

# 土壤碳淋溶流失研究进展

丁 虎,郎赞超,刘丛强

(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:** 土壤碳的淋溶流失是指在水的作用下土壤中的碳沿着水文路径转移到水环境的过程。尽管这些流失量有限,但对陆地碳平衡核算具有重要影响。本文在总结了土壤碳淋溶流失研究的重要性、近年来相关领域取得的进展的基础上,指出已有研究的不足有:对土壤无机碳(SIC)的淋溶流失研究薄弱、缺乏野外实地观测、对土地利用变化影响土壤碳淋溶流失的过程与机制认识不足等。今后除了加强以上几个方面的研究外,还要综合利用同位素示踪和在线仪器观测等各种手段,开展“陆地-水生系统连续体”内多界面碳交换的综合研究。

**关键词:** 陆地碳平衡;淋溶流失;碳循环;土地利用

**中图分类号:** S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2016)01-0139-08 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.019

土壤是陆地生态系统的核心,是连接大气圈、水圈、生物圈以及岩石圈的纽带,也是陆地生态系统最大的碳库,其有机碳储量约为陆地植被碳库储量的2~3倍、大气碳库的2倍<sup>[1-2]</sup>,土壤碳的微小变化可能引起大气中CO<sub>2</sub>浓度的明显波动<sup>[3]</sup>,致使全球碳收支以及气候系统的稳定性发生改变。另外,土壤有机碳是控制土壤肥力和农业生产的关键因素,土壤有机碳的流失可以导致土壤肥力和土壤质量下降,影响到陆地生态系统的稳定性<sup>[4-5]</sup>。因此,土壤碳循环的研究对全球变化研究及区域生态系统安全具有重要意义,是陆地碳循环领域研究的热点问题。

土壤中的碳可分为土壤有机碳(SOC)和土壤无机碳(SIC)。其中SOC主要来源于植物凋落物、根系分泌物、植物死根、微生物和土壤动物等,按形态可分为颗粒有机碳(POC)和可溶性有机碳(DOC),POC又可进一步分为游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿物结合态有机碳。SIC是指土壤风化成土过程中形成的发生性碳酸盐岩矿物态碳,严格意义上还包括固、液、气三相,主要来源于土壤母质、大气沉降、地下水、人类活动、土壤呼吸作用等。土壤碳流失的过程主要包括:土壤呼吸(包括植物根呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸以及含碳

物质化学氧化作用)<sup>[6]</sup>、地表侵蚀和淋溶作用则。其中呼吸作用使土壤向大气释放CO<sub>2</sub>、侵蚀作用使土壤碳主要以颗粒态丢失<sup>[7]</sup>,而淋溶作用则使土壤碳以溶解态被地表径流/地下水携带进入水体,构成自然界碳循环的另一重要环节<sup>[8]</sup>。土壤在水的作用下可以发生碳的淋溶流失,虽然这些流失量有限,但对全球碳循环有重要影响<sup>[9]</sup>,因为这些碳被转移到水生生态系统后,常常发生碳的沉积或释放<sup>[10]</sup>。以DOC为例,尽管有研究通过地表水观测到的DOC通量相对低,但土壤内部的DOC通量却是地表水中的许多倍,特别是对于北纬地区来说,从陆地流失的水溶性碳是生态系统碳平衡的重要组成部分<sup>[11-12]</sup>。除此之外,土壤中DOC的运移是成土过程的主要机制之一,对土壤中微生物行为的控制机制以及土壤碳的稳定性的理解具有重要意义<sup>[13]</sup>。另外,尽管DOC流失量有限,但DOC的长期流失意味着生态系统的限制元素或关键元素(如N和P)也随之流失,进而使生态系统净初级生产力(NPP)变小<sup>[14]</sup>,在陆地生态系统生物地球化学循环中起关键作用。

## 1 土壤碳淋失研究的研究进展

鉴于土壤碳(主要是土壤有机碳,SOC)的重要

收稿日期:2015-05-12; 改回日期:2015-07-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB956700); 国家自然科学基金项目(41203090,41372376); 贵州省自然科学基金项目(黔科合J字[2011]2350号,[2013]2298号)。

第一作者简介:丁虎(1982-),男,博士,副研究员,从事环境地球化学研究。E-mail: hu.ding@hotmail.com.

