

湿地碳循环研究综述

胡启武^{1,2}, 吴琴^{1,2}, 刘影^{1,2}, 李晓峰^{1,2}, 尧波¹, 钟中罡¹, 卢伍山³

1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022; 2. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;
3. 江西师范大学科学技术学院, 江西 南昌 330022

摘要: 湿地由于其巨大的碳库储存能力而成为碳循环研究的热点之一。从湿地CO₂/CH₄释放时空格局, CO₂/CH₄释放影响因素, 碳“源”“汇”评估及人类活动影响四个方面综述了国内外湿地碳循环方面的研究工作。认为当前对湿地碳排放过程各种潜在的影响因素比较清楚, 但碳排放过程各种影响因子之间存在的交互作用有待于进一步深入研究。在进行不同湿地类型碳循环研究的同时, 应加强包括微生物、植物根系等地下碳动态研究, 加强碳、氮耦合研究。在评估人类活动对湿地碳循环的影响过程中, 要综合考虑植被碳库、土壤碳库及土壤碳排的变化。另外, 无论从认识不同湿地类型碳过程特征及机理的角度, 还是从减少全球或区域碳收支估测不确定性的角度来看, 加强数据缺乏地区的湿地类型的碳平衡及相关碳过程的研究都具有重要意义。

关键词: 湿地; 碳循环; 碳库; 二氧化碳 (CO₂); 甲烷 (CH₄)

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2381-06

自工业革命以来, 大气CO₂含量已经从280×10⁶上升到2005年的379×10⁶, CH₄含量从715×10⁹上升到1 774×10⁹ [1]。由于温室气体排放而造成的气候变暖很可能带来严重后果, 如冰川消退、海平面上升、荒漠化、生态系统功能改变等。为此, 各国政府在国家尺度上对碳“源”“汇”特征与碳平衡估算及CO₂/CH₄减排与增汇的研究都给予高度的重视, 而《京都议定书》的签署和生效无疑进一步推动了碳循环研究的热潮。

湿地由于其巨大的碳库储存能力而成为碳循环研究的热点之一。一般而言, 湿地由于较低的有机质分解速率和较高的生产力而成为重要的碳汇 [2]。然而, 在进行大尺度的评估时却存在着极大的不确定性。以全球天然湿地CH₄释放为例, 不同学者的估计相差甚远, Cao 等 [3] 估计为92 Tg·a⁻¹, Walter 等 [4] 的估计则为260 Tg·a⁻¹, IPCC所发布的最佳估计也在100~231 Tg·a⁻¹ [1]。之所以产生如此大的差异, 一个很重要的原因就在于不同区域、不同类型湿地CH₄排放空间分异、以及随时间的动态变化信息极为缺乏。当前, 在气候变化背景下, 气温升高或水文条件改变对湿地碳循环过程具有怎样的影响? 湿地中储存的大量有机碳对气候变化会产生怎样的反馈, 是继续充当碳“汇”的角色还是转变成碳“源”? 碳“汇”大小是否发生变化? 要回答上述问题, 关键就在于全面弄清不同湿地类型的碳排放时空格局、碳过程控制因子, 以及对不同湿地类型的碳平衡加以评估。本文通过综述全球不同区域开

展的湿地碳循环相关研究工作, 以期深入理解和认识湿地碳过程及其控制因子, 湿地固碳功能及其变化, 气候变化、人类活动对湿地碳循环的影响, 为利用湿地进行碳减排提供参考依据。

1 湿地CO₂/CH₄释放时空格局

湿地面积仅占地球陆地面积的2%~3%, 但其储存的碳库却占到陆地土壤碳库 (1 395 Pg C) 的18%~30% [5,6]。湿地碳循环过程中无论是净CO₂交换通量(NEE)、生态系统呼吸还是土壤呼吸都存在明显的日变化和季节变化规律 [7,8]。在全球尺度上, Jungkunst 等 [9] 对74°30' N~2°10' S之间不同气候带湿地温室气体释放进行了综述, 其结果表明生态系统呼吸、土壤呼吸均存在极大的空间变异, 以土壤呼吸为例, 其变化范围为1.0~21.0 g·m⁻²·d⁻¹, 最高值和最低值相差21倍。在局地尺度上, 同一湿地类型不同观测地点 (例如, 不同物种分布区) 生态系统呼吸, 以及与大气之间CO₂净交换通量均存在着显著的季节差异与年内差异 [10-13]; 即使在同一观测地点, 其CO₂净交换通量也存在显著的年际差异 [14-16]。

