

土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展*

刘慧峰^{1,2} 伍 星¹ 李 雅³ 李宗善¹ 刘国华^{1**}

(¹ 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; ² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 西北师范大学, 兰州 730070)

摘 要 土壤是大气中主要温室气体(如 CO₂、CH₄ 和 N₂O)重要的源或汇,土地利用方式的改变将会导致土壤相关微环境及其生理生化过程发生改变,从而显著影响土壤中温室气体的产生与排放。在全球变化和土地利用大幅度改变的背景下,国际上已逐步开展了关于土地利用变化对土壤温室气体通量的研究。本文在简要介绍土地利用变化与土壤温室气体通量研究的基础上,重点论述了农田、草地和森林互换、湿地向农田转变、不同土地利用类型(森林、草地、湿地和农田)内部变化对3种土壤温室气体排放的影响,并从3种土壤温室气体产生的关键过程简单阐述其主要影响机理。根据目前研究中存在的不足,提出了今后需要加强的领域,以期更好地揭示土地利用变化对土壤温室气体通量的影响及作用机理,为今后深入开展相关研究提供参考。

关键词 土地利用变化; 土壤; 温室气体; 影响机理

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)7-1960-09

Effects of land use change on greenhouse gas fluxes from soils: A review. LIU Hui-feng^{1,2}, WU Xing¹, LI Ya³, LI Zong-shan¹, LIU Guo-hua^{1**} (¹State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1960–1968.

Abstract: Soil is the main source or sink of greenhouse gases (such as CO₂, CH₄, N₂O). Land use change would influence soil micro-environment and microbial physiological and biochemical processes, and thus significantly affect greenhouse gas fluxes from soils. Under the global change and significant changes in land use, the international community has gradually carried out researches on the effect of land use change on greenhouse gas fluxes from soils. This paper briefly describes the research status of land use change and greenhouse gas fluxes from soils, focuses on the effect of cropland, inter-conversion of grassland and forest, conversion of wetland to cropland, inner changes in different land use types (forest, grassland, wetland and cropland) on the greenhouse gas emissions, and explains its main impact mechanism from the key processes of greenhouse gases produced from soil. We concluded our review with an analysis of deficiencies in current research, and pointed out some urgent and key directions in future, aiming at providing some value references to carrying out the research in the future.

Key words: land use change; soil; greenhouse gases; influence mechanism.

自工业革命以来,大气中温室气体浓度急剧增

加所导致的全球气候变暖已成为当今人类社会关注的焦点。大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度上升对增强温室效应的总贡献率达 80% 左右,是温室效应的主要贡献者,并且其在大气中的浓度分别以年均 0.5%、0.8% 和 0.3% 的速率增加(IPCC, 2007)。其

* 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417103)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060103)和国家自然科学基金项目(41105117)资助。

** 通讯作者 E-mail: ghliu@rcees.ac.cn

收稿日期: 2013-12-09 接受日期: 2014-03-13

中,土地利用方式变化是造成大气中温室气体浓度增加的主要原因之一(IPCC,2007)。土壤是陆地生态系统中最主要的碳氮库,是大气中温室气体的重要源或汇。据估计,大气中每年约有5%~20%的 CO_2 、15%~30%的 CH_4 、80%~90%的 N_2O 来源于土壤。因此,土壤的微小扰动都会对温室气体通量产生重要影响(Hansen & Lacis,1990)。

土地利用变化不仅改变地表覆盖类型,而且影响土壤理化性质和微生物活性发生改变,导致土壤碳氮循环关键过程发生改变进而影响土壤温室气体排放量发生改变(Ball *et al.*,2002;Flechard *et al.*,2005;陈广生和田汉勤,2007)。研究表明,农田向森林或者草地转变普遍降低土壤 CO_2 、 N_2O 排放,增加土壤吸收 CH_4 的能力(Merino *et al.*,2004;Monti *et al.*,2012)。森林转变为农田一般能够增加土壤 N_2O 排放量,降低土壤吸收 CH_4 的能力(Smith *et al.*,2000;Takakai *et al.*,2006),对土壤 CO_2 排放的影响存在一定的差异(盛浩等,2010)。草地转变为农田增加土壤 CO_2 排放量,降低土壤吸收 CH_4 的排放量,土壤 N_2O 排放有一定的差异(Smith *et al.*,2000;李明峰等,2004)。湿地转换为农田增加土壤 CO_2 的排放,土壤 N_2O 、 CH_4 排放量受多种因子制约(Jiang *et al.*,2009;王德宣,2010;Hergoualc'h & Verchot,2012)。草地与森林互换、不同土地利用类型(森林、草地、湿地和农田)内部变化对土壤温室气体排放通量变化差异性较大(Davidson *et al.*,2000;Fernandes *et al.*,2002;Wuthrich *et al.*,2002;Guo *et al.*,2010)。总之,土地利用转变导致的土壤温室气体通量变化幅度差异性是很大的,转变类型、观测时期、植被差异、气候差异、地域差异等都会造成转变后温室气体通量变化不一致。由于土地利用转变导致的土壤温室气体排放通量的变化直接导致大气中温室气体浓度变化,并间接影响全球气候变化。因此,在全球变化的大背景,在全球范围内开展土地利用变化对土壤主要温室气体排放通量进行研究,并揭示其影响因素和作用机理,将有助于探求如何科学地利用有限的土地资源,减少土壤温室气体排放、预测土地利用转变对全球变化的影响、增加土壤碳氮储量以及控制全球气温持续升高等都有重要意义。