性 科学家从上个世纪 80 年代开始就关注了 SOC 动态问题<sup>[15]</sup>,为揭示其变化规律,国内外对土壤有机碳动态的影响因素开展了大量室内外研究,并取得了一些进展。研究显示,土壤溶解有机碳(DOC)主要受植被种类和覆盖度、微生物种类和数量、土壤温湿度、土壤理化性质、降水量、土地利用方式等因素的影响。据 Kalbitz 等<sup>[16]</sup>的总结,凋落数量和土壤有机质含量决定土壤碳库的大小。凋落物种类及土壤性质(C/N 比,微生物群落和数量、铁和铝等金属化合物等)则决定了土壤有机质降解速率及土壤对有机质的吸附能力。土壤溶液化学性质(pH 值和离子组成)也是可能的影响因素,如土壤溶液中主量(如  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{Mg}^{2+}$  等)或微量金属元素( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  或  $\text{Cd}^{2+}$  等)离子的存在可能影响土壤有机质的溶解性。 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  等阴离子则可能置换出原本处于被吸附状态的有机质。此外,环境因子,如温度、土壤湿度、降水、氮输入及土地利用方式也是影响土壤有机碳动态的关键因素。由于上述因素叠加影响,不同条件下各因素的作用强度具有较大差异,为了更深入探究具体过程机制,吴健敏等<sup>[17]</sup>将影响土壤 DOC 动态的因素分为生物因素(包括植被和微生物)、非生物因素(包括温湿度、土壤理化性质、水文情势、酸沉降、 $\text{CO}_2$  浓度及土壤冻融等)和人为因素(土地利用和土地管理方式),并对上述几个因素的影响进行了详细的总结。总体上,生物因素控制着土壤 DOC 的输入和输出,而非生物因素和人为因素叠加于生物因素,通过影响微生物活性、植被生长、土壤颗粒对有机质的吸附能力等而间接影响着土壤 DOC 的动态变化。

大多数陆地生态系统碳收支模型仅关注陆地和大气间的  $\text{CO}_2$  交换,并没有考虑土壤碳的淋失问题,导致这类模型所得到的土壤异养呼吸高于实测结果<sup>[18]</sup>。类似地,全球海洋生物地球化学模型将陆地横向输入海洋的碳(或营养物质)假定为一个固定值,没有考虑海岸带的作用。这些简单的生态系统和生物地球化学过程模型并不能捕捉到陆地碳和养分输出增多对海岸带的影响<sup>[19]</sup>。另外,基于大气  $\text{CO}_2$  反演模型得到的区域陆地-大气碳交换主要基于地表站点观测,通常观测不到从陆地土壤淋失的碳。尽管部分模型考虑了水和大气碳交换问题,但受采样点/观测点限制,这些模型并不足以区分陆地和内陆水各自与大气  $\text{CO}_2$  的交换<sup>[20]</sup>,基于大

气反演模型得到的海洋-大气  $\text{CO}_2$  交换通量也存在类似的问题<sup>[21]</sup>。以上模型本身的不足在成区域和全球陆地系统碳收支核算存在分歧<sup>[22-23]</sup>,成为关键的不确定因子之一<sup>[24]</sup>。

科学家在最近几年提出了“无边界碳循环”(Boundless carbon cycle)的概念<sup>[9]</sup>,强调“陆-海水生连续体”(Land-ocean aquatic continuum)在碳循环中的作用<sup>[20,25]</sup>,更新了区域和全球陆地碳收支核算结果<sup>[26]</sup>,已经被纳入了 IPCC 最新公布的全球碳循环模型(IPCC,2013),加深了对碳循环的理解,也提出了很多新的科学问题,特别是迫切需要更新对陆地土壤碳淋失过程机制的认识<sup>[25]</sup>。

据最新数据<sup>[27]</sup>,过去的 10 年期间(2003 ~ 2013),人类燃烧化石燃料向大气净排放的  $\text{CO}_2$  约为  $8.6 \pm 0.4 \text{ Pg C/a}$ ,因土地利用变化向大气净排放  $0.9 \pm 0.5 \text{ Pg C/a}$ ,因此人类活动每年向大气净排放  $9.5 \text{ Pg C/a}$ ,这些排放的  $\text{CO}_2$  在大气圈储存  $4.3 \pm 0.1 \text{ Pg C/a}$ ,海洋能净吸收  $2.6 \pm 0.5 \text{ Pg C/a}$ ,其余  $2.6 \pm 0.5 \text{ Pg C/a}$  的  $\text{CO}_2$  将被陆地生态系统吸收,被称为剩余陆地碳汇(Residual land sink)<sup>[27]</sup>。上述估算中,人类活动排放的  $\text{CO}_2$  仅被分配在大气、海洋和陆地中,其中陆地和海洋各自独立地吸收大气  $\text{CO}_2$ ,忽略了“陆-海水生连续体”的碳汇作用<sup>[25,27]</sup>。最新的研究发现,森林砍伐、污水输入以及风化作用不断加强等人类活动导致陆地土壤碳的淋溶流失量比工业革命前增加约  $1 \text{ Pg C/a}$ ,然而这些增加的碳只有 10% 被搬运至了海洋,其余  $0.5 \text{ Pg C/a}$  左右被埋藏在陆-海水生连续体,有大约  $0.4 \text{ Pg C/a}$  排放到了大气<sup>[20]</sup>。实际上,如果考虑上述陆-海连续体中碳的沉积/沉淀或释放<sup>[9,10,28-29]</sup>,在水的作用下每年从陆地流失的碳可达  $5.7 \text{ Pg C}$ <sup>[26]</sup>,远高于传统  $0.9 \text{ Pg C}$  的估计结果<sup>[10]</sup>。因此,土壤碳的淋溶流失对陆地生态系统碳平衡核算具有重要意义<sup>[30-31]</sup>。

