

文章编号:1000-0615(2012)05-0794-07

DOI:10.3724/SP.J.1231.2012.27761

· 碳汇渔业与渔业低碳技术专题 ·

内陆渔业生态系统的碳循环特征及碳汇机制

杨 健*, 苏彦平, 刘洪波, 戈贤平

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081)

摘要: 渔业是水体生态系统中惟一可控的有效增汇产业, 碳汇渔业是水体生态系统中惟一的“碳汇产业”。为了更好地把握内陆渔业生态系统碳循环及碳汇机制的特征, 目前的重点研究应包括内陆渔业水域生态环境(包括自然水域和池塘)中碳循环的规律, 碳赋存形态的归转, 各类水产品生物对碳汇的贡献途径和份额以及相应的计量体系和评价模型等; 同时, 希望合理地估算及测定内陆渔业水体、水-气界面间 CO_2 通量, 把握内陆渔业水域生态系统碳源/碳汇的动态, 进而构建内陆渔业水域生态系统的环境碳/生物碳/碳通量时空变化的信息库。

关键词: 内陆渔业; 生态系统; 碳循环; 碳汇

中图分类号: Q 178.1; S 917

文献标志码: A

碳汇(carbon sink)是指任何天然和人工系统从空气中清除 CO_2 的过程、活动、机制^[1-2]。近年来, 中国水产科学研究院黄海水产研究所唐启升院士创新性地提出和倡导大力发展碳汇渔业的理念, 并指出渔业具有碳汇功能; 凡不需投饵的渔业生产活动, 就具有碳汇功能, 可能形成生物碳汇, 亦可称为碳汇渔业^[3]。这一理念使水产科研人员能从一个新的角度更全面地考虑各领域(如养殖方式^[4]、资源利用技术^[5]、加工方式^[6]、节能减排技术^[7]等)的重要性、增长点和发展方向。与此相应, 笔者认为内陆渔业碳汇应该指通过渔业生产活动促进水生生物吸收水体中的 CO_2 , 并通过收获把这些碳移出水体的过程和机制。因此, 内陆碳汇渔业就应该指通过涉渔生产的方式充分发挥和人为促进渔业生物的碳汇功能, 从而直接或间接降低大气、水体 CO_2 浓度的人类活动。内陆水域中浮游植物等通过光合作用吸收固定 CO_2 , 并转化为有机碳。其相当的部分可被滤食性和草食性的大宗渔业生物(如鱼类、贝类)所摄食, 使碳在食物网中迁移、固定, 并从水域生态

系统中移出。因此, 内陆碳汇渔业不仅能在提供大量优质的水产品食物方面, 同时也能在固定(形成碳汇)和移除(碳提取)水域生态系统中的碳方面起到重要作用。由于相关的研究相对薄弱, 近期不仅迫切需要系统开展内陆渔业水域生态环境(包括自然水域和池塘)中碳循环的规律, 碳赋存形态(如碳酸盐系统的 CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^- , H_2CO_3 等、溶解态有机碳、生物体有机碳及残体颗粒碳)的归转及其生态学效应, 各类水产品生物对碳汇的贡献途径和份额以及与上述研究领域相适应的计量体系和评价模型等基础性研究; 同时, 也希望尽早合理地估算及测定内陆渔业水体、水-气界面间 CO_2 通量, 把握内陆渔业水域生态系统中点一面尺度的碳源和碳汇的动态体系及汇/源的溯源和预测, 进而构建内陆渔业水域生态系统的环境碳/生物碳/碳通量时空变化的信息库。本研究尝试对国内外相关的一些学术观点、方法和经验进行综述, 以期为进一步拟开展的内陆渔业生态系统碳循环特征及碳汇机制的研究奠定基础并提供借鉴。

收稿日期: 2011-10-10

修回日期: 2011-12-26

资助项目: 现代农业产业技术体系专题资金资助(CARS-46); 国家人力资源和社会保障部高层次留学人才回国工作资助项目(2-115084)