湿地除了储存大量有机碳(SOC)和扮演大气CO₂“汇”的角色外, 还释放大量的CH₄, 其释放量占到全球CH₄释放总量的22%左右, 是全球CH₄的最大自然释放源 [17,18]。一般而言, 湿地CH₄排放的高峰期在夏季, 而春天和秋天CH₄排放量相对较低 [19,20]。例如, 我国辽河三角洲湿地、三江平原湿地CH₄释放的峰值都落在7—8月 [21,22]。但地处热带的海南红树林, CH₄排放峰值却出现在春季, 夏季次之, 冬

基金项目: 国家自然科学基金项目(40803022); 国家科技支撑项目(2007BAB23C04); 江西师范大学青年成长基金项目

作者简介: 胡启武(1979年生), 副教授, 博士, 主要从事生态系统碳、氮循环研究。E-mail: huqiwu1979@gmail.com

收稿日期: 2009-10-17

季最低^[23]。全球CH₄排放最活跃的地区是泥炭沼泽分布的北纬40°~70°的温带和北方地区,以及森林沼泽分布的10°N~10°S之间的热带地区,其中北方湿地可占全球CH₄排放总量的18%~38%^[24,25]。在我国,王德宣等^[26]比较了若尔盖高原湿地与三江沼泽湿地的CH₄排放,其结果显示三江平原常年积水沼泽湿地CH₄排放量是若尔盖高原常年积水沼泽湿地CH₄排放量的4.7倍左右。即使在同一块湿地中,不同物种分布区的CH₄通量也是不同的^[26,27]。不同学者对中国天然湿地CH₄排放量的估计约为1.7~2.2 Tg·a⁻¹^[28-31],进行不同类型自然湿地的CH₄通量以及影响因子的观测,是准确评估中国自然湿地CH₄排放量的关键所在^[32]。

2 湿地CO₂/CH₄释放影响因子

研究表明,温度、水位和基质质量(Substrate availability)是影响湿地土壤CO₂/CH₄释放最重要的三个因子。例如,较高的温度能促进土壤微生物的活性,导致较高的CO₂排放^[33,34]。Q₁₀值被广泛应用于评价土壤或生态系统呼吸对于温度的响应^[35,36],不同区域湿地类型生态系统呼吸的Q₁₀值不一致,其中北方湿地Q₁₀值范围为1.6~4.1^[37,38],青藏高原湿地的Q₁₀值则在2.0~8.9之间^[13]。我国东北三江平原地区典型湿地土壤矿化分解的Q₁₀值在2.0~3.6之间^[39]。温度同样也控制着CH₄的产生和氧化^[24]。大多数情形下,温度对CH₄净排放的影响取决于温度的增加如何影响净生态系统生产力(NEP)以及湿地的水分状况,因为NEP是产甲烷细菌的底物来源,而湿地的水分状况决定了湿地的有机质是厌氧还是好氧分解^[40]。Chapman等^[41]基于苏格兰两块湿地CH₄排放与温度之间的关系预测了分别增温1.5℃,2.5℃,4.5℃,CH₄的排放量将分别增加17,30,60%^[41];Cao等^[2]的模拟结果也表明增温2.0℃,CH₄排放将增加19%。进一步的研究表明:CO₂/CH₄释放对温度的响应还受到基质质量的控制,一般来说,较高的基质质量对高温的响应更为敏感^[42,43]。水位是影响湿地CO₂/CH₄排放通量大小及方向的重要因素^[44,45],当水面下降到湿地基底表面以下时,土壤有机质分解释放CO₂的速率增加,从而导致湿地碳损失的增加。一些研究报道当湿地水面下降或处于低水位时,湿地变成了碳源^[45-47]。

