

全球气候变化中的滩涂湿地土壤有机碳研究

严金龙, 丁 成, 韩香云, 陈天明, 全桂香

(盐城工学院 化学与生物工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:湿地生态系统的碳循环正在成为全球变化与陆地生态系统碳循环研究中的一大热点。湿地在稳定全球气候变化中占有重要地位,其重要性主要表现在湿地土壤是陆地上重要的有机碳库;土壤碳密度高;能够相对长期地储存碳,湿地是多种温室气体的源和汇。全球沿海湿地的分布面积大约为20.3万 km^2 ,碳的积累速度为 $\text{C}(210 \pm 20) \text{ g/m}^2 \cdot \text{年}$,要远远高于泥炭湿地;并且沿海湿地大量存在的 SO_4^{2-} 离子阻碍了甲烷的产生量,从而降低了甲烷的排放量。高的碳积累速率和低的甲烷排放量使沿海湿地对大气温室效应的抑制作用更加明显。盐城沿海滩涂芦苇沼泽地虽已列入世界重点湿地名录,但其有机碳循环及其分布特点尚未有资料报道。通过研究沿海滩涂湿地土壤有机碳储存变化及其空间分布规律,从微团聚体水平的有机碳转化与结合机制上研究土壤对有机碳的固定机制,对于了解湿地土壤有机碳的储存特点及其与陆地生态系统碳循环的关系,为评价和保护湿地生态系统提供依据具有重要的科学意义。

关键词:湿地;土壤有机碳;碳循环

中图分类号:X17

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2009)01-0001-05

全球变暖是当前全球气候变化研究中的主要论题,大气中 CO_2 、 CH_4 和其它温室气体浓度升高导致的全球气候变化是人类共同关注的问题,是世界经济可持续发展和国际社会所面临的最为严峻的挑战。全球碳循环和碳收支是当前气候变化和区域可持续发展研究的核心之一,也是当前一系列大型国际合作科学研究计划的主题之一。对全球和区域碳循环的深入研究,不仅可为认识和控制全球气候变化提供理论基础,而且与地球生态系统的其它自然过程(水循环、养分循环、生物多样性等)及人类的生存环境与社会的发展、能源、工农业等息息相关。因此自20世纪60年代以来,定量研究温室气体的全球收支平衡特别是全球碳循环研究一直是全球变化研究的热点与难点问题^[1,2]。碳素循环的特点基本上反映了生态系统物质循环的总体特征。因此,精确地测定不同陆地生态系统表面的碳通量,在区域范围内揭示和深刻理解碳的源汇过程,具有重大科学意义

和实践意义^[3-9]。

1 湿地生态系统中的碳循环进展

1.1 湿地生态系统及其固碳作用

湿地生态系统与陆地、海洋不同,它是陆地与水域之间水陆相互作用形成的特殊的自然综合体。根据《湿地公约》的定义,湿地包括了所有的陆地淡水生态系统,如河流、湖泊、沼泽,以及陆地和海洋过渡地带的滨海湿地生态系统,同时还包括了海洋边缘部分咸水、半咸水水域。全球湿地面积约有570万 km^2 ,约占地球陆地面积的6%。湿地同陆地、海洋相比面积相对小,但湿地生态系统支持了全部淡水生物群落和部分盐生生物群落,具有极其特殊的生态功能,是地球上最重要的生命支持系统。

随着全球陆地生物圈碳循环研究的兴起,国际社会对湿地这一特殊类型生态系统的碳循环过程与特征研究逐渐开始重视。湿地土壤和泥炭是

收稿日期:2008-10-13

基金项目:江苏省高校自然科学基金资助(08KJB210002)

作者简介:严金龙(1971-),男,江苏盐城人,副教授,南京农业大学在职博士生,主要研究方向为污染生态学及全球气候变化下的土壤碳固定和存储。

陆地上重要的有机碳库;土壤碳密度高;能够相对长期地储存碳;湿地是多种温室气体的源和汇。生态系统通过光合作用和呼吸作用同大气交换二氧化碳与氧气,维持着大气中二氧化碳与氧气的动态平衡。和森林、海洋一样,湿地也具有吸纳碳的作用,而且湿地吸纳碳的能力远远强于森林和海洋。湿地由于水分过饱和和具有厌氧的生态特性,微生物活动相对较弱,植物残体分解释放二氧化碳的过程十分缓慢。因此,形成了富含有机质的湿地土壤和泥炭层,积累了大量的无机碳和有机碳,起到了固定碳的作用。据国际上典型科学研究,单位面积湿地的固碳作用是森林、海洋的 9 倍。如果湿地遭到破坏,湿地的固碳功能将减弱,同时湿地中的碳也会氧化分解,湿地将由“碳汇”变成“碳源”,将大大加剧全球气候变暖的进程。