## 2 土壤碳淋溶流失研究存在的不足

经过几个世纪的研究,国内外学者已经在土壤碳淋失的影响因素等方面取得了重要认识,但依然存在以下几方面的不足:

### 2.1 野外观测研究相对缺乏

以往研究主要通过实验室模拟实验进行,野外实验和观测开展的相对较少。尽管室内模拟实验的部分结论在野外观测中已被验证,但有些结论与实验样地、集水区或流域观测到的结果实际不符,

甚至相反。基于室内模拟的结果能否适用于野外情况尚存疑问,有待将来在野外观测中进一步验证<sup>[32]</sup>。例如室内试验得到的阔叶和针叶林的相对多少对土壤 DOC 碳动态的影响结果与野外观测的结果却相反。室内试验得到的 pH 和 SOM 的 C/N 值对土壤 DOC 动态的影响并没有在野外观测中得以验证。室内实验发现粘土矿物有助于 DOC 滞留,但在土壤优先流主导土壤水情的情况下,粘土矿物对 DOC 动态的影响不大。其最主要的原因是在室内模拟实验中通常忽略了水文过程的影响,而水文过程可以引起土壤氧化还原状态以及土壤水文路径的改变,被认为是控制土壤 DOC 淋失的关键过程<sup>[14]</sup>。如对地表溪流/河流的研究表明,降雨是流域物质循环的重要时段,我国西南喀斯特地区小流域在降雨时的碳(及其他养分)的输出通量明显增多<sup>[33-34]</sup>;美国森林小流域暴雨期间的 DOC 输出量占了全年的 86% 以上<sup>[35]</sup>;洪水期间密西西比河流域陆地流失的 DOC 明显增加,且由于微生物作用,使下游墨西哥海湾北部水域由 CO<sub>2</sub> 的汇变为 CO<sub>2</sub> 的源<sup>[36]</sup>。显然,传统的季节和月尺度的采样将无法捕捉这些过程。

## 2.2 SIC 的关注不够

一般认为, SIC 循环周期较长(千年尺度),在全球变化和植被演替中的响应相对较为缓慢,对碳循环具有显著影响的主要是 SOC。因此,以往的土壤碳动态研究都主要关注 SOC, SIC 的研究最近几年来才逐渐引起科学家的重视<sup>[37-38]</sup>。据估计, SIC 约占全球总碳库的 38%,是陆地生态系统中仅次于 SOC 的第二大碳库。土壤中普遍存在 SOC-CO<sub>2</sub>-SIC 的微碳循环过程,土壤淋溶流失的 DOC 和 DIC 的相对多少并不固定,在某些情况下 DIC 的流失比 DOC 比例高很多。如美国森林小流域 DOC 输出量仅占陆地碳淋失总量 35%<sup>[39]</sup>,巴西小流域 DOC 输出量仅占总量的 2.5%<sup>[40]</sup>,瑞典森林小流域的研究也表明陆地碳收支估算中必须考虑 DIC 的流失<sup>[37]</sup>。

## 2.3 直接研究较少

以往对土壤碳的淋失研究要么通过 SOC(主要是 DOC)的动态变化反映<sup>[16]</sup>,要么通过地表水中 DOC 和 DIC 的情况来推测(如<sup>[36,41]</sup>),直接对土壤水进行碳的淋失方面的研究还比较缺乏<sup>[42]</sup>。土壤水是水循环中关键的一环,是土壤中碳及其它养分循环的驱动者和载体,对土壤水中的 DOC 和 DIC 研究,可以直接反映土壤中的碳在水的作用下的迁

移过程,从而更加真实、可靠地反映土壤碳的淋溶流失动态。以土壤水研究土壤碳的淋溶释放,还可以弥补传统碳循环模型没有考虑“陆-海水生连续体”中碳循环的不足,对陆地生态系统碳收支核算具有重要意义<sup>[22-23,43-45]</sup>。