通讯作者: 杨 健, E-mail: jiany@ffrc.cn

1 碳汇和内陆渔业碳汇

大气中温室气体浓度增加引起的全球环境变化, 严重地威胁着人类生存与社会经济的可持续发展, 成为各国政府、科学家及公众强烈关注的重大环境问题。大气中二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等温室气体质量浓度的上升而导致的增温效应是人类面临的最严峻的全球环境问题之一。CO₂ 的温室效应约占总温室效应权重的 50%^[8]。研究全球碳循环和碳管理是全球碳收支定量评价和气候变化国际谈判的科学基础。研究全球碳循环调控机制与碳管理战略与技术已经成为全世界共同关注的重大科学问题, 也是各国履行《全球气候变化框架公约》的迫切需求。当前, 气候变化正对世界各国产生日益重大而深远的影响, 受到国际社会的普遍关注。

全世界正在为如何能让平均表面温度的上升限制在比前工业社会水平高 2 °C 以下的水平(这个数字被广泛认为是一个极限, 超过了这个极限, 危险的气候变化的风险就会迅速增加)而努力。波茨坦气候影响研究所的 Meinshausen 等^[9]证明, 为了避免到 2100 年超过 2 °C 的温升, 全世界碳排放必须不能超过 9 000 亿 t。因此, 对人类来说, 碳排放将成为一个可能用尽的资源。各国的碳排放储备将是非常有限的。当生态系统固定的碳量大于排放的碳量, 该系统就成为大气 CO₂ 的碳汇; 反之, 则为碳源(carbon source)。因此, 通过增碳汇, 提高减排碳源潜力毫无疑问将具有重大意义。

我国高度重视气候变化问题。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》把能源和环境确定为科学技术发展的优先领域, 把全球环境变化监测与对策明确列为环境领域的优先主题之一; 《中国应对气候变化国家方案》明确提出要依靠科技进步和科技创新应对气候变化, 把科技工作作为国家应对气候变化的重大举措。2007 年 6 月 14 日科技部、发展改革委等 14 个部委联合发布了《中国应对气候变化科技专项行动》。2008 年 10 月底, 我国政府发布了《中国应对气候变化政策与行动》白皮书。

全球森林是 C 的贮存库, 为大气中 CO₂ 的重要碳汇。同样, 全球水循环亦可谓重要的 CO₂ 汇, 这个汇达到 0.8013 Pg C/a(约占人类活动排放 CO₂ 总量的 10.1%, 或占遗漏 CO₂ 汇的 28.6%), 却没有得

到应有的重视。它是由水对 CO₂ 的溶解吸收形成的, 并随着碳酸盐的溶解及水生植物光合作用对 CO₂ 消耗的增加而显著增加。这部分汇中有 0.5188 Pg C/a 通过海上降水(0.2748 Pg C/a)和陆地河流(0.244 Pg C/a)进入海洋, 有 0.158 Pg C/a 再次释放进入大气, 还有 0.1245 Pg C/a 储存在陆地水生生态系统中。因此, 净沉降非常巨大, 为 0.6433 Pg C/a, 为全球水循环净 CO₂ 的汇。陆地生态系统向水域生态系统输出的有机碳甚至可以和埋藏于森林土壤中的量相匹敌^[10]。

湿地生态系统可以按照内陆和海洋两部分划分, 其中内陆主要包括湖泊、河流、河滩、泥炭地和沼泽等, 海洋包括滩涂及近岸海域和盐沼地等。湿地在碳储存中起着重要作用。研究发现, 储存在不同类型湿地中的碳约占地球陆地碳总量的 15%^[11]。中国是湿地类型多、面积大、分布广的国家之一, 也是世界上生物多样性十分丰富的国家之一。内陆湖泊多属浅水富营养性湖泊, 浮游植物生产力高, 水生高等植物丰富, 有可能是未被发现的重要碳汇。初步研究显示, 湖泊对大气 CO₂ 的总汇(以 C 计)可达 5.32×10^7 t/a。作为重要水生生态系统的我国冬季洞庭湖、巢湖、洱海和滇池 24 h 均为大气 CO₂ 的汇, 其通量分别为 -23.78、-16.08、-24.38、-17.94 mg/(m²·h)^[8]。