此外,物种组成的改变及植物生产力的变化通过光合作用和呼吸作用直接影响湿地CO₂释放动态,从而引起湿地生态系统碳平衡的变化^[40,48]。而植物对CH₄释放的影响亦引起了人们的广泛关注,湿地植物群落特征,如密度、物种组成等都对CH₄的产生、氧化和传输3个过程产生影响,从而增加或减少CH₄从湿地的排放^[40,49]。最近有报道说植物

自身能够产生CH₄,虽引起极大争议,却增加了植物对CH₄释放影响研究的复杂性^[50,51]。

3 湿地碳“源”“汇”评估及碳过程模拟

迄今为止,全球湿地碳平衡研究大部分集中于北方湿地,这一地区湿地大约95%属于泥炭地,研究表明,北方泥炭地自全新世以来的平均碳累积速率大约为C 20~35 g·m⁻²·a⁻¹,其中苔藓泥炭地(bogs)的碳累积速率要高于一般泥炭地^[2,52]。尽管年内碳汇强度较小,但长期的积累使得北方湿地的碳储量占据到全球土壤碳储量的将近1/3^[2]。近年来,随着涡度相关技术的成熟,使得直接测定湿地生态系统与大气之间净CO₂交换通量成为可能,Corradi等^[53]通过比较45°~79°N北方湿地地区利用涡度相关技术连续观测一年以上的观测点数据,得出北方湿地的平均碳汇大小为C(44±34) g·m⁻²·a⁻¹。在对湿地碳平衡的评估中,由于数据缺乏,CH₄排放往往容易被忽略。然而,CH₄排放是湿地碳平衡的重要组成部分^[53,54]。在一项跨越亚北极(Subarctic)到亚热带不同湿地类型的研究中,Whiting等^[55]发现湿地生态系统一天中固定的碳(NEP)大约3%以CH₄的形式重新释放到大气中;而Rinne等对一处北方泥炭湿地(Fen)的研究则表明,一年中固定的C超过20%以CH₄的形式释放到大气中^[56]。Wickland等^[57]对位于南洛基山一处湿地的研究显示,综合考虑CO₂和CH₄,该湿地变成了碳源;同样,在考虑了CH₄通量及CH₄的增温潜势后,其它一些地区的湿地也纷纷变成了碳源^[53,58]。模型一直是人们研究有机碳长期变化的重要手段,20世纪70年代后,国际上一些学者开始着手湿地碳循环模型的建立与研究工作。目前应用于湿地模拟的模型主要有两类,一类是以湿地的形成演替为基础,反映湿地沉积物的沉积速率模型,如经典的泥炭增长模型以及在此基础上修正的模型等^[59,60]。另一类是模拟生态系统生物地球化学循环的生物地球化学循环模型,如DNDC模型^[61],以及Century模型^[62]等在湿地生态系统中的应用,主要用于模拟植被、枯枝落叶和土壤有机质各库之间以及库内部的碳、氮循环过程及动态。

4 人类活动对湿地碳循环影响

人类活动引起的土地利用变化造成的碳排放对于大气CO₂含量增加的贡献仅次于化石燃料的燃烧,大约占到1/4的比例^[1],1850-2000年近150年间,全球由于土地利用变化而导致的碳排放多达C156 Gt^[63]。将湿地转变为耕地是人类活动对于湿地的重大影响,也是常见的土地利用类型的改变方式,过去几个世纪,许多湿地由于园艺、能源或农业生产目的而被排干或开垦^[64,65],我国东北三江沼泽湿地的开垦及长江中下游地区的“围湖造田”就是

很典型的例子。据不完全统计，新中国成立以来长江中下游地区有 1/3 以上的湖泊面积被围垦，围垦总面积超过 1.3 万 km²，因围垦而消亡的湖泊达 1 000 余个^[66]。