## 2.4 不同土地利用/覆被下土壤碳淋失的系统对比研究不多

尽管大量的证据均表明土壤碳淋失与土地利用情况息息相关<sup>[45-46]</sup>。如现代林业管理使树木生长速度加快,引起土壤中碳储量变化,加速了森林系统碳的流失,最终使原始森林的 NPP 减弱<sup>[47-48]</sup>;将森林、草地或针泥沼地转变为农业用地可能增加碳的流失,进而使土壤中碳的累积量减少<sup>[49]</sup>,近代大规模农耕活动使土壤中 SIC 的流失加剧<sup>[50]</sup>,在草原被转变为实施施肥和翻耕的玉米种植地 4 年后,有机碳的流失增加了 5 倍多<sup>[51]</sup>,也有研究指出土壤碳的淋失受植被覆盖类型的影响,在相同气候条件下牧草地流失的 DIC 为 14.7 g/(m<sup>2</sup>·a),而松林地的流失为 0.7 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[52]</sup>。土壤 DOC 的流失亦受到耕作的影响,恰当的农业管理,如施肥,简化耕作和覆盖作物种植等措施可以促进土壤团聚作用,增加土壤肥力,进而有利于土壤中碳的累积<sup>[53]</sup>,城市化也可以引起区域碳 DIC 淋失增强<sup>[54-55]</sup>。然而,已有的研究主要以森林生态系统为主(如<sup>[15,32,39,48]</sup>),对泥炭地(如<sup>[56-58]</sup>)和农田系统也关注较多(如<sup>[24,44-45]</sup>),而对草地的研究则相对较少(如<sup>[49,59]</sup>)。从气候类型来看,已有的研究主要集中在热带(如<sup>[60-61]</sup>)和寒温带(如<sup>[11,18,37,49]</sup>),有关亚热带的研究报道还比较少。目前尚缺乏对同一地区在人类活动干扰下生态系统演替不同阶段(或植被发展/恢复不同阶段)碳的淋溶流失的对比研究。由于土地利用变化往往和其它因素共同作用<sup>[62]</sup>,其影响土壤碳淋溶的程度和具体过程还需要进一步明确,这是土地利用变化背景下陆地碳循环模型优化的基础。

## 3 研究展望

我国有关土壤碳流失的研究还目前主要集中在其垂向(土壤-大气界面)流失方面(如<sup>[63]</sup>),有关土壤碳的横向(水-土界面)流失方面的研究较少,已有的相关研究也主要集中于实验室模拟(如<sup>[64]</sup>)、土壤 DOC 动态变化(如<sup>[65-67]</sup>),以及土壤碳淋失到水体中后的循环,包括河流碳循环(如

[68-69]) 和湖泊/水库体系中碳的循环(如[70-71])等方面,这显然不能满足目前陆地碳循环和碳收支研究发展的需要。今后的相关研究要重视以下几个方面:

### 3.1 SIC 的淋溶流失

已有的土壤碳循环研究主要关注 SOC,对 SIC 重视不够。实际上,土壤无机碳库碳储量巨大,在部分地区不仅与有机碳库相当,还对大气 CO<sub>2</sub> 具有重要的影响。SIC 实际上包括固、液、气三相[72],其中固相主要是土壤碳酸盐,来源于土壤母质、富含碳酸盐的气候尘埃、地下水、植物残体和人为活动输入等,液相包括 CO<sub>2</sub>、碳酸、重碳酸以及碳酸根离子,来源于 CO<sub>2</sub> 与水反应生成的富含碳酸和碳酸氢根的溶液,而气相即指 CO<sub>2</sub>,主要来源于土壤呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 以及土壤剖面上部混入的大气。一方面,液相和气相的 SIC 被淋失到水体后可能发生沉淀或释放,是陆地碳支出的主要组成之一[9-11],另一方面,CO<sub>2</sub>-有机碳-CaCO<sub>3</sub> 三相不平衡系统使土壤中的碳处于形态移动状态[73],将 SIC 纳入土壤碳淋失范畴是深入理解土壤碳动态的重要前提。特别是在我国西南喀斯特地区和西北干旱和半干旱区,土壤无机碳库巨大且对人类活动和气候变化响应敏感,在这些地区加强 SIC 淋失研究将具有重要意义。

### 3.2 土地利用变化对土壤碳流失的影响研究

土地利用/覆被变化是造成全球变化和碳循环不平衡的重要原因之一,是除了工业化之外,人类对自然生态系统的最大影响因子[74],其通过影响水和碳的循环及二者之间的相互作用[75],使之与土壤碳淋溶流失过程密切联系。开展不同土地利用/覆被变化条件下的土壤碳淋失具有重要意义,一方面,传统的将河流碳通量代表陆地系统碳的淋失量的研究不仅高估了陆地净生态系统生产力(NEP),而且往往将地下水和地表水的转化过程整合在一起,代表了特定流域不同自然和人类活动背景下碳流失的平均水平,几乎无法将河流碳流失量和陆地生态系统类型联系在一起,这不能满足陆地生态系统碳平衡评价中按照生态系统类型划分的要求(如草地、森林、农耕地等[76])。另一方面,开展相关研究有助于解决目前在内陆水体中碳含量变化方面的争议,比如就欧洲和北美地区地表水中 DOC 含量升高的问题(如文献[41]及其他参考文献),有人认为是由于气候变化中的温度和降雨量变化引起,有人认为是大气氮沉降增加所致,有人则认为是土地