内陆和沿海渔业均依赖于湿地。滨海湿地是深海和很多于水产品物种的繁育场所, 红树林和温带海岸湿地支撑着海洋水产养殖。内陆渔业, 包括捕捞和水产养殖, 当然也同样需要依靠健康的湖泊、河流和池塘。值得注意的事, 水产品生物在湿地环境生长、发育的同时亦在进行着碳的固定的过程[碳提取型渔业(extractive aquaculture)]^[12], 特别是组成贝类的贝壳、虾蟹类的甲壳和鱼类的骨骼等矿化固碳作用和经济养殖藻类的人为固碳和利用“取碳”作用等。我国大型经济藻类养殖产量每年为 120~150 万 t, 换算为固碳量为 36~45 万 t, 平均每年 40 万 t, 如果被吸收的碳全部从大气中获得, 则我国仅人工养殖经济海藻可多从大气中吸收 40 万 t 的碳, 可见人工养殖经济海藻这一措施对增加大气 CO₂ 的汇具有重要意义^[13]。海水或淡水中溶解的 CO₂ 被养殖贝类和虾蟹类利用, 变成不易分解的贝壳或外骨骼等 CaCO₃ 组织而加以永久“锁定”, 并可作为艺术品或建筑材料添加物加以利用。

Rodhouse 等^[14]计算出爱尔兰 Killary 海湾养殖的紫贻贝年碳吸收量为 10.8 t, 通过渔获可以单位去除水体 $0.008 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的 C, 相当于每年 $80 \text{ t}/\text{hm}^2$ 的 C。同时, 有目的地发展养殖贝类和虾蟹类养殖业, 不仅可以产生巨大的渔业经济效益, 加大水体吸收 CO_2 的能力, 强化碳汇功能, 还可具有赚取可观碳信用额度(carbon credits)或增加国家碳汇储备的潜力。另外, 贝类通过滤食摄取水体中的悬浮颗粒有机碳促进贝类个体软组织的生长的同时, 可有效地净化水质。其可食部分的碳被人类或其它动物利用后可转化成其骨骼亦可永久固定, 亦可制造“生物燃料(如生物乙醇、生物柴油)”; 同时, 其废弃部分还可制成生物肥料被植物或作物利用。张继红等^[15]报道 2002 年我国海水养殖的贝类和藻类利用浅海生态系统的碳可达 300 多万 t, 并通过收获从海中移出至少 120 万 t 的碳。刘慧等^[16]报道, 1999 年到 2008 年间, 我国海水贝藻养殖每年从水体中移出的碳量可达 $1.0\sim 1.37 \text{ Tg}$, 相当于每年移出 CO_2 4.4 Tg ; 10 年合计移出约 44 Tg CO_2 。这些结果为探讨全球“遗失的碳汇”(失汇)^[17]问题提供了新线索, 也证明了浅海的贝类和藻类养殖活动直接或间接地使用了大量的海洋碳, 提高了浅海生态系统吸收大气 CO_2 的能力。另外, 马尔代夫和塞舌尔等国家利用“矿物增长”(mineral accretion)技术建造新型固碳鱼礁, 即在人工鱼礁上通入低压直流电, 利用引起海水电解析出的碳酸钙等矿物附着在人工鱼礁上, 形成类似于天然珊瑚礁的生长过程, 在鱼礁不断增长的同时促进周围生物量的增长, 达到海岸带生物种群恢复和海岸带保护的日的^[18]。