人类活动干扰了湿地生态系统正常的物质循环过程，尤其是湿地开垦为农田后，植物残体及沉积泥炭分解速率提高，碳的释放量增加，改变了湿地生态系统的碳循环模式。研究表明泥炭湿地由于排水农用等原因导致每年向大气排放的碳达到 C 160~250 Tg·a⁻¹^[67,68]。我国三江平原沼泽湿地垦殖后加速了土壤有机质的分解和土壤呼吸通量的增大，垦后农田 8—9 月土壤平均呼吸通量是天然沼泽湿地的 6 倍^[69]。而湿地开垦为农田后，CH₄ 释放速率则有所下降^[70]。

湿地开垦为农田后，自然植被被农作物替代，一方面造成植物生产力的变化，另一方面，由于有机质输入的减少、有机质分解的加速、土壤有机碳物理保护的降低以及土壤侵蚀等作用，通常会呈现土壤有机碳储量的降低^[71,72]。其影响强度取决于农田耕作深度、强度和频度，平均而言，由于耕作的影响，土壤表层碳储量会减少 25%~30%^[71,72]。而且这种碳损失在耕作后几年即可检测出来，在耕作 20 年左右达到最高^[71]。湿地开垦后，水文条件、植物类型、结构及生产力等相应发生较大变化，土壤生态环境也随之产生显著变化。研究表明，未被干扰的湿地的储碳量是将湿地排干农用的 2 倍^[73]。我国三江平原沼泽湿地土壤有机碳含量随湿地开垦年限的增加而降低，开垦初期 5~7 年，土壤有机碳变化幅度较大，持续耕作 15~20 年后，土壤有机碳损失曲线趋于相对稳定^[69]。其它地区湿地开垦后土壤有机碳的变化也呈现相同或相似的变化规律^[74,75]，但湿地开垦为旱地后土壤有机碳含量和碳密度要显著低于开垦为水田^[75]。

土壤有机质 (SOM) 库由连续的不同分解阶段的有机物组成，包括腐殖质、半分解有机残体和微生物及其排泄物。按照密度可将 SOM 分为游离态轻组 (free light fraction)、包裹态轻组 (intra-aggregate light fraction) 和重组 (heavy fraction)。按照 SOM 在土壤结构中的分布，可分为溶解性有机质 (DOM)、游离态颗粒有机质 (free POM)、闭蓄态颗粒有机质 (occluded POM) 和矿质结合态有机质 (IOM)^[76]。其中，轻组有机质、溶解性有机质以及微生物量碳属于土壤有机质的活性组分，其周转速率快，周转时间短，是反映土壤碳动态的敏感性指标^[77]。研究表明，沼泽湿地开垦耕作不仅导致土壤有机碳含量的迅速降低，而且有机碳组分也发生了很大的变化，其中，游离态轻组有机碳所占比

例明显下降，而重组有机碳所占比例逐渐增加，有机碳在重组中相对富集，造成土壤有机碳的可利用性下降^[78]。

5 研究展望

当前，对湿地碳排放过程各种潜在的影响因素比较清楚，但碳排放过程各种影响因子之间存在怎样的交互作用有待于进一步深入研究。全球气候变暖，湿地水文、植被发生变化，土壤微生物群落、养分状况亦发生相应变化，在进行不同湿地类型碳循环研究的同时，应加强包括微生物、植物根系等地下碳动态研究，加强碳、氮耦合研究。

在评估人类活动对湿地碳循环的影响研究中，要注意外源性物质输入 (如氮、磷) 对湿地碳过程的影响，需综合考虑区域水热条件差异、湿地类型差异，以及湿地开垦用途 (旱地或水田) 差异等对湿地开垦过程中土壤碳变化的影响，同时，综合考虑植被碳库、土壤碳库及土壤碳排放来研究湿地开垦后固碳功能的变化。