利用变化的结果。再如,在有关森林被砍伐后土壤 DOC 含量变化[77]以及耕作方式对土壤碳淋失影响[46,78]等问题上,科学家们也有截然不同的观点。显然,加强(同一气候背景下)土地利用变化对土壤碳淋失影响方面的研究有助于解决这些争论。

我国土壤有机和无机碳库巨大[79],土地利用/覆被变化已对我国土壤碳库产生了重要影响[80-81],不同土地利用情况下由于土壤呼吸作用的不同而使土壤-大气界面的垂向流失具有明显差异[63],土壤碳在水-土界面的横向流失对土地利用变化的相应情况如何,目前还不得而知。但可以肯定的是,土壤呼吸作用的改变,以及由于土地利用变化导致的土壤其它物理(如土壤孔隙度)、化学(如土壤酸碱度)和生物(微生物群落和活动)过程的改变必然导致土壤碳在横向(水-土界面)上迁移的差异,需要开展更多研究来进一步明确土地利用/覆被变化与土壤碳淋溶流失之间的关系及相应的控制机制。这不仅仅是核算陆地生态系统碳收支的需要,也是评估我国生态系统调控(如植树造林、荒漠化、石漠化综合治理工程等)对大气 CO<sub>2</sub> 源/汇作用的科学依据。

### 3.3 利用在线仪器开展高频次观测研究

前已述及,降雨期是流域碳淋溶流失的重要时段,因此高频次观测是精确评估陆地系统碳流失的前提条件。如基于高频次观测(1次/30 min)的研究表明,森林小流域 DOC 的流失在短时间内(小时-天)的差异显著,若观测频率小于1次/2 d,则所得到的 DOC 流失数据将具有较大的误差[82]。最近几年来光谱技术的发展为高频次土壤碳流失研究提供了可能[83-85]。这些在线观测技术的使用将对短时间尺度土壤 CO<sub>2</sub> 流失、河流中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化及来源及陆地土壤碳流失的精确评估等研究起到极大的促进作用。

### 3.4 多界面(土-气、土-水以及水-气界面)碳交换的联动及控制机制

土壤碳在垂向(土-气界面)和横向(土-水界面)两个方向上的流失并不是孤立存在的,可能受相同作用的控制。如在土壤呼吸作用强烈时,土壤在垂向和横向上的碳流失均可能增强,而在降水增强的情况下,垂向的碳流失可能增加或减少[86],而横向上的碳流失则可能也必然发生变化,对土-气界面和土-水界面的碳交换的系统观测是深入理解土壤碳流失过程机制的必要前提。另外,土壤碳淋溶

流失到水体后的归趋也是今后需要重点关注的问题<sup>[87]</sup>。如淋失到水中的 SIC 或以 CO<sub>2</sub> 形式排放到大气<sup>[9-11]</sup>, 或与水中已有 DIC 发生化学再平衡后沉淀/排放<sup>[88-90]</sup>, 或被植物光合作用吸收利用( DIC 转为 OC)<sup>[91]</sup>; 再如, DOC 从土壤转移到水体后, 或者作为微生物的养分被利用( DOC 转为 DIC)<sup>[36, 92]</sup>, 或者发生光化学降解而产生 CO<sub>2</sub><sup>[93]</sup>, 或者直接被输送到海洋, 成为海洋生物地球化学循环主要的养分之一。双碳同位素(<sup>13</sup>C 和 <sup>14</sup>C) 为辨识这些过程提供了可能<sup>[94-95]</sup>。总之, 只有将土-气、土-水、水-气界面的碳交换问题放在一个框架内研究, 才能科学评估土壤中碳的流失问题。

## 4 结 论

土壤碳的淋溶流失是区域和全球碳循环的重要环节, 对陆地碳收支核算具有重要意义, 相关研究存在区域性差异并具有很多不确定性。今后的研究要重视 SIC 的淋失研究, 重点开展各种地质、生态背景及土地利用/覆被条件下土壤碳淋失的对比研究。要借助同位素技术和在线观测等手段, 以“无边界碳循环”模型为框架, 开展“陆-海水生系统连续体”内土壤-大气、土壤-水、和水-气等多界面的碳交换通量观测及控制机制的系统综合研究。