内陆渔业为人类提供了大量的水产品食物, 对全球气候变化影响非常敏感且响应亦举足轻重; 但由于其在维持水域生态系统服务功能尚未得到足够的重视, 在这个角度上它似乎是一类“被遗忘”的渔业^[19]。内陆渔业及其生态系统有 3 个主要特点: (1) 大宗淡水鱼类和贝类是内陆渔业的主产品^[20]。在我国内陆渔业中内陆水产养殖品种以滤食性和草食性的鱼类和珍珠贝类为主, 在净化水质和作为“碳汇”在减轻和移除水体碳负荷方面可以产生显著的效果。以滤食性鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)为例, 鲢和鳙体质量每增加 1 kg, 可分别从水体中吸收碳 121.5 g 和 115.7 g。2009 年我国鲢鳙养殖产量分别为 348.4 万 t

和 243.4 万 t^[20], 仅鲢鳙养殖一项就可消除水体中的碳约 70.5 万 t, 对于净化水质和碳的减排具有重要作用。(2) 池塘养殖系统是内陆渔业最重要的生产模式^[21]。最新的研究发现^[22], 世界范围内约 11.1 万 km^2 的水产养殖池塘对全球碳的封存起着重要的作用。上述池塘的沉积物每年可封存(或埋藏)的量达 1 660 万 t, 占全球每年碳总排放量(80 亿 t)的 0.21%; 其中亚洲, 特别是占全球养殖池塘 55.9% 的中国所起的作用最为重要。这种被忽视, 但极为显著的池塘碳埋藏量甚至可以用作碳信用来充抵与水产养殖相关的碳排放量。(3) 内陆渔业的产量在世界年水产品总量中的份额在逐年增加, 显示出强劲的发展潜力, 其份额已从 2004 年占总产量的 16% 增加 2009 年的 22%^[21]。我国 2009 年内陆渔业的产量达 2 435 万 t(已占总产量的约 48%), 比 2008 年增长了 6%^[20]。内陆渔业对碳汇渔业的贡献已变得越来越明显和重要。

渔业是水体生态系统中唯一可控的有效增汇产业, 碳汇渔业是水体生态系统中唯一的“碳汇产业”。有理由认为, “碳汇渔业”(或“固碳渔业”)有可能成为未来包括内陆渔业在内的水产业的一个新的、重要的生长点和发展方向。另外, 世界上没有任何一个其它国家能像我国一样, 内陆渔业的产量几乎达到总产量的一半。因此, 深入研究内陆渔业水域生态系统碳汇/源的时空格局、与内陆渔业活动相关的温室气体排放和碳循环动态机制、渔业对我国碳收支增汇减排的作用以及相关的调控对策, 并建立相应的长期监测观察台站既具有鲜明的中国国情, 又意义重大, 且切实可行。这些工作无论是从渔业角度有效执行《中国应对气候变化科技专项行动》等国策, 还是对我国未来负责任渔业的发展, 以及从新的角度寻找“遗失的碳汇”等等方面都具有十分重要的意义; 完全应该作为我国应对气候变化国家科技总体行动中不可缺少的部分加以重视。