1 土地利用变化与土壤温室气体排放通量

土地利用是指人类对土地的使用方式和利用状

况,是一种人类改造自然的活动。土地利用变化是人类活动和自然要素共同作用的结果,是研究自然与人文过程的理想切入点,因此成为全球变化研究的热点领域。广义的土地利用改变包括两类:转换和渐变(Foley *et al.*,2005)。转换是指一种生态系统转变为另一种新的生态系统类型,改变之后生态系统的环境和植被功能也发生相应的改变,如林地转变为农田或者草地。渐变则是指某一土地利用类型生态系统内部的变化过程,但是环境和植被功能不会发生较大的变化,如森林砍伐、农田施肥、生态系统演替等。比较常见的土地利用转变类型主要有森林、农田与草地相互转换;湿地转变为农田;森林砍伐;草地放牧;泥炭湿地变化;农田管理措施和生态系统演替等(陈广胜和田汉勤,2007)。

迄今为止,人类活动已经改变了地表近2/3的面积(IPCC,2007)。在过去300年里,土地利用活动特别是农业用地拓展和收获木材,已经导致全球约 $7 \times 10^6 \sim 1.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的森林遭受损失,灌溉农田面积增加了约70%(Foley *et al.*,2005)。伴随着土地利用变化的研究,人们逐渐认识到土地利用变化对全球气候变化产生显著影响。土地利用变化对气候影响的研究最早起源于20世纪70年代,到了80年代,人们逐渐认识到土地利用变化不仅可以通过改变地表物理特性影响气候,还可以通过温室气体排放影响气候(Houghton *et al.*,1983)。之后涌现出许多关于土地利用变化对土壤碳循环影响的研究(张容娟等,2010;Guo *et al.*,2010)。而由于土壤碳氮通量观测技术较为复杂,有限的研究仅集中温带地区和热带地区(Salimon *et al.*,2004;宋长春等,2006;Carlisle *et al.*,2006)。我国由于缺乏清晰的土地利用历史资料,有关土地利用变化对土壤温室气体通量的研究仍有一定的缺陷(宋长春等,2006)。有的研究大多观测时间短,作用机理不是很清晰,更多的侧重于当前不同土地利用下土壤温室气体排放通量的测定。土地利用变化对土壤温室气体排放通量的研究有待深入。

2 土地利用变化对土壤温室气体排放通量的影响

2.1 土地利用变化对土壤 CO_2 通量的影响

森林生态系统是陆地最大的碳库,森林土壤碳储量约占陆地生态系统碳储量的56%,在全球碳循环中发挥着重要作用(Weitz *et al.*,1998)。在全球尺度上,森林尤其是热带森林的砍伐被认为是引起

大气中 CO_2 浓度增加的最主要的土地利用变化方式之一 (Houghton *et al.*, 2003; Achard *et al.*, 2004)。一般而言, 森林转变为草地增加土壤 CO_2 排放通量。Feigl 等 (1995) 和 Fernandes 等 (2002) 分别在亚马孙河流域东南部的研究中证实了这一结论。而 Davidson 等 (2000) 在亚马孙河东部的研究表明, 森林转变为草地降低了土壤 CO_2 排放量。产生这一差异的主要原因可能与东南部地区干旱季节持续时间较短和较高的草原生产力有一定的关系 (Salimon *et al.*, 2004)。因此, 森林转变为草地后土壤 CO_2 排放通量增加或减少以及增减程度与研究区的气候条件和植物生长特性有较大的关系。

森林或草地向农田转变会造成土壤 CO_2 通量发生变化。美国阿拉斯加洲的寒带地区 (Grünzweig *et al.*, 2003) 和印度尼西亚的热带雨林地区 (盛浩等, 2010) 的观测数据表明, 森林转变为农田增加土壤 CO_2 排放通量。而福建的亚热带季风区 (褚金翔和张小全, 2006)、美国纽约州的温带季风区 (Carlisle *et al.*, 2006) 和美国加州温带地中海 (Ishizuka *et al.*, 2002) 的研究却表明, 森林转变为农田在一定程度上会减少土壤 CO_2 排放通量。不同地区土地利用转变后 CO_2 排放量差异性的主要原因可能与农田管理措施和研究区域的气候条件有关。而草地向农田转变一般会增加土壤 CO_2 排放通量, 王跃思等 (2001) 在内蒙古草原观测结果表明, 农垦使得土壤 CO_2 排放通量增加了 $14.3 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。相反, 农田转变为草地或森林, 土壤中 CO_2 排放通量会有一定的减少, 但是其碳储量恢复到原来水平需要很长一段时间 (Paul *et al.*, 2002; Lemus & Lal, 2005)。

湿地遭到破坏或者转变为其他土地利用类型将会释放大量的 CO_2 , 其主要原因是在湿地排干后, 由于厌氧环境的消失导致土壤微生物呼吸作用增强, 土壤表层有机物分解速度加快, 大量土壤有机碳释放到环境中 (陈广生和田汉勤, 2007)。Kasimir-Klmedtsson 等 (1997) 研究表明, 湿地转变为农田将导致约 5~23 倍的 CO_2 释放到大气。王德宣 (2010) 在我国三江平原的观测结果表明, 湿地转变为草地导致土壤 CO_2 排放量增加了约 50%。而由旱地转变为湿地的过程中, 土壤 CO_2 排放量会减少。在我国崇明岛地区的研究表明, 小麦地转变为水稻田后, 土壤 CO_2 排放量显著下降至转变前的 10% 左右 (张容娟等, 2010)。