## 参 考 文 献

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [3] Smith P, Fang C M, Dawson J J C, *et al.* Impact of global warming on soil organic carbon[J]. *Advances In Agronomy*, 2008, 97: 1-43.
- [4] Latty E F, Canham C D, Marks P L. The effects of land-use history on soil properties and nutrient dynamics in northern hardwood forests of the adirondack mountains[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 193-207.
- [5] Li Z and Zhao Q. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2001, 231(2): 175-185.
- [6] Singh J S and Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, 43(4): 449-528.
- [7] Syvitski J P, Vörösmarty C J, Kettner A J, *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [8] Tao S. Spatial and temporal variation in DOC in the Yichun River, China[J]. *Water Research*, 1998, 32(7): 2205-2210.
- [9] Battin T J, Luysaert S, Kaplan L A, *et al.* The boundless carbon cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 598-600.
- [10] Cole J, Prairie Y, Caraco N, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 172-185.
- [11] Kling G W, Kipphut G W, Miller M C. Arctic lakes and streams as gas conduits to the atmosphere: Implications for tundra carbon budgets[J]. *Science*, 1991, 251(4991): 298-301.
- [12] Waddington J and Roulet N. Groundwater flow and dissolved carbon movement in a boreal peatland[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 191(1): 122-138.
- [13] Dawson H, Ugolini F, Hrutford B, *et al.* Role of soluble organics in the soil processes of a podzol, Central Cascades, Washington[J]. *Soil Science*, 1978, 126(5): 290-296.
- [14] Neff J C and Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 29-48.
- [15] Mulholland P J and Kuenzler E J. Organic carbon export from upland and forested wetland watersheds[J]. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(5): 960-966.
- [16] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [17] 吴健敏, 郝敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机碳( DOC) 动态变化影响因素研究进展[J]. *地质论评*, 2013, 59(5): 953-961.
- [18] de Wit H, Austnes K, Hysen G, *et al.* A carbon balance of Norway: Terrestrial and aquatic carbon fluxes[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 123(1-2): 147-173.
- [19] Bauer J E, Cai W-J, Raymond P A, *et al.* The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 61-70.
- [20] Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, *et al.* Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 597-607.
- [21] Jacobson A R, Mikaloff Fletcher S E, Gruber N, *et al.* A joint atmosphere-ocean inversion for surface fluxes of carbon dioxide: 1. Methods and global-scale fluxes[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(1): GB1019.
- [22] Gielen B, Neirynek J, Luysaert S, *et al.* The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(3): 270-278.

- [23] Siemens J. The european carbon budget: A gap[J]. *Science*, 2003, 302( 5651) : 1681.
- [24] Osborne B, Saunders M, Walmsley D, *et al.* Key questions and uncertainties associated with the assessment of the cropland greenhouse gas balance[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 139( 3) : 293–301.
- [25] Regnier P, Lauerwald R, Ciais P. Carbon leakage through the terrestrial-aquatic interface: Implications for the anthropogenic CO<sub>2</sub> budget[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, 10( 0) : 319–324.
- [26] Wehrli B. Biogeochemistry: Conduits of the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 503( 7476) : 346–347.
- [27] Le Quéré C, Peters G, Andres R, *et al.* Global carbon budget 2013[J]. *Earth Syst. Sci. Data Discuss*, 2013, 6( 2) : 689–760.
- [28] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. *Nature*, 2013, 503( 7476) : 355–359.
- [29] Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, *et al.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9( 1) : 53–60.
- [30] Nilsson M, Sagerfors J, Buffam I, *et al.* Contemporary carbon accumulation in a boreal oligotrophic minerogenic mire – a significant sink after accounting for all C-fluxes[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14( 10) : 2317–2332.
- [31] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404( 6780) : 861–865.
- [32] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, *et al.* Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen – a synthesis for temperate forests[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52( 2) : 173–205.
- [33] 丁虎, 刘丛强, 郎赞超 等. 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[J]. *地学前缘*, 2011, 18( 6) : 182–189.
- [34] 丁虎, 郎赞超, 刘文景 等. 桂西北峰丛洼地泉水和溪流在降雨过程中的水化学动态变化特征[J]. *地球与环境*, 39, 2011, 1( 48–55) .
- [35] Raymond P A and Saiers J E. Event controlled DOC export from forested watersheds[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 100( 1–3) : 197–209.
- [36] Bianchi T S, Garcia-Tigreros F, Yvon-Lewis S A, *et al.* Enhanced transfer of terrestrially derived carbon to the atmosphere in a flooding event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40( 1) : 116–122.
- [37] Wallin M, Buffam I, Oquist M, *et al.* Temporal and spatial variability of dissolved inorganic carbon in a boreal stream network: Concentrations and downstream fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2010, 115.
- [38] Huotari J, Nykanen H, Forsius M, *et al.* Effect of catchment characteristics on aquatic carbon export from a boreal catchment and its importance in regional carbon cycling[J]. *Glob Chang Biol*, 2013, 19( 12) : 3607–20.
- [39] Worrall F, Swank W T, Burt T. Fluxes of inorganic carbon from two forested catchments in the Appalachian mountains[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19( 15) : 3021–3035.
- [40] Johnson M, Lehmann J, Couto E, *et al.* DOC and DIC in flowpaths of amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 81( 1) : 45–57.
- [41] Evans C D, Chapman P J, Clark J M, *et al.* Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12( 11) : 2044–2053.
- [42] Wu Y, Clarke N, Mulder J. Dissolved organic carbon concentrations in throughfall and soil waters at level II monitoring plots in Norway: Short- and long-term variations[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2010, 205( 1) : 273–288.
- [43] Kindler R, Siemens J A N, Kaiser K, *et al.* Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17( 2) : 1167–1185.
- [44] Siemens J, Pacholski A, Heiduk K, *et al.* Elevated air carbon dioxide concentrations increase dissolved carbon leaching from a cropland soil[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108( 1–3) .
- [45] Walmsley D C, Siemens J, Kindler R, *et al.* Dissolved carbon leaching from an Irish cropland soil is increased by reduced tillage and cover cropping[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142( 3–4) : 393–402.
- [46] Vinther F, Hansen E, Eriksen J. Leaching of soil organic carbon and nitrogen in sandy soils after cultivating grass-clover swards[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43( 1) : 12–19.
- [47] Ryan M G, Binkley D, Fownes J H. Age-related decline in forest productivity: Pattern and process[J]. *Advances In Ecological Research*, 1997, 27: 213–262.
- [48] Schelker J, Eklof K, Bishop K, *et al.* Effects of forestry operations on dissolved organic carbon concentrations and export in boreal first-order streams[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2012, 117: 12.
- [49] Armentano T V and Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74( 3) : 755–774.
- [50] Raymond P A, Oh N-H, Turner R E, *et al.* Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River[J]. *Nature*, 2008, 451( 7177) : 449–452.
- [51] Brye K R, Norman J M, Bundy L G, *et al.* Nitrogen and carbon leaching in agroecosystems and their role in denitrification potential[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30( 1) : 58–70.