中国湿地类型多、分布广，总面积达 6 594 万 hm²，居世界第四位^[79]。自 20 世纪 90 年代以来一些学者相继开始了对中国天然湿地 CO₂/CH₄ 释放的野外观测和研究^[8,13,21,22,27,28,30-32]。但这些研究主要集中在低温区域的湿地类型 (例如我国的青藏高原和三江地区)，无论从认识不同湿地类型碳过程特征及机理的角度，还是从减少全球或区域碳收支估测不确定性的角度来看，加强数据缺乏地区的湿地类型的碳平衡及相关碳过程的研究都具有重要意义。

湿地具有巨大的碳库储存能力，为全球碳减排提供了潜在的空间。由于人类活动、气候变化等原因，湿地正面临面积不断萎缩、功能不断退化的威胁，为了最大限度的发挥湿地固碳潜能，需做到以下几点：

(1) 减少人类活动对湿地的干扰、破坏，加大退田还湖、还沼的力度，通过营造生态保护林和水源涵养林，防止水土流失，减少河湖淤积。严格控制湿地周边的污染源、污染物数量和排污途径，对受污染和退化的湿地，要有计划地开展恢复和重建工作，逐步恢复湿地功能。

(2) 加强湿地管理与保护，建立完善的管理机制，实行统一规划、统筹安排、统一管理，杜绝湿地管理混乱的局面。同时，要制定相应法律法规，健全相关法律体系。合理开发、利用湿地资源，调整产业结构，改变沿湖居民对湖泊、湿地资源的依赖状况，减轻资源环境承载压力。积极引导和开发生态产业，大力扶持清洁、安全、健康的产业，提倡发展循环经济。

(3) 深入开展宣传教育活动，提高公众的生态

保护意识和资源忧患意识, 树立全民生态文明观, 形成湿地生态保护全民参与的新理念。

参考文献:

- [1] IPCC 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [2] GORHAM E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. Ecological Applications, 1991, 1: 182-195.
- [3] CAO M K, GREGSON K, MARSHALL S. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(19): 3293-3299.
- [4] WALTER B P, HEIMANN M, MATTHEWS. Modeling modern methane emissions from natural wetlands I. Model description and results[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D24): 34189-34206.
- [5] Kimble J, Birdsie R, Lal R. The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003: 311-331.
- [6] SMITH L C, MACDONALD G M, VELICHKO A A, et al. Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the Early Holocene[J]. Science, 2004: 303, 353-356.
- [7] 李兆富, 吕宪国, 杨青. 湿地土壤CO₂通量研究进展[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 47-50.
LI Zhaofu, LV Xianguo, YANG Qing. A review on wetland soil CO₂ flux[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(6): 47-50.
- [8] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤CO₂和CH₄排放动态及影响因素[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 1-6.
SONG Changchun, YANG Wenyan, XU Xiaofeng, et al. Dynamics of CO₂ and CH₄ concentration in the mire soil and its impact factors[J]. Environmental Science, 2004, 25(4): 1-6.
- [9] JUNGKUNST H F, FIEDLER S. Latitudinal differentiated water table control of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from hydromorphic soils: feedbacks to climate change[J]. Global Change Biology, 2007, 13: 2668-2683.
- [10] ALM J, TALANOV A, SAARNIO S, et al. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland[J]. Oecologia, 1997, 110: 423-431.
- [11] ARNETH A, KURBATOVA J, KOLLE O, et al. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes[J]. Tellus, 2002, 54B: 514-530.
- [12] GLENN A J, FLANAGAN L B, SYED K H, et al. Comparison of net ecosystem CO₂ exchange in two peatlands in western Canada with contrasting dominant vegetation, Sphagnum and Carex[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140: 115-135.
- [13] HIROTA M, TANG Y H, HU Q W, et al. Carbon dioxide dynamics and controls in a deep-water wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecosystems, 2006, 9: 673-688.
- [14] LAFLEUR P M, ROULET N T, BUBIER J L, et al. Interannual variability in the peatland-atmosphere carbon dioxide exchange at an ombrotrophic bog[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17: 1036.
- [15] AURELA M, LAURILA T, TUOVINEN J P. The timing of snow melt controls the annual CO₂ balance in a subarctic fen[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L16119.
- [16] SAGERFORS J, LINDROTH A, GRELE A, et al. Annual CO₂ exchange between a nutrient poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 2008: 113.
- [17] MATTHEWS E, FUNG I. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area and environmental characteristics of sources[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1987, 1: 61-86.
- [18] BARTLETT K B, HARRIS R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands[J]. Chemosphere, 1993, 26: 261-320.
- [19] SAARNIO A, ALM J, SILVOLA J, et al. Seasonal variation in CH₄ emissions and production and oxidation potentials at microsites on an oligotrophic pine fen[J]. Oecologia, 1997, 110: 414-422.
- [20] SAARNIO S, SAARINEN T, VASANDER H, et al. A moderate increase in the annual CH₄ efflux by raised CO₂ or NH₄NO₃ supply in boreal oligotrophic mire[J]. Global Change Biology, 2000, 6: 137-144.
- [21] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 等. 芦苇湿地温室气体甲烷排放研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1494-1497.
HUANG Guohong, XIAO Duning, LI Yuxiang, et al. CH₄ emissions from the reed wetland[J]. Acta Ecologica Science, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [22] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 若尔盖高原沼泽湿地CH₄排放研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 877-880.
WANG Dexuan, LV Xianguo, DING Weixin, et al. Methane emission from Marshes in Zoige Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(6): 877-880.
- [23] 叶勇, 卢昌义, 林鹏. 海莲红树林土壤CH₄动态研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9: 91-95.
YE Yong, LU Changyi, LIN Peng. CH₄ dynamics in sediments of Bruguiera sexangula Mangrove at Hegang Estuary[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9: 91-95.
- [24] CRILL P, BARTLETT K, ROULET N. Methane flux from boreal peatlands[J]. Suo, 1992, 43: 173-182.
- [25] 丁维新. 沼泽湿地及其不同利用方式下甲烷排放机理研究[D]. 博士学位论文. 中国科学院研究生院: 南京土壤研究所. 2003.
DING Weixin. Mechanism of methane emission from the mire and cultivated mire soils[D]. Doctoral Dissertation, Graduate University. 2003.
- [26] 王德宣, 丁维新, 王毅勇. 若尔盖高原与三江平原沼泽湿地CH₄排放差异的主要环境影响因素[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 63-67.
WANG Dexuan, DING Weixin, WANG Yiyong. Influence of major environmental factors on difference of methane emission from Zoige Plateau and Sanjiang plain wetlands[J]. Wetland Science, 2003, 1(1): 63-67.
- [27] HIROTA M, TANG Y H, HU Q W, et al. Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 737-748.
- [28] 王明星, 戴爱国, 黄俊. 中国CH₄排放量的估算[J]. 大气科学, 1993, 17(1): 52-64.
WANG Mingxing, DAI Aiguo, HUANG Jun. Sources of methane in China: Rice fields, agricultural waste treatment, cattle, coal mines, and other minor sources[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1993, 17(1): 52-64.
- [29] KHALIL M A K, SHEARER M J, RASMUSSEN R A. Methane sources in China: historical and current emissions[J]. Chemosphere, 1993, 26: 127-142.
- [30] 金会军, 吴杰, 程国栋, 等. 青藏高原湿地CH₄排放评估[J]. 科学通报, 1999, 44: 1758-1762.
JIN Huijun, WU Jie, CHEN Guodong, et al. wetland methane emission evaluation on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 1999, 44: 1758-1762.
- [31] DING W X, CAI Z C, WANG D X. Preliminary budget of methane