1.2 湿地碳库研究进展

目前关于沿海及水体类型的湿地的碳循环研究较少,而对泥炭地、森林和农业用地中的湿地类型的碳循环研究较多,但其碳循环过程并没有完全认识清楚。一个典型的湿地生态系统至少应当具有底部土壤、水体介质和生活在介质中的有机体,并且具有完整的营养级结构、能量流动和物质循环链条。自然界的物质循环均由实体和过程组成,湿地的碳循环也不例外。一般来说,它一方面包含了碳库,另一方面又包含碳库之间的碳通量。碳库之间的碳通量变化是由许多物理、化学和生物过程引起的。作为实体的湿地碳库可以区分出 3 种碳库类型:活生物区碳库、碎屑碳库(多由动植物残体组成)和被溶解气体碳库(即水溶无机碳库)。同理,湿地碳循环的过程也可分为生物过程、物理/化学过程和分解过程(后者大部分为生物分解,也有小部分的物理和化学分解)。碎屑碳库是目前湿地中最大的有机碳库,远远超过湿地中细菌、浮游生物、动植物区系有机碳量。

对全球湿地碳库总量的估计,说法不一。据加拿大 1998 年国家碳汇报告估计,湿地占了全球陆地面积的 6%,占全球陆地生物圈总碳库量的 14%。Zhang^[10]等认为,湿地占有全球陆地表面面积的 3% 弱,但其碳库储量占陆地碳库总储量的 15%~30%。而吕宪国、何岩等^[11]在陈宜瑜主编的《中国湿地研究》一书中给出的数字是湿地占陆地碳库总储量的 15%。联合国粮农组织(FAO)世界森林状况 2001 年度报告,综合了 Dixon 和 Schlesinger 的研究^[12],认为湿地仅占全球陆

地生物圈碳总量的 7%,全球陆地生物圈碳库总量为 2 200 Pg,则湿地碳库总量为 154 Pg。

尽管湿地在全球变化中有很重要的作用,但它的作用并没有被充分了解。目前比较清楚的是湿地消失、湿地转为农业用地和湿地退化都将释放大量的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等其它温室气体。与全球变化有关的许多环境变化对湿地有很重要的影响,如海平面上升、温度升高、降水模式的变化、海洋流和风的影响;某些地区热带风暴可能增加,降水强度增大、降水量增多都将使湿地水体的沉积物增多;水文循环变化将影响内陆湿地等等^[13]。湿地对全球变化有直接的影响,人们对湿地在碳贮存中究竟为碳源还是碳汇的问题有很大的兴趣。用各种方法来研究湿地生态系统中碳循环过程,以了解不同湿地类型如自然湿地、恢复湿地和人为建立的湿地在全球生物圈碳源或碳汇中的作用具有重要意义。

2 滩涂湿地资源与碳循环研究

2.1 滩涂湿地碳循环特征

沿海滩涂湿地也具有很高的固碳能力,全球沿海湿地的分布面积大约为 20.3 万 km^2 ,而沿海湿地的碳的积累速度为 $\text{C}(210 \pm 20) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$,要远远高于泥炭湿地^[14]。沿海湿地每年碳的固定量为 $\text{C}(42.6 \pm 4.0) \text{ Tg}$,并且沿海湿地大量存在的 SO_4^{2-} 离子阻碍了甲烷的产生量,从而降低了甲烷的排放量^[15]。高的碳积累速率和低的甲烷排放量使沿海湿地对大气温室效应的抑制作用更加明显。为了防止海岸线侵蚀和固定沉积物的生态服务功能而进行的沿海湿地的恢复,对于恢复湿地的固碳能力也有重要的意义。恢复湿地的植物碳库发展比较快,互花米草群落地上生物量只需要 1~3 年就可以与自然湿地相似,地下生物量需要 3~5 年就可以恢复^[16]。Craft 认为新建湿地的营养循环更加开放,有更多的 N 的积累所以植物生物量增长比较快^[17]。但在土壤固碳功能上,由于土壤微生物群落的发展要滞后于生产者,有机质的积累需要更长的时间才能恢复到自然湿地的水平。根据 220Pb 测得的 $\text{C} 40 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$,并且恢复和创造湿地的地上和地下生物量的分解速度和自然湿地也比较接近^[18],所固定的碳的组成也有别于自然湿地相对于作参照的自然湿地可溶碳 36%~53%、木质素 24%~44%。在恢复时间 < 20 年的湿地里固定的碳含有更多的可