土地管理措施是影响土壤 CO_2 排放通量的一个

主要人类活动, 有学者认为, 不同的管理措施是造成土地利用变化后土壤 CO_2 排放通量差异显著的根本原因 (陈广生和田汉勤, 2007)。Liu 等 (2011) 在我国亚热带地区的研究表明, 常绿阔叶林转变为橡胶林对土壤 CO_2 排放通量无显著影响, 但是转变后高强度的管理措施能够增加土壤 CO_2 排放通量。对天然林而言, 刀耕火种是主要的管理措施, 就目前大部分研究结果来看, 火烧过程通过增加土壤有机质含量使土壤 CO_2 排放通量增加 (Wuthrich *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2010)。但也有研究表明, 火烧会减少土壤 CO_2 排放通量 (Ishizuka *et al.*, 2002)。这可能与火烧程度有一定的关系, 火烧高于一定的程度, 土壤中大量微生物死亡, 呼吸作用减弱, 土壤 CO_2 排放减少。草地生态系统中的主要人类活动是草原放牧, 过度放牧导致的土壤裸露, 使得草地土壤的呼吸作用增强, 从而促进土壤 CO_2 的排放量。在我国内蒙古草原的研究表明, 土壤 CO_2 排放通量与放牧强度呈线性增长趋势 (王跃思等, 2001)。农田是受人类活动影响最大的人工生态系统, 农田管理措施是影响土壤呼吸的关键性因素。影响农田土壤 CO_2 排放的主要管理措施有耕作方法、耕作深度与耕作强度 (张东秋等, 2005; Gregorich *et al.*, 2005)。此外, 种植作物类型、施肥方式和化肥施用类型等对土壤 CO_2 通量也有一定程度的影响 (Kasimir-Klmedtsson *et al.*, 1997; 张庆忠等, 2005; 陈书涛等, 2009)。

生态系统的演替是一种渐变型的土地利用变化方式, 也是许多学者研究的热点。一般来说, 幼龄林地土壤 CO_2 排放通量低于处于顶极群落的森林土壤。随着种植年限的增加, 土壤中的自养生物和异养生物的呼吸作用增强, 土壤 CO_2 排放通量增加。Wiseman 和 Seilerz (2004) 对比研究了 4 种林龄阶段土壤的 CO_2 排放通量, 结果表明, 老龄林地土壤 CO_2 排放通量显著高于幼龄林地。在我国南方亚热带地区, Tang 等 (2006) 根据不同演替阶段森林优势种种类的差异测定不同演替阶段土壤 CO_2 排放差异, 结果表明, 随着森林由针叶林向混交林和阔叶林演替的过程中, 土壤 CO_2 排放通量增加, 而当森林处于演替的顶极阶段时, 土壤 CO_2 排放通量最大。另外, 室内培养实验也证实了老龄林地土壤 CO_2 排放通量显著高于幼龄林地 (Wiseman & Seiler, 2004)。也有学者认为, 森林种植年限对土壤呼吸作用没有显著影响, 土壤呼吸主要与地下土壤的碳分布有一定的关系, 而老龄林地地下碳的分布并不一定高于幼龄林

地(Salimon *et al.*, 2004)。在草地生态系统中,不同土地利用年限下土壤 CO_2 排放通量也有一定的差异,Feigl 等(1995)在热带湿热林地区测定了不同草地年限下土壤 CO_2 排放通量,结果表明:在幼龄草原(<9年)中,随着年限的增加,土壤 CO_2 排放通量逐渐降低;在老龄草原中(>9年),土壤 CO_2 排放通量与年限无显著关系。

2.2 土地利用变化对土壤 CH_4 排放通量的影响

森林和草地之间相互转变能够改变土壤对大气 CH_4 的吸收强度甚至改变其源汇关系。Keller 和 Reiners(1994)在哥斯达黎加的研究表明,山地热带雨林转变为草地使得土壤由大气 CH_4 的吸收汇转变为其排放源。Steudler 等(1996)、Goreau 和 Demello(1998)分别在亚马逊中心流域和南部流域的研究也得到了类似结论。Livesley 等(2009)研究表明,草地转变为森林增加了土壤对大气 CH_4 的吸收汇强度。而 Menyailo 等(2008)研究表明,当草地转变为森林后,其土壤对 CH_4 的吸收能力由 $3.7 \sim 3.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下降至 $1.3 \sim 1.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Verchot 等(2000)的观测结果表明,森林转变为草地能够增加或者降低土壤对大气 CH_4 的吸收汇强度,造成这一差异的主要原因是干湿季持续时间的不同。Tate 等(2007)在新西兰地区的研究显示,在火山土土壤中,森林土壤对 CH_4 的吸收作用大于草原;而在火山灰土土壤中,森林转变为草地对土壤吸收 CH_4 的能力无显著影响。因此,森林转变为草地后,土壤吸收大气 CH_4 的能力主要受转变过程中土壤扰动程度、气候条件和土壤性质等的影响。