- emissions from natural wetlands in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 751-759.
- [32] DING W X, CAI Z C. Methane emission from natural wetlands in China: Summary of years 1995-2004 studies[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 475-486.
- [33] CRILL P M, BARTLETT K B, WILSON J O, et al. Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 1564-1570.
- [34] FROLKING S, CRILL P. Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire: measurement and modeling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8: 385-397.
- [35] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B: 81-90.
- [36] BOONE R D, VAN SLYCKEN J, STEVEN D. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, 396: 570-572.
- [37] BUBIER J L, CRILL P M, MOORE T R, et al. Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland complex[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 703-714.
- [38] BUBIER J L, BHATIA G, MOORE T R, et al. Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada[J]. *Ecosystems*, 2003, 6: 353-367.
- [39] 杨钙仁, 张文菊, 童成立, 等. 温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 243-248.
YNAG Gairen, ZHANG Wenju, TONG Chengli, et al. Effects of temperature on the mineralization of organic carbon in sediment of wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 243-248.
- [40] CHRISTENSEN T R, EKBERG A, STRÖM L, et al. Factors controlling large scale variations in methane emission from wetlands[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 1414.
- [41] CHAPMAN S J, THURLOW M. The influence of climate on CO₂ and CH₄ emissions from organic soils[J]. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79: 205-217.
- [42] VALENTINE D W, HOLLAND E A, SCHIMEL D S. Ecosystem and physiological controls over methane production in northern wetlands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 1563-1571.
- [43] UPDEGRAFF K, PASTOR J, BRIDGHAM S, et al. Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5: 151-163.
- [44] MOORE T R, ROULET N T. Methane flux: water table relations in northern wetlands[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 587-590.
- [45] OECHEL W C, VOURLITIS G L, HASTINGS S J, et al. The effect of water table manipulation and elevated temperature on the CO₂ flux of wet sedge tundra ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 77-90.
- [46] ALM J, SCHULMAN L, WALDEN J, et al. Carbon balance of a boreal bog during a year with an exceptionally dry summer[J]. *Ecology*, 1999, 80(1): 161-174.
- [47] SHURPALI N J, VERMA S B, KIM J, et al. Carbon dioxide exchange in a peatland ecosystem[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D7): 14319-14326.
- [48] JOHANSSON T, MALMER N, CRILL P M, et al. Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 2352-2369.
- [49] DING W X, CAI Z C, TSURUTA H. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 3199-3207.
- [50] Keppler F, Hamilton J T G, Brass M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions[J]. *Nature*, 2006, 439: 187-191.
- [51] DUECK T A, DE VISSER R, POORTER H, et al. No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants: a ¹³C-labelling approach[J]. *New Phytologist*, 2007, 175: 29-35.
- [52] TOLONEN K, TURUNEN J. Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change[J]. *Holocene*, 1996, 6: 171-178.
- [53] CORRADI C, KOLLE O, WALTER K, et al. Carbon dioxide and methane exchange of north-east Siberian tussock tundra[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1910-1925.
- [54] SUYKER A E, VERMA S B, ARKEBAUER T J. Season-long measurements of carbon dioxide exchange in a boreal fen[J]. *Journal Geophysical Research*, 1997, 102: 29021-29018.
- [55] WHITING G J, CHANTON J P. Primary production control of methane emissions from wetlands[J]. *Nature*, 1993, 364: 794-795.
- [56] RINNE J, RIUTTA T, PIHLATIE M, et al. Annual cycle of methane emission from a boreal fen measured by the eddy covariance technique[J]. *Tellus*, 2007, 59B: 449-457.
- [57] WICKLAND K P, STRIEGL R G, MAST A, et al. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996-1998[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 321-335.
- [58] FRIBORG T, SOEGAARD H, CHRISTENSEN T R, et al. Siberian wetlands: where a sink is a source[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: 2129.
- [59] CLYMO R S. Models of peat growth Clymo[J]. *Suo*, 1992, 43: 127-136.
- [60] YU Z C, CAMPBELL I D, VITT D H, et al. Modelling long-term peatland dynamics. I. Concepts, review, and proposed design Clymo[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 145: 197-210.
- [61] LI C S, ABER J, STANGE F, et al. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 2. Sensitivity analysis and validation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 4385-4398.
- [62] PARTON W J, STEWART W B, COLE C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109-131.
- [63] HOUGHTON R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management[J]. *Tellus*, 2003, 55B: 378-390.
- [64] ARMENTANO T V, MENGES E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74: 755-774.
- [65] BRIDGHAM S D, MEGONIGAL J P, KELLER J K, et al. The carbon balance of north American wetlands[J]. *Wetlands*, 2006, 26(4): 889-916.
- [66] 姜加虎, 黄群, 孙占东. 长江流域湖泊湿地生态环境状况分析[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 424-429.
JIANG Jiahu, HUANG Qun, SHUN Zhandong. Analysis of ecological environment of lake-wetland in Yangtze River basin[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 424-429.
- [67] ARMENTANO T V, MENGES E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74: 755-774.
- [68] MALTBY E, IMMIRZI P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils, regional and global perspectives[J]. *Chemosphere*, 1993, 27: 999-1023.