- [52] Parfitt R L, Percival H J, Dahlgren R A, *et al.* Soil and solution chemistry under pasture and radiata pine in New Zealand[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(2): 279–290.
- [53] Bronick C J and Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1–2): 3–22.
- [54] Baker A, Cumberland S, Hudson N. Dissolved and total organic and inorganic carbon in some British rivers[J]. *Area*, 2008, 40(1): 117–127.
- [55] Barnes R T and Raymond P A. The contribution of agricultural and urban activities to inorganic carbon fluxes within temperate watersheds[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3–4): 318–327.
- [56] Billett M F, Palmer S M, Hope D, *et al.* Linking land-atmosphere-stream carbon fluxes in a lowland peatland system[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1): GB1024.
- [57] Freeman C, Evans C D, Monteith D T, *et al.* Export of organic carbon from peat soils[J]. *Nature*, 2001, 412(6849): 785–785.
- [58] Dinsmore K J, Smart R P, Billett M F, *et al.* Greenhouse gas losses from peatland pipes: A major pathway for loss to the atmosphere? [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2011, 116.
- [59] Don A and Schulze E-D. Controls on fluxes and export of dissolved organic carbon in grasslands with contrasting soil types[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 91(2): 117–131.
- [60] Fátima R, Krusche A, Richey J, *et al.* Spatial and temporal variability of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> efflux in seven Amazonian Rivers[J]. *Biogeochemistry*, 2013: 1–19.
- [61] McDowell W H and Likens G E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley[J]. *Ecological monographs*, 1988, 58(3): 177–195.
- [62] Dawson J J C and Smith P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management[J]. *Science of The Total Environment*, 2007, 382(2–3): 165–190.
- [63] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄 等. 黔中土壤 CO<sub>2</sub> 的释放特征及其影响因素[J]. *生态环境*, 2008, 17(03): 1120–1124.
- [64] 陶澍和曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模拟研究[J]. *中国环境科学*, 1996, 16(06): 410–414.
- [65] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模 等. 石灰岩荒山造林后土壤养分与活性碳含量的变化[J]. *林业科学*, 2007, 43(01): 39–42.
- [66] 李玲, 肖和艾, 苏以荣 等. 土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(01): 122–128.
- [67] 王莹, 阮宏华, 黄亮亮, *et al.* 围湖造田不同土地利用方式土壤活性有机碳的变化[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(04): 741–748.
- [68] Wang F S, Wang Y C, Zhang J, *et al.* Human impact on the historical change of CO<sub>2</sub> degassing flux in River Changjiang. *Geochemical Transactions* [J], 2007, 8, DOI: 10.1186/1467–4866–8–7.
- [69] 刘丛强等. 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[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [70] Wang F, Wang B, Liu C, *et al.* Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(23): 3827–3834.
- [71] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征[J]. *科学通报*, 2008, 53(16): 1925–1941.
- [72] 杨黎芳和李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 986–990.
- [73] 潘根兴和曹建华. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 325–334.
- [74] Houghton R A. How well do we know the flux of CO<sub>2</sub> from land-use change? [J]. *Tellus Series B-chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62(5): 337–351.
- [75] Lohse K A, Brooks P D, McIntosh J C, *et al.* Interactions between biogeochemistry and hydrologic systems[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34: 65–96.
- [76] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, *et al.* Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of european anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1538–1542.
- [77] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices [J]. *Geoderma*, 2003, 113(3–4): 357–380.
- [78] Ruark M D, Brouder S M, Turco R F. Dissolved organic carbon losses from tile drained agroecosystems all rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(3): 1205–1215.
- [79] Li Z, Han F, Su Y, *et al.* Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China [J]. *Geoderma*, 2007, 138(1): 119–126.
- [80] Wu H, Guo Z, Peng C. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305–315.
- [81] Wu H, Guo Z, Gao Q, *et al.* Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 413–421.
- [82] Strohmaier S, Knorr K-H, Reichert M, *et al.* Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: insights from high frequency measurements [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 905–916.