一般而言,林地、草地和农田的 CH_4 吸收汇强度是林地>草地>农田(李克让,2002)。据估计,森林或者草地转变为农田造成的土壤压实使得土壤氧化 CH_4 的能力降低约 60%,并且森林或者草地转变成农田被认为是改变土壤 CH_4 源汇强度的最重要人类活动(Smith *et al.*, 2000)。农田转变为草地或者人工林地将有利于土壤吸收大气中的 CH_4 ,但是转变后的管理措施会对土壤吸收汇强度有一定的影响。在欧洲温带湿热林地区的观测数据表明,农田转变为人类活动干扰较大的草地并不能显著增加土壤对大气 CH_4 的吸收汇,而在农田植树造林可增强土壤对大气 CH_4 的吸收能力(Merino *et al.*, 2004)。有研究表明,停止耕种和施肥能够提高土壤 CH_4 氧化能力,但其恢复速率非常缓慢且恢复到原来水平需要大约 100 年的时间(Ojima *et al.*, 1993)。

湿地土壤是大气 CH_4 的主要排放源,湿地土地利用发生变化后其土壤 CH_4 通量的差异主要由转变前后土壤含水量决定。印度尼西亚沿海地区次生泥炭地转化为水稻田增加了土壤 CH_4 排放通量,而转化为旱地则减少了土壤 CH_4 排放通量(Inubushi *et al.*, 2003)。Hergoualc'h 和 Verchot(2012)的 meta 分析结果表明,泥炭沼泽林地转变为水稻田,土壤 CH_4 排放量由 $(28.6 \pm 9.7) \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加至 $(107.6 \pm 60.2) \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;转变为其他土地利用类型则减少至 $(9.5 \pm 6.1) \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。天然湿地向水稻田转变后,土壤 CH_4 排放通量的具体变化情况与研究区域的湿地类型、水稻管理措施以及水稻品种等有一定的关系。雷波(2008)在我国闽江口蕉草湿地的研究表明,湿地转变为水稻田增加了土壤 CH_4 通量。而在三江平原研究中发现,沼泽湿地开垦成稻田后 CH_4 排放通量平均值仅为常年积水沼泽湿地 CH_4 排放通量平均值的 40% 左右(王德宣,2010)。

随着生态系统的演替,不同阶段土壤对大气 CH_4 的吸收能力也有一定的差异。Tang 等(2006)根据不同演替阶段森林优势种种类的差异测定演替对土壤吸收大气 CH_4 能力的影响,结果表明,随着生态系统的演替,土壤对 CH_4 的吸收能力不断增加。土壤吸收 CH_4 能力增加的主要原因可能是处于演替顶极阶段的森林土壤受到的扰动性较小,土壤通透性增加,有利于大气中 CH_4 向土壤中的传输。而 Verchot 等(2000)通过室内培养比较不同草地种植年限下土壤 CH_4 通量,结果表明,种植年限对草地土壤 CH_4 吸收能力无显著影响,其主要原因可能与草地气候条件和草地生态系统较短的生长周期有关。

2.3 土地利用变化对土壤 N_2O 排放通量的影响

森林土壤是 N_2O 的主要排放源,基于模型估算的研究表明,森林土壤 N_2O 排放通量在过去几十年有了一定程度的增加,其中,森林转变为草地被认为是土壤 N_2O 排放通量增加的主要原因之一(Prinn *et al.*, 1990)。Cheng 等(2013)在我国西北的研究显示,森林转变为草原降低了土壤 N_2O 排放。而一些野外观测数据表明,增长只是暂时的,随着草地生态系统的演替,草地土壤 N_2O 的排放通量低于森林土壤。Keller 等(1993)在哥斯达黎加的观测数据表明,森林在转变为草地的初期(<10年),草地土壤 N_2O 的排放量是森林土壤的 5~8 倍;但在转变后 10~25 年内,草地土壤 N_2O 的排放量仅为森林土壤

的 $1/2 \sim 1/3$ 。Melillo 等 (2001) 也得出了相似的结论,在森林转变为草地的初期,草地土壤 N_2O 的排放量是森林土壤的 2 倍多,大约 3 年以后,草地土壤 N_2O 的排放通量下降至森林土壤的 70%。此外,也有长期观测数据表明,森林转变为草地后,草地土壤 N_2O 排放通量一直低于森林土壤 (Verchot *et al.*, 1999)。

有研究表明,森林或者草地转变为农田可增加土壤 N_2O 的排放。Takakai 等 (2006) 研究表明,森林转变为农田可显著增加土壤 N_2O 排放通量。王跃思等 (2001) 研究表明,草地开垦为农田后,其 N_2O 排放通量增加了 3 倍。Maljanen 等 (2003) 用静态箱法对芬兰东部排水的有机土壤 N_2O 排放进行了 2 年的观测,垦殖土壤 N_2O 排放量是邻近森林土壤的 2 倍。但有研究表明,森林或者草地转变为农田后 N_2O 的排放量并未有显著增加。李明峰等 (2004) 研究表明,草地开垦为农田并没有显著增加 N_2O 的排放量,只是改变了 N_2O 的排放特征。相反,农田向林地转变会一定程度上导致土壤 N_2O 排放通量减小。农田向林地转变过程中主要是通过减少氮肥的输入以及促进土壤上层有机质的形成,进而减少土壤 N_2O 排放量 (Merino *et al.*, 2004)。