- [69] 宋长春, 王毅勇, 阎百兴, 等. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 150-154.
SONG Changchun, WANG Yiyong, YAN Baixing, et al. The changes of the soil hydrothermal condition and the dynamics of C, N after the Mire Tillage[J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 150-154.
- [70] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 三江平原沼泽湿地与稻田CH₄排放对比研究[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 500-503.
WANG Dexuan, LV Xianguo, DING Weixin, et al. Comparison of methane emission from marsh and paddy field in Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(4): 500-503.
- [71] DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils[J]. Biogeochemistry, 1993, 20: 161-193.
- [72] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and landuse change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6: 317-327.
- [73] WYLYNKO D. Prairie wetlands and carbon sequestration. Assessing sinks under Kyoto Protocol[R]. Winnipeg, 1999: 12-13.
- [74] 田昆, 常凤来, 陆梅, 等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 681-686.
TIAN Kun, CHANG Laifeng, LU Mei, et al. Impacts of human disturbances on organic carbon and nitrogen in Napahai Wetlands, Northwest Yunnan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 681-686.
- [75] 林凡, 李典友, 潘根兴, 等. 皖江自然湿地土壤碳密度及其开垦为农田后的变化[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 192-197.
LIN Fan, LI Dianyou, PAN Genxing, et al. Organic carbon density of soil of wetland and its change after cultivation along the Yangtze River in Anhui Province, China[J]. Wetland Science, 2008, 6(2): 192-197.
- [76] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.
PENG Xinhua, ZHANG Bin, ZHAO Qiguo. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.
- [77] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504.
ZHANG Jinbo, SONG Changchun. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(4): 500-504.
- [78] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 857-859.
ZHANG Jinbo, SONG Changchun, YANG Wenyan. Effect of cultivation on organic carbon composition in a histosol in the Sanjiang Plain, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 857-859.
- [79] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展和展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120.
YANG Yongxing. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research[J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 111-120.

A review of carbon cycle in wetlands

HU Qiwu^{1,2}, WU Qin^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, LI Xiaofeng^{1,2}, YAO Bo¹, ZHONG Zhonggang¹, LU Wushan³

1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research (Ministry of Education), Jiangxi Normal University, Nanchang, 330022, China;

3. School of Science and Technology, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Great concerns were focused on wetland carbon cycle due to its large carbon stock. This study reviewed the internal and international wetland carbon cycle researches, including the temporal and spatial patterns of wetland CO₂/CH₄ emissions, the impact factors on wetland CO₂/CH₄ release, wetland carbon source or sink assessment, as well as the impacts of anthropogenic activity on wetland carbon cycles, respectively. Results showed that various potential impact factors on wetland CO₂/CH₄ release were understood. However, further studies on the interaction of these factors were needed. Moreover, researches on underground carbon dynamics and the interaction of carbon and nitrogen should be strengthened. When evaluating the influences of anthropogenic activity on carbon cycle in wetland, vegetation carbon stock, soil carbon stock and soil carbon emission should be integratively considered. Additionally, more carbon cycle researches should be conducted in areas where no data is available. which will help to not only understand the mechanism involved in carbon processes, and carbon sink or source function of various wetland types, but also reduce uncertainty in regional or global carbon budget assessment.

Key words: wetland; carbon cycle; carbon stock; CO₂; CH₄