溶性碳 54% ~ 62%, 较少的木质素 14% ~ 34%, 这说明恢复湿地中植物根系分泌物的作用更加突出而自然湿地包含更多的死根^[18]。从固碳角度看含有更多可溶碳的恢复湿地的固碳效率要低于自然湿地。人工湿地的用途是为了去除污染物, 同时也可以积累碳。人工湿地的处理对象主要是有机废水市政污水和农田废水碳的输入, 包括外源有机废水和内源植物和微生物的残体。输出是碳的分解和流出的水所携带的碳, 据观测可以固定 63% ~ 96% 的输入的碳并且有机质形态也非常稳定有机质的积累提供了一个长期的碳汇。

2.2 盐城滩涂湿地资源

湿地生态是盐城最具开发潜力的世界级旅游资源, 面积 45 万多 hm^2 , 占江苏省滩涂总面积的 7/10, 全国的 1/7, 已列入世界重点湿地名录, 被誉为“东方湿地之都”。盐城的海岸线绵延 580 多 km, 占江苏省海岸线全长的 2/3, 海岸滩涂面积达 45 多万 hm^2 , 有 379 种鸟类、281 种鱼(贝)类、590 种昆虫, 47 种哺乳类动物, 还有 490 种各类植物。滩涂上的丹顶鹤、黑鹳、金雕和麋鹿、獾、獐等 67 种珍禽兽被列为国家一、二级重点保护野生动物。据初步测算, 盐城的湿地面积约占盐城总面积的 20%。沿海的 45 多万 hm^2 海涂湿地拥有两个国家级自然保护区, 是太平洋西海岸亚洲大陆边缘面积最大、原始生态保持最完好的海岸型湿地, 世界野生丹顶鹤和麋鹿种群数的 60% 和 25% 生活在这里, 被列为世界重点湿地保护区。丹顶鹤每年 10 月中下旬从东北迁徙到南方越冬, 盐城沿海滩涂芦苇沼泽地是世界上最大的丹顶鹤越冬地, 也是我国丹顶鹤的第二故乡。每年来此越冬的丹顶鹤约达 1 200 只左右, 约为世界总量的 60%。盐城大丰麋鹿自然保护区, 占地约 2 700 hm^2 。1986 年, 39 头麋鹿从伦敦回归祖国, 至今已繁殖到千余头, 现已成为世界上最大的野生麋鹿种群。但是在湿地开发过程中, 由于不合理的土地开发和利用, 湿地生态退化, 如生物多样性的丧失, 资源利用和保护环境的可持续协调发展十分重要。

2.3 滩涂湿地土壤有机碳潜在研究方向

土壤对有机碳的固定作用实际上应该是易变形态成为难变形态, 生物可利用形态成为不可利用形态。因此, 土壤中有有机碳与土壤粒子的结合可能受土壤中有有机-无机-生物的相互作用特点所制约。土壤有机碳固定中团聚体保护机制可能