2 内陆渔业生态系统碳循环及碳汇渔业方面一些亟须研究的课题

2.1 内陆渔业生态系统碳循环的时空格局及其碳汇-源动态演变机制和碳循环的关键驱动因子

包括淡水在内的水生态系统中碳的总量可由各种不同赋存形态且相互转化的溶解或颗粒有机

或无机碳构成; 研究碳循环极强的动态性, 将有利于把握富营养化、酸化等水环境变化的趋势^[23]。同时, 鱼类资源的有效管理也需要掌握对水产品产出具有控制作用的因子(如给河流鱼类食物网提供能量的自养碳源植物等)的组成和贡献度^[24]。这些可以利用测定 $\delta^{13}\text{C}$ (计算式: $\delta^{13}\text{C}=[(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}/(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}]-1]\times 10^3$)的结果来确定(亦可结合 $\delta^{15}\text{N}$ 来综合分析)^[24-25]。气候变暖伴随着大量温室气体 CO_2 的释放。而 CO_2 在藻类光合生长中起到重要作用, CO_2 的供应有时甚至会限制藻类生物量增长速率^[26]。内陆水体生态系统是相关流域产生的各种赋存形态的碳最终汇集场所,也是大气 CO_2 的重要交换场所,但在全球碳循环的研究中未得到应有的重视。然而,必需引起广泛关注的是,内陆水体对人类活动排放碳源强烈的汇集;富营养化对其生产和分解过程的强力拉动;碳的迅速沉降、埋藏或转运,都可能使其碳汇功能或增汇作用十分活跃。比如,在淡水环境中,水华蓝藻本身具有高效吸收利用外源无机碳的功能,即无机碳浓缩机制(Ci-concentrating mechanism, CCM),大气中 CO_2 通过水—气界面与水交换从而溶解于淡水湖泊及海洋水体中提高其酸度^[27],但是这种影响会通过藻类快速繁殖时消耗大量 CO_2 从而再提高水体pH。在低浓度 CO_2 条件下,蓝藻持续增长则开始以水体中 HCO_3^- 作为其碳源^[28]。这样蓝藻 CO_2 浓缩机制的有效运转,能够使之在其所栖息的环境中最大限度地竞争利用有限的无机碳源保持持续稳定的生长。因此, CO_2 的释放再次加强了水华蓝藻的竞争优势。这些被固定下来的碳,可以通过食物链被转移到滤食性的鱼类和贝类体内,供其生长所用。这个过程间接增加了内陆水域生态系统的“碳汇”容量。

我国内陆水产养殖品种以滤食性和草食性的大宗淡水鱼类和珍珠贝类为主,在净化水质和作为“碳汇”在减轻和移除水体碳负荷方面效果显著。2009年,我国淡水水产品约218万 t的捕捞量(其中鱼类152万 t,甲壳类33万 t,贝类28万 t)和贝类(河蚌、螺、蚬)24万 t的养殖量^[20]。大部分淡水鱼类的碳含量超过50%,最高可以达到64.89%,淡水虾类在43%左右,贝类在40%左右^[29]。对水体碳的固定和移除作用不容忽视。近年来,中国水产科学研究院淡水渔业研究中心在太湖五里湖水域内,通过投

放鲢鳙和螺、贝类等滤食性生物,发挥其净化水质的生态功能,对减轻水体富营养化和增加水体碳汇等方面都取得了明显效果。

水体生态系统碳赋存形态、碳循环的时空格局及其碳汇/源动态演变机制和碳循环的关键驱动因子方面的研究较为复杂,难度较大。对我国第三大淡水湖——太湖的研究发现,太湖水体碳的碳赋存形态有溶解性无机碳(碳酸盐系统,包括 CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^- , H_2CO_3)、溶解性有机碳及生物机体碳。其主要形态为溶解性碳(特别是 HCO_3^- ,一般大于10 mg/L;溶解性有机碳, HCO_3^- 的1/3~1/2),颗粒状碳的含量相对较小;夏季水体上层、中间层和底层的总碳含量会有较大的变化;湖体各形态碳含量的空间分布受出入河流的影响明显;输入太湖的各形态碳有年周期性,枯水期低,丰水期高。对武汉东湖的研究发现,大型沉水植物占优势湖区的温室气体排放可明显低于浮游植物占优势的湖区,表明湖泊富营养化会导致水生植物的退化将加剧碳的释放,从而使湖泊成为更大的碳源^[30]。

我国在内陆渔业生态系统碳赋存量及形态、碳循环的时空格局及其碳汇/源动态演变机制和碳循环的关键驱动因子方面的研究尚显薄弱。因此,当前需要重点关注课题应该包括:渔业自身 CO_2 源与大气 CO_2 库的关系,渔业生态环境中的碳赋存形态(如碳酸盐系统、溶解态有机碳、生物体有机碳及残体颗粒碳)及其转化规律,内陆渔业生态系统碳汇及“泵”机制(如由于每年巨大渔获的碳移除及包括池塘在内的渔业环境中的碳封存,是否能将渔业活动作为水体碳循环类似于“物理泵”和“生物泵”的“渔业泵”来看待等),渔业生态系统在我国区域碳循环中的作用,适渔湿地碳循环的主要环节,渔业生态系统碳汇/源的关键过程等。