- [83] Campeau A , del Giorgio P A. Patterns in CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations across boreal rivers: Major drivers and implications for fluvial greenhouse emissions under climate change scenarios [J]. *Global Change Biology* ,2014 20( 4) : 1075–1088.
- [84] Garnett M H , Hardie S M L , Murray C , *et al.* Radiocarbon dating of methane and carbon dioxide evaded from a temperate peatland stream [J]. *Biogeochemistry* ,2013 ,114( 1–3) : 213–223.
- [85] Johnson M S , Billett M F , Dinsmore K J , *et al.* Direct and continuous measurement of dissolved carbon dioxide in freshwater aquatic systems—method and applications [J]. *Ecology* ,2010 ,3( 1) : 68–78.
- [86] 王旭 , 闫玉春 , 闫瑞瑞 等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 [J]. *生态学报* ,2013 ,33( 18) : 5631–5635.
- [87] Tesi T , Semiletov I , Hugelius G , *et al.* Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land-ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* ,2014 ,133: 235–256.
- [88] Geldern R , Schulte P , Mader M , *et al.* Spatial and temporal variations of pCO<sub>2</sub> , dissolved inorganic carbon , and stable isotopes along a temperate karstic watercourse [J]. *Hydrological Processes* ,2015: DOI: 10. 1002/hyp. 10457.
- [89] Marce R , Obrador B , Morgui J-A , *et al.* Carbonate weathering as a driver of CO<sub>2</sub> supersaturation in lakes [J]. *Nature Geosci* ,2015 ,8( 2) : 107–111.
- [90] McDonald C P , Stets E G , Striegl R G , *et al.* Inorganic carbon loading as a primary driver of dissolved carbon dioxide concentrations in the lakes and reservoirs of the contiguous United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles* ,2013 ,27( 2) : 285–295.
- [91] Sun H , Han J , Zhang S , *et al.* Carbon isotopic evidence for transformation of DIC to POC in the lower Xijiang River , SE China [J]. *Quaternary International* ,2015: DOI: 10. 1016/j. quaint. 2015. 01. 018.
- [92] López P , Marcé R , Armengol J. Net heterotrophy and CO<sub>2</sub> evasion from a productive calcareous reservoir: Adding complexity to the metabolism—CO<sub>2</sub> evasion issue [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* ,2011 ,116( G2) : G02021.
- [93] Graneli W , Lindell M , Tranvik L. Photo-oxidative production of dissolved inorganic carbon in lakes of different humic content [J]. *Limnology and Oceanography* ,1996 ,41( 4) : 698–706.
- [94] Raymond P A , Bauer J E , Caraco N F , *et al.* Controls on the variability of organic matter and dissolved inorganic carbon ages in northeast US rivers [J]. *Marine Chemistry* ,2004 ,92( 1) : 353–366.
- [95] Martin E E , Ingalls A E , Richey J E , *et al.* Age of riverine carbon suggests rapid export of terrestrial primary production in tropics [J]. *Geophysical Research Letters* ,2013 ,40( 21) : 5687–5691.

## Advances in Study on Leaching Loss of Carbon from Soil

DING Hu , LANG Yunchao , LIU Congqiang

( State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China)

**Abstract:** Leaching loss of soil carbon refers to release of soil carbon into aquatic environment driven by water movement along the hydrological flow paths. Despite the limited amount , leaching loss of soil carbon has important implications on estimation of terrestrial carbon balance budget. In this paper , the importance and recent progress of soil carbon leaching study are introduced , based on which shortages of related study are then specified. These shortages include lack of the study on soil inorganic carbon leaching , less field observing than laboratory experiment , and poor understanding about the impact of land use change on soil carbon leaching , etc. Besides above research areas , future research should pay attention to carbon exchanges in “land-ocean aquatic continuum” , which synthesize carbon exchange processes at soil-atmosphere , soil-water , and water-atmosphere interfaces.

**Key words:** terrestrial carbon balance; leaching loss; carbon cycle; land use change