说明有机碳的固定效应。因此, 需要从微团聚体水平的有机碳转化与结合机制上研究土壤对有机碳的固定机制, 并探讨促进其固定的技术措施。何云峰等提出采用不同的络合浸提剂提取土壤中和不同黏土矿物结合的腐殖质, 与不同酸性土壤用碱性焦磷酸钠提取的结合态腐殖质的稳定性相似, 可能意味着这些土壤的结合态腐殖质的化学特点类似, 化学保护机制相同^[19]。土壤中有有机物质具有不同的化学形态、物理形态, 因而使它们与土壤物质表现出不同的结合特点^[20, 21]。土壤中不同形态的活性碳主要包括水溶性碳(DOC)、易氧化碳、可矿化碳、微生物量碳、活性碳。土壤 DOC 由一些从简单到复杂的胡敏酸和富里酸分子组成, 可以作为微生物生长和生物分解速效养分资源的一个指标; 易氧化碳、可矿化的碳及微生物量碳均可作为土壤活性有机碳的指示因子。易氧化碳、微生物量碳的变化多用于指示土壤有机质的早期变化。大量研究^[21-24]表明, 土壤易氧化碳和 DOC 分别与总有机碳量呈显著的线性正相关, 二者同时也与土壤微生物量碳呈显著的线性正相关, 土壤的易氧化碳和可矿化碳有较好的相关性。土壤微生物量碳与土壤有机碳相关, 土壤 DOC 的含量与 CH_4 产生量显著相关, 增加淹水土壤水溶性有机碳含量可以增加 CH_4 生成量。因此, 可根据不同形态碳之间的相关关系来进一步研究有机碳的固定和循环机制及对全球环境影响的意义。

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元, 是土壤的重要组成部分, 对土壤的许多物理化学性质有重大影响^[25-26]。Puget 等^[19]发现小团聚体中的有机碳较大团聚体中的有机碳老化, 而有机碳的含量, 尤其是新形成的有机碳更易受利用方式的影响^[20-23]。土壤团聚体有机碳分配是土壤中的重要地球化学性质之一。由于土壤团聚体是土壤的重要物质基础, 关于有机碳在团聚体的分布及其变化备受关注。土壤中有有机碳与土壤粒子的结合可能受土壤中有有机-无机-生物的相互作用特点所制约。土壤有机碳固定中团聚体保护机制可能说明有机碳的固定效应。潘根兴等^[27, 28]对太湖地区水稻土红壤旱地和江淮丘陵旱地土壤的研究发现有机碳积累量与 2000 ~ 250 μm 团聚体有机碳含量密切相关因此, 需要从团聚体水平的有机碳转化与结合机制上研究土壤对有机碳的固定机制。迄今为止, 对土壤团聚体有机碳分布的

研究主要集中于森林土壤^[28]、旱地土壤^[29]和有机物料处理后的土壤^[30],以及不同施肥处理对红壤水稻土不同发生层团聚体组成及团聚体有机碳分布的影响等^[31],而湿地土壤团聚体报道甚少,盐城沿海滩涂湿地有机碳循环及其分布特点尚未

有资料报道。通过研究沿海滩涂湿地土壤有机碳储存变化及其空间分布规律,了解湿地土壤有机碳的储存特点及其与陆地生态系统碳循环的关系,进一步为评价和保护湿地生态系统提供参考依据具有重要的科学意义。

参考文献:

- [1] Parish F, Looi C C. Wetlands, biodiversity and climate change. Opinions and needs for enhanced linkage between the Ramsar conventions on wetland[R]. Convention on biological diversity and UN framework convention on climate change. Tokio, 1999.
- [2] Mauquoy D, Engelkes T, Groot M H M, et al. High-resolution records of late Holocene climate change and carbon accumulation in two north-west European ombrotrophic peat bogs[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 186: 275-310.
- [3] 李海涛, 沈文清, 刘琪, 等. 湿地生态系统的碳循环研究进展[J]. *江西科学*, 2003, 21(3): 180-167.
- [4] 许信旺, 潘根兴. 中国水稻土碳循环研究进展[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 961-966.
- [5] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定的建议[J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 100-109.
- [6] Waddington J M, Griffis T J, Rouse W R. Northern Canadian wetlands: net ecosystem CO₂ exchange and climatic change[J]. *Climate Change*, 1998, 40: 267-275.
- [7] Frohling S, Roult N T, Moore T R, et al. Modeling Northern peatland decomposition and peat accumulation[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 479-498.
- [8] IPCC (International Panel of Climate Change). Land use, Land-use Change, and Forestry[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2000.
- [9] Schelesinger H W, Nalaeisac E A, Smith H. Carbon budget estimates for reservoirs on the Columbia River in British Columbia[J]. *The Environmental Professional*, 1997, 19: 48-57.
- [10] Zhang Y, Li C, Trettin C C. Modelling soil carbon dynamics of forested wetlands[C]. Symposium 43. Carbon Balance of Peatlands Sponsor. International Peat Society. 1999.
- [11] 吕宪国, 何岩, 杨青. 湿地碳循环及其在全球变化中的意义[M]//陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [12] Schellhase H U, MacIsaac E A, Smith H. Carbon budget estimates for reservoirs on the Columbia River in British Columbia[J]. *The Environmental Professional*, 1997, 19: 48-57.
- [13] Vitt D H, Halsey L A, Bauer I E, et al. Spatial and temporal of carbon sequestration in peatlands of continental western Canada through the Holocene[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2000, 37: 683-693.
- [14] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal saline wetland soils[J]. *Global Biogeochemistry cycles*, 2003, 17, doi: 10.1029/2002GB001917.
- [15] Choi Y, Wang Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radiocarbon measurements[J]. *Global Biogeochemical cycles*, 2004, 18, doi: 10.1029/2004GB002261.
- [16] Broome S W, Seneca E D, Woodhouse W W. Long-term growth and development of transplants of the salt-marsh grass *Spartina alterniflora*[J]. *Estuaries*, 1986, 9: 63-74.
- [17] Craft C B. Dynamics of nitrogen and phosphorus retention during wetland ecosystem succession[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 1997, 4: 177-187.
- [18] Craft C, Stephen B, Campbell C. Fifteen years of vegetation and soil development after brackish-water marsh creation[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10: 248-258.
- [19] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle size fractions of water stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595-605.
- [20] Six J, Elliot E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivation and native grassland

- soils[J]. Soil Science Soc. Am. J., 1998, 62: 1 367 - 1 377.
- [21] Chan K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management[J]. Soil Use and Management, 2001, 17: 217 - 221.
- [22] Xu Q F, Xu J M. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. Pedosphere[J]. 2003, 13(3): 271 - 278.
- [23] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义[J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(1): 51 - 57.
- [24] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性[J]. 科技通报, 2000, 11(6): 421 - 426.
- [25] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422 - 429.
- [26] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81 - 85.
- [27] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16 - 19.
- [28] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤团聚体及其有机碳的变化[J]. 土壤通报, 2000, 31(5): 193 - 195.
- [29] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 15 - 21.
- [30] 赵兰坡, 杨学明, 路立平, 等. 长期连作玉米的黑钙土风沙土中有机-无机复合体组成及有机碳分布的特征[J]. 土壤通报, 1996, 27(3): 120 - 123.
- [31] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F, et al. Fertilization effects of soil organic matter turnover and corn residue C storage[J]. Soil Sci Soc. Am. J., 1996, 60: 472 - 476.
- [32] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土及微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2 961 - 2 966.

Global Climate Change and Research of Soil Organic Carbon in Coastal Wetland

YAN Jin-long, DING Cheng, HAN Xiang-yun, CHEN Tian-ming, QUAN Gui-xiang

(School of Chemical and Biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: Global climate cycle and carbon balance are one of the cores of current research in climate change and regional sustainable development, also one of the topics in a series of large-scale international cooperation in scientific research. One of the highlights in global change and terrestrial ecosystem research is on carbon cycle in wetland ecosystem. Wetland soil is the source and sink of various green gas and important pool of organic carbon with high carbon density and long-term of storage. The distribution area of global coastal wetland is approximately $203 \times 10^3 \text{ km}^2$, and the accumulation rate of carbon in coastal wetland is $210 \pm 20 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ which is much higher than peat wetlands. Methane's emission is also inhibited due to the large amount of SO_4^{2-} ions in coastal wetland soil. Hence, it's more obvious of the inhibition effect on green gas emission in coastal wetland. Although Yancheng coastal wetland is induced in the list of world key wetlands of international importance, the characterization of organic cycle and distribution of soil organic carbon are still no reports. It's essential for us to study on the changes of organic carbon storage in wetland soil and its distribution in soil profiles, it's also important for us to understand the relationship between carbon storage and carbon cycle in terrestrial ecosystem, and to provide scientific basis for evaluation and protection coastal wetland ecosystem.

Keywords: wetland; soil organic carbon; carbon cycle

(责任编辑:范大和;校对:张英健)