原始森林转变为次生林对土壤 N_2O 排放有显著影响,但不同实验观测期得到的结论存在明显差异。在苏门答腊岛热带泥炭地的研究结果表明,森林砍伐初期增加土壤 N_2O 排放通量;同时,室内培养实验的研究也得出了相似的结论 (Ishizuka *et al.*, 2002)。然而,随着森林土壤的恢复,土壤 N_2O 排放通量逐渐减少,甚至低于原来的水平。Takakai 等 (2006) 在热带泥炭地的研究中,第 1 年的观测数据表明,森林砍伐对土壤 N_2O 排放量无显著影响;第 2 年的数据表明,森林砍伐降低土壤 N_2O 排放通量。Verchot 等 (1999) 和 Liu 等 (2008) 的研究也表明,原始森林转变为次生林降低土壤 N_2O 排放通量。在我国西北典型喀斯特地形的研究也得出相似结论 (Cheng *et al.*, 2013)。放牧是造成草地发生渐变式土地利用变化的一种人类活动,放牧一般会增加土壤 N_2O 排放通量 (Skiba *et al.*, 1998; Flechard *et al.*, 2007)。另外,由于牲畜的放养会导致地势不平坦,土壤 N_2O 排放通量具有很强的空间异质性 (Skiba *et al.*, 1998)。而王跃思等 (2001) 在内蒙古草地的研究表明,适度的放牧不一定造成土壤 N_2O 排放通量显著增加。

泥炭湿地排干伴随着土壤中大量有机氮的快速分解增加土壤中 N_2O 的排放通量,其中,泥炭地转化为农田是大气中 N_2O 的主要来源 (Kasimir-Kl-emedtsson *et al.*, 1997)。Hadi 等 (2000) 的研究表明,热带泥炭地开垦 (包括水田和旱田) 均提高了土壤 N_2O 通量,并且旱田相对于其他处理而言,土壤 N_2O 的排放通量最高。而在我国三江平原的研究表明,湿地转变为旱地,土壤 N_2O 排放通量由 $(4.07 \pm 1.72) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到 $(4.90 \pm 1.52) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;湿地变化为水稻田,土壤 N_2O 排放则减少至 $(2.09 \pm 0.79) \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Jiang *et al.*, 2009)。因此,湿地转变为农田可能增加或者降低土壤 N_2O 通量,这主要是取决于土地类型转变前后土壤含水量的差异。同时,室内培养实验的结果也表明,泥炭湿地转变为农田后,土壤 N_2O 的排放通量受土地利用方式、管理措施以及土壤含水量等因素的影响 (Hadi *et al.*, 2000)。

3 土地利用变化影响土壤温室气体排放通量的作用机理

3.1 土地利用变化影响土壤 CO_2 排放通量的作用机理

土壤产生 CO_2 是土壤呼吸的结果,土壤呼吸包括自养呼吸 (主要指根系呼吸和菌根呼吸) 和异养呼吸 (主要指微生物呼吸) (Murdiyarso *et al.*, 2010)。土地利用改变主要通过以下几个方面影响土壤呼吸作用改变土壤 CO_2 排放量,随着土地利用方式改变,土地管理措施、土地转变之前的土地利用、地表微环境变化和土壤有机质的改变等能够改变表层土壤 SOC 含量土壤异养呼吸速率,影响土壤 CO_2 排放通量 (Searchinger *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2010; Mariela *et al.*, 2012; Hergoualc'h & Verchot, 2013)。土地转变过程中的地表覆盖率变化和土地管理措施改变导致土壤温度和土壤含水量差异共同影响土壤中的微生物类型和活性,间接影响土壤自养呼吸速率,土壤 CO_2 通量变化 (Murdiyarso *et al.*, 2010)。一般而言,高温能够促进土壤微生物呼吸作用,增强土壤自养呼吸作用,土壤 CO_2 排放量增加。有些研究甚至直接用土壤 CO_2 排放量来表征土壤微生物活性的高低,在荒地上种植作物使得土壤呼吸过程中关键的酶活性和土壤有机质含量降低,土壤微生物活性降低,土壤 CO_2 排放量降低 (Sall *et al.*, 2006)。而含水量大于土壤饱和含水量,土壤中

的微生物活性较低,土壤 CO_2 排放量降低。森林转变为草地的室内培养实验显示,草地土壤微生物活性更强 (Salimon *et al.*, 2004)。土壤含水量通过改变土壤的物理性质如粘土含量、土壤密度等来影响 CO_2 在土壤中的传输速率。土地利用变化过程中,土壤受到扰动会导致土壤的物理性质改变,从而影响表层的空隙度、透气性等,能够间接影响土壤 CO_2 向空气中的传输 (Mariela *et al.*, 2012)。此外,有研究表明,土地利用改变,尤其是湿地的破坏,能够导致土壤地下水位的降低,间接影响土壤 CO_2 排放量。Hooijer 等 (2011) 研究指出,地下水位降低 10 cm 会导致土壤 CO_2 排放量增加约 $5.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 土地利用变化影响土壤 CH_4 排放通量的作用机理

