意义. 地球化学, **42**(2): 114-121.
- 张月玲. 2016. 黑土土壤剖面有机质周转及其控制机制的分子证据(博士学位论文). 北京: 中国农业大学.
- 张珍明, 周运超, 李会, 等. 2017. 喀斯特小流域土壤有机碳分布特征及其影响因素. 地球与环境, **45**(1): 38-45.
- 朱广伟, 陈英旭. 2001. 沉积物中有机质的环境行为研究进展. 湖泊科学, **13**(3): 272-279.
- 朱维晃, 黄廷林, 张亚宁. 2010. 氧化还原条件变化对上覆水体中溶解有机质的三维荧光光谱特征影响. 光谱学与光谱分析, **30**(12): 3272-3276.
- Andrews DM, Lin H, Zhu Q, et al. 2011. Hot spots and hot moments of dissolved organic carbon export and soil organic carbon storage in the shale hills catchment. *Vadose Zone Journal*, **10**: 943-954.
- Austin AT, Ballare CL. 2010. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**: 4618-4622.
- Battin TJ, Kaplan LA, Findlay S, et al. 2009. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature Geoscience*, **1**: 95-100.
- Battin TJ, Luysaert S, Kaplan LA, et al. 2009. The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, **2**: 598-600.
- Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, et al. 2000. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil and Tillage Research*, **53**: 95-104.
- Billett MF, Garnett MH, Dinsmore KJ. 2015. Should aquatic CO<sub>2</sub> evasion be included in contemporary carbon budgets for peatland ecosystems? *Ecosystems*, **18**: 471-480.
- Blair NE, Aller RC. 2012. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment. *Annual Review of Marine Science*, **4**: 401-423.
- Canuel EA, Hardison AK. 2016. Sources, ages, and alteration of organic matter in estuaries. *Annual Review of Marine Science*, **8**: 409-434.
- Carvalho N, Forkel M, Khomik M, et al. 2014. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, **514**: 213-217.
- Chan KY. 1997. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. *Soil Science Society of America Journal*, **61**: 1376-1382.
- Dagg M, Benner R, Lohrenz S, et al. 2004. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: Plume processes. *Continental Shelf Research*, **24**: 833-858.
- Dawson J, Smith P. 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of the Total Environment*, **382**: 165-190.
- Dean WE. 1998. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, **21**: 375-393.



- Downing JP , Meybeck M , Orr JC , *et al.* 1993. Land and Water Interface Zones. Berlin: Springer Netherlands.
- Evans CD , Chapman PJ , Clark JM , *et al.* 2006. Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. *Global Change Biology* , **12**: 2044–2053.
- Fellman JB , Spencer R , Raymond PA , *et al.* 2014. Dissolved organic carbon biolability decreases along with its modernization in fluvial networks in an ancient landscape. *Ecology* , **95**: 2622–2632.
- Feng X , Simpson AJ , Wilson KP , *et al.* 2008. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming. *Nature Geoscience* , **1**: 836–839.
- Findlay SE. 2005. Increased carbon transport in the Hudson River: Unexpected consequence of nitrogen deposition. *Frontiers in Ecology and the Environment* , **3**: 133–137.
- Fontaine S , Barot S , Barré P , *et al.* 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* , **450**: 277.
- Freeman C , Fenner N , Ostle NJ , *et al.* 2004. Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. *Nature* , **430**: 195–198.
- Fromin N , Pinay G , Montuelle B , *et al.* 2010. Impact of seasonal sediment desiccation and rewetting on microbial processes involved in greenhouse gas emissions. *Ecohydrology* , **3**: 339–348.
- Galy V , Peucker-Ehrenbrink B , Eglinton T. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature* , **521**: 204–207.
- Garnett MH , Ineson P , Stevenson AC. 2000. Effects of burning and grazing on carbon sequestration in a Pennine blanket bog , UK. *The Holocene* , **10**: 729–736.
- Griffith DR , Barnes RT , Raymond PA. 2009. Inputs of fossil carbon from wastewater treatment plants to US rivers and oceans. *Environmental Science and Technology* , **43**: 5647–5651.
- Hernes PJ , Benner R. 2006. Terrigenous organic matter sources and reactivity in the North Atlantic Ocean and a comparison to the Arctic and Pacific oceans. *Marine Chemistry* , **100**: 66–79.
- Hiederer R , Köchy M. 2011. Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union.
- Hoffmann B , Feakins SJ , Bookhagen B , *et al.* 2016. Climatic and geomorphic drivers of plant organic matter transport in the Arun River , E Nepal. *Earth and Planetary Science Letters* , **452**: 104–114.
- Hood E , Fellman J , Spencer RG , *et al.* 2009. Glaciers as a source of ancient and labile organic matter to the marine environment. *Nature* , **462**: 1044–1047.
- Houghton RA. 2003. The contemporary carbon cycle. *Treatise on Geochemistry* , **8**: 682.