2.2 主要碳提取型渔业方式对我国碳收支的影响及人工调控机制

我国内陆以天然饵料为主的大宗淡水鱼、贝类捕捞渔业和养殖业不仅为人类社会提供了大量高品质、健康的食物和动物蛋白,同时又对减排大气 CO_2 作出很大的贡献,是一种双赢的产业。但对野生经济鱼类的捕捞,还需要了解这种碳负荷的移出将对生态系统碳循环可能的干扰作用、生态学效应及生态系统服务(ecosystem service)功能。研究发现,在南美奥尼诺科河一旦过量捕捉一种脂鲤

(*Prochilodus mariae*), 就将干扰这条河的碳循环, 导致上游有机碳含量上升450%, 而流向下流的碳含量显著下降, 这说明一些物种在河流生态系统的碳合成和降解循环过程中的作用至关重要^[31]。再有, 对美国威斯康辛州富营养化的两个湖泊的研究发现, 有着较多浮游动物食性鱼类(zooplanktivorous fish)的 Peter 湖为碳汇, 而有着较多食鱼性鱼类(piscivorous fish)的 West Long 湖则为碳源。其因为前者中浮游动物种群被抑制, 初级生产力较高; 而后者浮游动物对浮游植物产生巨大的摄食压力, 初级生产力降低, 呼吸作用导致可溶性 CO₂ 浓度增高。这说明鱼类组成将显著改变水体—空气间的碳通量(carbon flux), 进而影响湖泊等水体的生态系统服务功能^[32]。由于我国相关的研究尚相当薄弱, 当前需要重点关注课题应该有: 内陆主要碳提取型渔业方式(包括滤食性和草食性的鲤科鱼类和贝类的养殖、增殖放流、人工湿地、生物操纵、渔区“施肥”增汇等)的生产力和碳收支模型, 内陆碳提取型渔业、“矿物增长”渔业、节能减排渔业等主要“碳汇渔业”的生产力和碳收支模型, 水产品生物组织和器官的固碳、提高渔业产出和水体增汇的机制, “碳汇渔业”与生态系统水平水产养殖的关系及相关技术的开发。同时, 包括池塘养殖在内的各种主要渔业方式对我国、全球碳的封存/埋藏所作贡献的研究也有必要加以重视。今后, 也需要关注内陆渔业生态系统渔获物在“碳提取”和利用后返回自然界, 在其它生态系统中的转归、渔获移出与碳汇的关系的可持续性, 以及渔业生态服务功能与碳汇增加的有效性等关键问题。

2.3 渔业生态系统碳循环的计量方法学体系及温室气体排放研究和碳汇监测的数据信息系统和评价体系的构建

自20世纪60年代以来, 定量研究温室气体全球收支平衡专业的观察站已经建立, 如复旦大学的“全球碳通量东滩野外观测站”^[33]; 全世界有超过300个涡度通量塔在连续工作, 测定生态系统的 CO₂ 通量^[34]。内陆水体作为与全球碳循环密切相关的生态系统中的一类理应受到高度重视。借鉴陆地生态系统(如森林)碳汇的估算方法和经验, 我们近期需要努力的方向应该包括: 估算及测定渔业水体、水—气界面 CO₂ 通量的方法, 渔业生态系统中点—面尺度的碳源和碳汇的估算体系, 从观察点到