土壤 CH_4 通量是土壤 CH_4 产生、氧化和传输的综合结果,其中涉及到一系列微生物、物理和化学过程。土壤产生 CH_4 主要分为两个步骤,首先在厌氧环境中,厌氧细菌将土壤中有機物质分解为简单的小分子化合物;其次,产甲烷细菌进一步将小分子化合物转化为 CH_4 。土地利用改变过程中土壤含水量通过影响厌氧细菌的活性来影响土壤 CH_4 的产生,土壤含水量达到一定的阈值后,土壤由 CH_4 吸收汇变为排放源 (Inubushi *et al.*, 2003)。转变过程中生物因子的改变也是决定土地利用变化过程中 CH_4 产生的另一关键因子,不同植被覆盖类型下,土壤有机物含量以及类型的差异可显著影响土壤产生 CH_4 的过程 (Merino *et al.*, 2004; Reay *et al.*, 2005)。由于地表覆盖和含水量的差异造成土壤温度改变,土壤温度影响土壤产甲烷细菌活性进而影响 CH_4 的产生 (Verchot *et al.*, 2000)。土地利用过程中,土壤含水量和土壤压实作用导致的土壤容重变化能够改变大气 CH_4 向土壤的扩散速率进而影响土壤对 CH_4 的吸收,同时也能改变土壤产生的 CH_4 向大气中的传输 (von Fischer *et al.*, 2009)。不同土地管理措施下,氮肥施入通过影响硫酸盐的含量影响土壤 CH_4 的氧化速率 (Reay *et al.*, 2005)。土地利用改变过程植被类型的改变能够影响土壤 pH,研究表明,土壤 pH < 6 时,甲烷氧化菌活性较低,土壤 CH_4 吸收能力较弱 (von Fischer *et al.*, 2009)。另外,有研究表明,白蚁在代谢过程中会产生一定的 CH_4 ,在土地利用变化过程中,有些植物的种植会吸引更多的白蚁进而增加土壤 CH_4 的产生量 (Ishizuka *et al.*, 2005)。土地利用转变过程中,植被类型的改变能够影响 CH_4

向大气传输的传输速率,通气良好的植被类型有助于土壤 CH_4 的传输 (Chanton *et al.*, 1992)。

3.3 土地利用变化影响土壤 N_2O 通量的作用机理

土壤中 N_2O 的产生主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成。土地利用改变可以改变土壤有机质的类型,进而影响其有机氮的矿化速率,改变土壤 N_2O 排放 (Gelfand *et al.*, 2011)。转变前后土壤含水量的差异是影响土壤 N_2O 的排放量的主要原因之一,大量研究显示,在土壤饱和范围之内,土壤含水量与土壤 N_2O 排放量成线性关系,含水量大于土壤饱和度,土壤反硝化作用增强,大量 N_2O 生成 N_2 ,土壤 N_2O 排放量降低 (Melillo *et al.*, 2001; 郝庆菊, 2005)。表层土壤硝态氮的含量决定了土壤 N_2O 排放量的高低,而土地利用变化中 N 固定物种的种植能够改变植物的固定能力影响表层土壤硝态氮含量,进而影响土壤 N_2O 排放通量 (Melillo *et al.*, 2001)。氮肥的使用同时也能够改变土壤中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的含量以及两者的比例关系进而影响土壤中 N_2O 的排放,有研究表明,人工林土壤施氮肥的量达 $150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其土壤 N_2O 排放量能达到 $1.5 \sim 6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_2O 对温室气体的贡献率也会增加约 4% ~ 10% (Hergoualc'h & Verchot, 2013)。有研究指出,土壤含水量和地下水位理想状况下,土壤温度越高,土壤 C : N 越低,土壤 N_2O 排放越高 (Ball *et al.*, 2002)。人类活动能够增加土壤 N_2O 排放通量 (Kasimir-Klmedtsson *et al.*, 1997; Skiba *et al.*, 1998)。如在草原生态系统的研究表明,适度的管理措施能够降低土壤 N_2O 排放,适度放牧条件下,土壤 N_2O 通量低于较低强度和高强度的放牧措施 (王跃思等, 2001)。

4 结论与展望

长期以来,由于森林砍伐、草原放牧、湿地破坏以及森林、草地转化为农田等土地利用方式转变导致土壤中碳氮以温室气体的形式排放到大气中。森林的恢复能够增加土壤中碳氮固定能力,减少土壤温室气体排放。但是土地利用转变后土壤温室气体的排放通量不仅与转变过程有关,转变之前的土地利用、转变后的管理措施等都能影响土壤温室气体排放通量。且由于土地利用转变过程中,影响土壤温室气体排放通量的不确定因素较多,目前人们对土地利用转变影响土壤温室气体排放机理研究较少并且机理认识不够清晰。因此,土地利用转变对土

壤温室气体排放及其作用机理的研究仍需进一步深入。未来的研究需关注以下几点:

1) 对土地利用转变的综合增温效应研究。目前在全球范围内已有许多原位观测实验测定了土地利用转变前后土壤温室气体排放通量,但是现在大部分研究得到的仅仅是观测出了 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的通量数据,并不能清楚估算出土地利用转变前后综合增温效应变化情况。如湿地的恢复能够增加土壤 CH_4 排放量,减少土壤 CO_2 排放量,其综合增温效应有待进一步研究(Yamulki *et al.*, 2013)。

2) 加强对土地利用转变过程中土壤温室气体通量的机理研究。由于土地利用转变过程导致土壤理化性质和土壤微生物改变,目前研究主要针对的是转变前后土壤理化性质的变化,而对土壤微生物的改变研究很少。土壤理化性质的研究仅能解释土壤温室气体排放差异的表象,利用分子生物学和微生物学研究土地利用转变过程中微生物的数量、种类、活性等因素的变化与土壤温室气体排放的关系才能从本质上解释其作用机理。

3) 延长通量观测周期和增加观测频率。当前的研究缺乏长时间尺度下不同土地利用下土壤温室气体排放通量的观测,大部分的观测周期都是3年之内;而且观测频率较低,大部分的研究观测频率基本都是大于1周一次的(Merino *et al.*, 2004; 宋长春等, 2006)。而目前的观测数据表明,土壤温室气体排放与气候年际变化和植物生长这些不确定因素有很大的关系(Takakai *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2006), 长期和高频率的观测能够估算出土地利用转变过程不同气候特性、不同生长阶段土壤温室气体排放的影响,有助于准确估算区域上土地利用转变后土壤温室气体的排放量。