- Houghton RA. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* , **35**: 313–347.
- Ittekkot V. 1988. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. *Nature* , **332**: 436–438.
- Janzen HH. 2004. Carbon cycling in earth systems: A soil science perspective. *Agriculture , Ecosystems & Environment* , **104**: 399–417.
- Kalbitz K , Schwesig D , Schmerwitz J , *et al.* 2003. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation. *Soil Biology & Biochemistry* , **35**: 1129–1142.
- Kim B , Choi K , Kim C , *et al.* 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir , Lake Soyang , Korea. *Water Research* , **34**: 3495–3504.
- Li S , Liu C , Li J , *et al.* 2010. Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: Isotopic and chemical constraints. *Chemical Geology* , **277**: 301–309.
- Mclauchlan KK , Hobbie SE. 2004. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *New Phytologist* , **68**: 1616–1625.
- Mollenhauer G , Winterfeld M , Hefter J , *et al.* 2016. Seasonal Changes in Particulate and Dissolved Organic Matter Composition and Quality in the Lena River Delta. AGU Fall Meeting , San Francisco.
- Monteith DT , Stoddard JL , Evans CD , *et al.* 2007. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature* , **450**: 537–540.
- Mostofa KMG , Wu F , Yoshioka T , *et al.* 2009. Dissolved Organic Matter in the Aquatic Environment. Natural Organic Matter and its Significance in the Environment. Beijing: Science Press.
- Ni HG , Lu FH , Luo XL , *et al.* 2008. Riverine inputs of total organic carbon and suspended particulate matter from the Pearl River Delta to the coastal ocean off South China. *Marine Pollution Bulletin* , **56**: 1150–1157.
- Pacala SW , Hurtt GC , Baker D , *et al.* 2001. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science* , **292**: 2316.
- Pedersen MF , Wernberg T , Thomsen MS. 2005. Biomass dynamics of exotic *Sargassum muticum* and native *Halidrys siliquosa* in Limfjorden , Denmark: Implications of species replacements on turnover rates. *Aquatic Botany* , **83**: 31–47.
- Raymond PA , Hartmann J , Lauerwald R , *et al.* 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* , **503**: 355–359.
- Regnier P , Lauerwald R , Ciais P. 2014. Carbon leakage through the terrestrial-aquatic interface: Implications for the anthropogenic CO<sub>2</sub> budget. *Procedia Earth and Planetary Science* , **10**: 319–324.
- Rejmánková E , Houdková K. 2006. Wetland plant decomposition under different nutrient conditions: What is more important , litter quality or site quality? *Biogeochemistry* , **80**: 245–262.
- Richter D , Billings SA. 2015. ‘One physical system’: Tans-

- ley's ecosystem as Earth's critical zone. *New Phytologist*, **206**: 900–912.
- Roulet N, Moore TR. 2006. Environmental chemistry: Browning the waters. *Nature*, **444**: 283–284.
- Scharlemann JP, Tanner EV, Hiederer R, et al. 2014. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, **5**: 81–91.
- Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, **48**: 7–20.
- Schulze ED, Wirth C, Heimann M. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science*, **289**: 2058–2059.
- Smith RW, Bianchi TS, Savage C. 2010. Comparison of lignin phenols and branched/isoprenoid tetraethers (BIT index) as indices of terrestrial organic matter in Doubtful Sound, Fiordland, New Zealand. *Organic Geochemistry*, **41**: 281–290.
- Strohmeier S, Knorr K, Reichert M, et al. 2013. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: Insights from high frequency measurements. *Biogeosciences*, **10**: 905–916.
- Stubbins A, Hood E, Raymond PA, et al. 2012. Anthropogenic aerosols as a source of ancient dissolved organic matter in glaciers. *Nature Geoscience*, **5**: 198–201.
- Sugiyama Y, Aneqawa A, Kumagai T, et al. 2004. Distribution of dissolved organic carbon in lakes of different trophic types. *Limnology*, **5**: 165–176.
- Tesi T, Miserocchi S, Goni MEA, et al. 2007. Organic matter origin and distribution in suspended particulate materials and surficial sediments from the western Adriatic Sea (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **73**: 431–446.
- Tittel J, Büttner O, Freier K, et al. 2013. The age of terrestrial carbon export and rainfall intensity in a temperate river headwater system. *Biogeochemistry*, **115**: 53–63.
- Wang L, Wang J, Huang J. 2003. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zones. *Acta Botanica Sinica*, **45**: 399–407.
- Wehrli B. 2013. Conduits of the carbon cycle. *Nature*, **503**: 346–347.
- Weise L, Ulrich A, Moreano M, et al. 2016. Water level changes affect carbon turnover and microbial community composition in lake sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, **92**: 35.
- 
- 作者简介 周苗,女,1993年生,硕士研究生,主要从事地表有机碳循环方向研究。E-mail: jasmine@tju.edu.cn  
责任编辑 魏中青
-