监测区域的各级碳通量响应及反馈监测网络, 3S集成技术的应用途径, 内陆渔业生态系统的水环境碳/生物碳/碳通量碳时空数据库和渔业生态系统的碳汇功能的生态效益评价和预测模型的构建, 野外内陆渔业生态系统高水平碳汇通量观测站的建设等。另外, 通过更有效地计量、评价和控制渔业活动(特别是养殖活动)直接或间接的化石燃料及其内含能量(embodied energy)的使用, 自然生态系统或农用地转用于渔业、渔业生物种群的呼吸及废物分解, 以及与渔业相关的土地及水体中的碳排放^[35], 毫无疑问将对包括 CO₂ 在内的温室气体的总排放和吸收量的控制起到重要作用。

参考文献:

- [1] IPCC. IPCC fourth assessment report-AR4-climate change 2007: the physical science basis[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, *et al.* Blue carbon, a rapid response assessment[R]. UNEP/GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Norway. 2009.
- [3] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J]. 江西水产科技, 2011 (2): 5-7.
- [4] 董双林. 高效低碳—中国水产养殖业发展的必由之路[J]. 水产学报, 2011, 35(10): 1595-1600
- [5] 章超桦, 曹文红, 吉宏武, 等. 水产资源低碳高效利用技术[J]. 水产学报, 2011, 35(2): 315-320.
- [6] 李来好, 邓建朝, 杨贤庆, 等. 低碳经济引领水产品加工业发展新方向[J]. 水产学报, 2011, 35(4): 636-640.
- [7] 徐皓, 张祝利, 张建华, 等. 我国渔业节能减排研究与发展建议[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 472-480.
- [8] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 CO₂ 通量[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 665-669.
- [9] Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, *et al.* Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C[J]. Nature, 2009, 458: 1158-1162.
- [10] 刘再华, Dreybrodt W, 王海静. 一种由全球水循环产生的可能重要的 CO₂ 汇[J]. 科学通报, 2007, 52(20): 2418-2422.
- [11] Franzen L G. Can earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect[R]. International Peat Society Proceedings of International Peat Congress. Uppsala, 1992: 1-18.
- [12] Troell M, Joyce A, Chopin T, *et al.* Ecological engineering in aquaculture: potential for integrated multi-trophic aquaculture(IMTA)in marine offshore systems[J]. Aquaculture, 2009, 297(1-4): 1-9.
- [13] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558。
- [14] Rodhouse P G, Roden C M. Carbon budget for a coastal inlet in relation to intensive cultivation of suspension-

- feeding bivalve molluscs[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1987, 36: 225–236.
- [15] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359–365.
- [16] 刘慧, 唐启升. 国际海洋生物碳汇研究进展[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(3): 695–702.
- [17] 黄耀. 中国陆地和近海生态系统碳收支研究[J]. *中国科学院院刊*, 2002, 17(2): 104–107.
- [18] Piazza B P, Piehler M K, Gossman B P, *et al.* Oyster recruitment and growth on an electrified artificial reef structure in Grand Isle, Louisiana[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2009, 84(1): 59–66.
- [19] UNEP. *Blue Harvest: Inland Fisheries as an Ecosystem Service*[R]. WorldFish Center, Penang, Malaysia. 2010.
- [20] 农业部渔业局. *中国渔业年鉴 2010*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [21] FAO. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2010*[M]. Rome, FAO. 2010: 197.
- [22] Boyd C E, Wood C W, Chaney P L, *et al.* Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(8): 2537–2540.
- [23] Quay P D, Emerson S R, Quay B M, *et al.* The carbon-cycle for Lake Washington—a stable isotope study[J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(3): 596–611.
- [24] Forsberg B R, Araujo-Lima C A R M, Martinelli L A, *et al.* Autotrophic carbon sources for fish of the central Amazon[J]. *Ecology*, 1993, 74(3): 643–652.
- [25] Lee S Y. Carbon dynamics of Deep Bay, eastern Pearl River estuary, China. II: Trophic relationship based on carbon-and nitrogen-stable isotopes[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 205: 1–10.
- [26] Ibelings B W, Mur L R, Walsby A E. Diurnal changes in buoyancy and vertical distribution in populations of *Microcystis* in two shallow lakes[J]. *Journal of Plankton Research* 1991, 13(2): 419–436.
- [27] Caldeira K, Wickett M E. Anthropogenic carbon and ocean pH[J]. *Nature*, 2004, 425: 365.
- [28] Kaplan A, Schwarz R, Lieman-Hurwitz J, *et al.* Physiological and molecular aspects of the inorganic carbon-concentrating mechanism in *Cyanobacteria*[J]. *Plant Physiology*, 1991, 97(3): 851–855.
- [29] 谢绶启. 淡水水体渔业碳汇评估[C]. 北京: 中国工程院第 109 场工程科技论坛: “碳汇渔业与渔业低碳技术”论文集, 2010: 143–151.
- [30] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [31] Taylor B W, Flecker A S, Hall JR R O. Loss of a harvested fish species disrupts carbon flow in a diverse tropical river[J]. *Science*, 2006, 313: 833–836.
- [32] Holmlund C M, Hammer M. Ecosystem services generated by fish populations[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 253–268.
- [33] 郭海强, 顾永剑, 李博, 等. 全球碳通量东滩野外观测站的建立[J]. *湿地科学与管理*, 2007, 3(1): 30–33.
- [34] 曹吉鑫, 田赆, 王小平, 等. 森林碳汇的估算方法及其发展趋势[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2001–2005.
- [35] Bunting S W, Pretty J. Global carbon budgets and aquaculture-emissions, sequestration and management options[R]. Centre for Environment and Society Occasional Paper 2007–1. University of Essex, UK. 2007.