参考文献

陈广生, 田汉勤. 2007. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, **31**(2): 189–204.
陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 2009. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响. 环境科学, **30**(10): 2858–2864.
褚金翔, 张小全. 2006. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. 生态学报, **26**(6): 1693–1700.
雷波. 2008. 闽江河口湿地不同土地利用方式下甲烷排放研究(硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.
李克让. 2002. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社.
李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 2004. 农垦对温带草地生态

系统 CO_2 、 CH_4 、 N_2O . 中国农业科学, **37**(12): 1960–1965.
盛浩, 李旭, 杨智杰, 等. 2010. 中亚热带山区土地利用变化对土壤 CO_2 排放的影响. 地理科学, **30**(3): 446–451.
宋长春, 王毅勇, 王跃, 等. 2006. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化. 地理科学, **26**(1): 82–86.
王德宣. 2010. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究. 湿地科学, **8**(3): 220–224.
王跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 2001. 农垦与放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的影响. 环境科学, **22**(6): 7–13.
张东秋, 石培礼, 张宪洲, 等. 2005. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, **10**(7): 778–783.
张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 2005. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, **25**(11): 2884–2887.
张容娟, 布乃顺, 崔军, 等. 2010. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响. 生态学报, **30**(24): 6698–6706.
Achard F, Eva HD, Mayaux P, *et al.* 2004. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**: 1–11.
Ball BC, McTaggart IP, Watson CA. 2002. Influence of organic ley-arable management and afforestation in sandy loam to clay loam soils on fluxes of N_2O and CH_4 in Scotland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **90**: 305–317.
Carlisle EA, Steenwerth KL, Smart DR. 2006. Effects of land use on soil respiration: Conversion of oak woodlands to vineyards. *Journal of Environmental Quality*, **35**: 1396–1404.
Chanton JP, Whiting GJ, Showers WJ, *et al.* 1992. Methane flux from *Peltandra virginica*: Stable isotope tracing and chamber effects. *Global Biogeochemical Cycles*, **6**: 15–31.
Cheng JZ, Lee XQ, Zhou ZH. 2013. Nitrous oxide emissions from different land use patterns in a typical karst region, Southwest China. *Chinese Journal of Geochemistry*, **32**: 137–145.
Davidson EA, Verchot LV, Cattaneo JH, *et al.* 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, **48**: 53–69.
Feigl BJ, Steudler PA, Cerri CC. 1995. Effects of pasture introduction on soil CO_2 emissions during the dry season in the state of Rondônia, Brazil. *Biogeochemistry*, **31**: 1–14.
Fernandes SAP, Bernoux M, Cerri CC, *et al.* 2002. Seasonal variation of soil chemical properties and CO_2 and CH_4 fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon. *Geoderma*, **107**: 227–241.
Flechard CR, Ambus P, Skiba U, *et al.* 2007. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **121**: 135–152.

- Flechard CR, Neftel A, Jocher M, *et al.* 2005. Bi-directional soil/atmosphere N_2O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices. *Global Change Biology*, **11**: 2114–2127.
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, *et al.* 2005. Global consequences of land use. *Science*, **309**: 570–574.
- Gelfand I, Zenone T, Jasrotia P, *et al.* 2011. Carbon debt of Conservation Reserve Program (CRP) grasslands converted to bio-energy production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**: 13864–13869.
- Goreau TJ, Demello WZ. 1988. Tropical deforestation: Some effects on atmospheric chemistry. *Ambio*, **17**: 275–281.
- Gregorich EG, Rochette P, VandenBygaart AJ, *et al.* 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soil and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, **83**: 53–72.
- Grünzweig JM, Sparrow SD, Chapin FS, *et al.* 2003. Impact of forest conversion to agriculture on carbon and nitrogen mineralization in subarctic Alaska. *Biogeochemistry*, **64**: 271–296.
- Guo JF, Yang YS, Chen GS, *et al.* 2010. Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China. *Plant and Soil*, **333**: 249–261.
- Hadi A, Inubushi K, Purnomo E, *et al.* 2000. Effect of land-use changes on nitrous oxide (N_2O) emission from tropical peat lands. *Global Change Science*, **2**: 347–358.
- Hansen JE, Lacis AA. 1990. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change. *Nature*, **346**: 713–719.
- Hergoualc'h K, Verchot LV. 2013. Greenhouse gas emission factors for land use and land-use change in Southeast Asian peatlands. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, DOI: 10.1007/s11027-013-9511-x
- Hergoualc'h KA, Verchot LV. 2012. Changes in soil CH_4 fluxes from the conversion of tropical peat swamp forests: A meta-analysis. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, **9**: 93–101.
- Hooijer A, Page S, Jauhiainen J, *et al.* 2011. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands: Reducing uncertainty and implications for CO_2 emission reduction options. *Biogeosciences Discussions*, **8**: 9311–9356.
- Houghton RA, Hobbie JE, Melillo JM, *et al.* 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO_2 to the atmosphere. *Ecological Monographs*, **53**: 235–262.
- Houghton RA. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B*, **55**: 378–390.
- Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, *et al.* 2003. Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peat lands located in coastal area of South Kalimantan. *Chemosphere*, **52**: 603–608.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ishizuka S, Tsuruta H, Murdiyarso D. 2002. An intensive field study on CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions from soils at four land-use types in Sumatra, Indonesia. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**: 1049–1060.
- Ishizuka SH, Iswandi A, Nakajima Y, *et al.* 2005. The variation of greenhouse gas emissions from soils of various land-use/cover types in Jambi Province, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **71**: 17–32.
- Jiang CS, Wang YS, Hao QJ, *et al.* 2009. Effect of land-use change on CH_4 and N_2O emissions from freshwater marsh in Northeast China. *Atmospheric Environment*, **43**: 3305–3309.
- Kasimir-Klemedtsson L, Berglund K, Martikainen P, *et al.* 1997. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: A review. *Soil Use Management*, **13**: 245–250.
- Keller M, Reiners WA. 1994. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles*, **8**: 399–409.
- Keller M, Veldkamp E, Weitz AM, *et al.* 1993. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. *Nature*, **365**: 244–246.
- Lemus R, Lal R. 2005. Bioenergy crops and carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **24**: 1–21.
- Liu H, Zhao P, Lu P, *et al.* 2008. Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **124**: 125–135.
- Liu J, Jiang PK, Wang HL, *et al.* 2011. Seasonal soil CO_2 efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, **262**: 1131–1137.
- Livesley SJ, Kiese R, Miehle P, *et al.* 2009. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Global Change Biology*, **15**: 425–440.
- Maljanen M, Liikanen A, Silvola J, *et al.* 2003. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 1–12.
- Mariela F, Claudia H, Jorge E, *et al.* 2012. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO_2 emissions. *Plant and Soil*, **355**: 183–197.
- Melillo JM, Steudler PA, Feigl BJ, *et al.* 2001. Nitrous oxide emissions from forests and pastures of various ages in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**: 34179–34188.
- Menyailo OV, Hungate BA, Abraham WR, *et al.* 2008. Changing land use reduces soil CH_4 uptake by altering biomass and activity but not composition of high-affinity methanotrophs. *Global Change Biology*, **14**: 2405–2419.

- Merino A, Pérez-Batallón P, Macías F. 2004. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**: 917–925.
- Monti A, Barbanti L, Zatta A, *et al.* 2012. The contribution of switchgrass in reducing GHG Emissions. *Global Change Biology: Bioenergy*, **4**: 420–434.
- Murdiyarso D, Hergoualc'h K, Verchot LV. 2010. Opportunities for reducing greenhouse gas emissions in tropical peatlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**: 19655–19660.
- Ojima DS, Valentine DW, Mosier AR, *et al.* 1993. Effect of land use change on methane oxidation in temperate forest and grassland soils. *Chemosphere*, **26**: 675–685.
- Paul KI, Polglase PJ, Nyakuengama JG, *et al.* 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, **168**: 241–257.
- Prinn RD, Cunnold R, Rasmussen P, *et al.* 1990. Atmospheric emissions and trends of atmospheric nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **95**: 18369–18385.
- Reay DS, Nedwell DB, McNamara N, *et al.* 2005. Effect of tree species on methane and ammonium oxidation capacity in forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 719–730.
- Salimon C, Davidson EA, Victoria RL, *et al.* 2004. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. *Global Change Biology*, **10**: 833–843.
- Sall SN, Masse D, Ndour NYB, *et al.* 2006. Does cropping modify the decomposition function and the diversity of the soil microbial community of tropical fallow soil? *Applied Soil Ecology*, **31**: 211–219.
- Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, *et al.* 2008. Use of U. S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**: 1238–1240.
- Skiba UM, Sheppard LJ, MacDonald J, *et al.* 1998. Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland. *Atmospheric Environment*, **32**: 3311–3320.
- Smith KA, Dobbie KE, Ball BC, *et al.* 2000. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils: Comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, **6**: 791–803.
- Stedler PA, Melillo JM, Feigl BJ, *et al.* 1996. Consequence of forest-to-pasture conversion on CH₄ fluxes in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **101**: 18547–18554.
- Takakai F, Morishita T, Hashidoko Y, *et al.* 2006. Effects of agricultural land-use change and forest fire on N₂O emission from tropical peat lands, Central Kalimantan, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, **52**: 662–674.
- Tang XL, Liu SG, Zhou GY, *et al.* 2006. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, **12**: 546–560.
- Tate KR, Ross DJ, Saggart S, *et al.* 2007. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrub land and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. *Soil Biology & Biochemistry*, **39**: 1437–1449.
- Verchot LV, Davidson EA, Cattânio JH, *et al.* 2000. Land use change and biogeochemical controls of methane fluxes in soils of eastern Amazonia. *Ecosystems*, **3**: 41–56.
- Verchot LV, Davidson EA, Cattfinio JH, *et al.* 1999. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, **13**: 31–46.
- von Fischer J, Butters G, Duchateau PC, *et al.* 2009. In situ measures of methanotroph activity in upland soils: A reaction-diffusion model and field observation of water stress. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, DOI: 10.1029/2008JG000731
- Weitz AM, Veldkamp EM, Keller J, *et al.* 1998. Nitrous oxide, nitric oxide, and methane fluxes from soils following clearing and burning of tropical secondary forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **103**: 28047–28058.
- Wiseman PE, Seiler JR. 2004. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, **192**: 297–311.
- Wuthrich C, Schaub D, Weber M, *et al.* 2002. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. *Catena*, **48**: 201–215.
- Yamulki S, Anderson R, Peace A, *et al.* 2013. Soil CO₂ CH₄ and N₂O fluxes from an afforested lowland raised peatbog in Scotland: Implications for drainage and restoration. *Biogeosciences*, **10**: 1051–1065.

作者简介 刘慧峰,女,1990年生,硕士研究生,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: liuhuifeng08@163.com

责任编辑 王 伟