Characteristics of carbon cycles and mechanism of carbon sink in inland fishery ecosystem

YANG Jian^{*}, SU Yan-ping, LIU Hong-bo, GE Xian-ping

(Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, China)

Abstract: Inland fishery carbon sink (IFCS) refers to the process and mechanism in which fishery organisms absorb and sequester CO₂ in the water and remove it from the water, and consequently, inland carbon sink fishery (ICSF) will be any fishery activity that effectively promotes a relative increase of IFCS. Phytoplankton fixes CO₂ through photosynthesis and converts it into organic carbon. Quite much of it is taken up by major freshwater herbivorous and filter-feeding fish and mussels, and accordingly, carbon can be cascaded through aquatic food webs and removed by capture fisheries and aquaculture. Therefore, ICSF can not only provide large quantities of nutritious food, but also play a critical role in carbon sequestration and removal. Carbon in freshwater ecosystems can be made up of different chemical components, like particulate organic and inorganic carbon, dissolved inorganic and organic carbon, which are convertible with high dynamics. It is noteworthy that unsustainable fishing related activities will jeopardize the potential capacities and even ecosystem services of IFCS. Therefore, the importance of IFCS and ICSF must be highlighted. A more recent study suggested that aquaculture ponds (110 830 km²) sequester an estimated 16.6 million tonnes/year of carbon globally, and the most carbon sequestration occurs in Asia and particularly in China (94% and 55.9% of global aquaculture pond area, respectively). Fishery will be the only controllable industry that is possible to effectively increase the carbon sink capacity in aquatic ecosystem, and the carbon sink fishery will be the only carbon sink industry in aquatic ecosystem. To better understand the mechanism of carbon sink/source, the current focus of study should be on the natural laws of carbon cycles in inland fishery ecosystem (including natural waters and ponds), form conversion between different chemical components, the carbon footprint for each of the different inland fisheries and aquaculture activities, and the corresponding assessment methods and models. At the same time, attention should also be paid to calculating realistic estimates of CO₂ fluxes in inland fishery waters and at the water-atmosphere interface, understanding the dynamics of carbon sink/source, and establishment of the information platform for environmental carbon/biological carbon/carbon fluxes of ICSF.

Key words: inland fishery; ecosystem; carbon cycle; carbon sink

Corresponding author: YANG Jian. E-mail: jiany@ffrc.cn