

# 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计

郑姚闽<sup>①</sup>, 牛振国<sup>①\*</sup>, 宫鹏<sup>①②\*</sup>, 戴永久<sup>③</sup>, 上官微<sup>③</sup>

① 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

② 清华大学地球系统科学研究中心暨全球变化研究院, 北京 100084;

③ 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100089

\* 联系人, E-mail: zhgniu@irsa.ac.cn; gong@irsa.ac.cn

2012-06-15 收稿, 2012-09-18 接受

国家科技支撑计划(2012BAJ24B01)、国家高技术研究计划重点项目(2009AA12200307)、遥感科学国家重点实验室项目(Y1Y00247KZ, Y1Y00232KZ)和国家自然科学基金(41201445)资助

**摘要** 湿地碳计量是湿地资源保护和增汇技术实施的前提条件. 在全面整理碳计量方法和探讨湿地碳计量的困难性后, 认为清单法是在国家尺度上估算中国湿地有机碳库的一种现实可行的方法. 为了弄清楚我国湿地到底固了多少有机碳? 在先前的研究基础之上, 利用改进后的清单法进行了研究. 主要结果如下: (1) 中国湿地有机碳库总计达 5.39~7.25 pg, 约占全球湿地碳储量(154~550 pg)的 1.3%~3.5%. (2) 中国湿地土壤有机碳库(5.04~6.19 pg)>中国水体有机碳库(0.22~0.56 pg)>中国湿地植被碳库(0.13~0.50 pg), 分别占中国湿地有机碳库的 85.4%~93.5%, 4.1%~7.7%和 2.4%~6.9%. 本文估算的中国湿地土壤有机碳库要高于先前的研究结果 3.67 pg, 但低于前人的研究结果 12.20 和 8~10 pg. 在讨论和不确定性分析的基础上, 对今后深入研究的方向进行了展望.

## 关键词

湿地碳储量  
遥感  
有机碳密度  
湿地植被  
湿地土壤

湿地是地球上单位面积生态服务价值最高<sup>[1]</sup>、固碳能力最强<sup>[2]</sup>、生物多样性保护意义最大的生态系统<sup>[3]</sup>, 被誉为“地球之肾”<sup>[4]</sup>. 保护湿地并促进全球湿地固碳增汇和温室气体减排有望纳入气候公约谈判(<http://www.wetlands.org/>). 湿地碳计量是湿地资源保护和增汇技术实施的前提条件, 其重要性和紧迫性已逐步被科学家和政治家所认识. 针对目前我国湿地有机碳库计量处于初步阶段, 尚存在许多亟待解决的问题, 本文全面总结湿地碳的计量方法以及湿地碳计量的困难性, 并在已有研究基础上<sup>[5]</sup>, 采用改进后的清单法, 对我国湿地有机碳库(主要包括土壤、植被和水体 3 个部分)进行初步估算, 旨在为我国湿地有机碳库计量的发展提供借鉴, 并探索将中国湿地保护和减排列入缓解气候变化的途径.

## 1 碳计量方法

主要包括直接测量法、模型估算法和清单法这三

大类别. 直接测量法用于直接测量水体、植被、土壤以及气体之间的碳通量, 主要用于中小尺度, 是目前为止最为准确的方法, 常用来当作大尺度研究的验证方法. 在全球/区域尺度上, 由于无法用实际测量的办法获得真实值, 利用模型估算和清单法就成为两种重要的替代方法.

净初级生产力测定法、总溶解碳测量法和熏蒸法主要用来测定植被碳、水体碳和土壤微生物碳, 而涡度相关法、同位素示踪法和箱式法主要用于观测植被/土壤与大气之间的碳通量<sup>[6]</sup>. 其中, 涡度相关法因能长期、实时地测定生态系统与大气之间的碳通量, 且能为碳循环模型的建立和校准提供基础数据而闻名, 因此已作为碳通量研究的一个标准方法在国际上获得广泛应用<sup>[7]</sup>; 箱式法作为一种估测净碳交换的传统方法, 通过测定箱内的 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等气体浓度随时间的变化来计算植被/土壤与大气间的碳通量, 该方法因成本低、操作方便, 适宜进行小尺度测量, 而得到

**引用格式:** 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 等. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报, 2013, 58: 170-180

**英文版见:** Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, et al. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. Chin Sci Bull, 2013, 58: 662-670, doi: 10.1007/s11434-012-5529-9

广泛应用, 并常作为大尺度湿地碳估算的验证数据。

模型估算法包括气候相关统计模型、反演模拟法、生态系统过程模型和光能利用率模型等<sup>[8-10]</sup>。前两种方法的主要缺点是缺乏严密的机理解释, 测量站点稀疏, 取样密度很低, 且忽略了其他环境因子的作用以及异常气候条件对 NPP 的影响, 因而模型的潜力受到一定限制。后两种方法因有效地解决了这些缺陷问题而受到重视。

陈镜明等人的 BEPS、彭长辉等人的 TriPlex 以及 Foley 等人的 IBIS 等生态系统过程机理的模式, 主要是从农业和森林生态系统中建立起来的<sup>[11]</sup>; 而对湿地的机理模式, 主要从水稻田生态系统出发的, 如 Li 等人<sup>[9]</sup>的 DNDC 模型。Wetland-DNDC 模型是一种经典的湿地机理模型, 它综合考虑了土壤、水文和植被对湿地碳循环的控制作用, 特别是增加考虑了水位变化、土壤特征的影响、水文条件对土温的影响、草本和苔藓植物碳固定、有氧条件对分解的影响等生物地球化学过程<sup>[12]</sup>。该模型通过在美国野外验证, 结果表明在温室气体碳通量、水位动态、净生态系统生产力和年度碳平衡等方面都有很好的一致性。因此, 机理模型的可靠性较高, 但由于要求输入参数较多, 在参数的可获得性、可靠性和尺度转化等方面问题较多, 而人为地简化参数又限制了模型的精度。

光能利用率模型又称生产效率模型, 以 CASA 模型、GLO-PEM 模型和 C-FIX 等模型为代表, 该模型是以植物光合作用过程和光能利用率为基础建立的。基于资源平衡观点, 主要利用由卫星遥测的大范围的光合有效辐射、光合有效辐射吸收率、植被指数和光能利用率等数据来估算 GPP 和 NPP, 能够反映出大范围气候变化对 NPP 的影响。目前, NOAA-AVHRR, SPOT, TM, MODIS, 航空遥感和微波遥感等数据源已广泛应用于 GPP 和 NPP 的遥感估算<sup>[7]</sup>, 但受研究方法和时空尺度的差异影响, 其结果和预测很难在大区域内推广, 仍需大量实测数据进行验证<sup>[6]</sup>。

清单法原理是根据生物量与碳转换系数(国际上采用 50%)相乘得到碳密度, 利用碳密度乘以面积得到碳储量<sup>[13]</sup>。它具有直接、明确、技术简单等优点, 在全球/国家尺度的植被/土壤碳估算中得到广泛应用。因此, 本文选择该方法。

## 2 湿地碳计量的困难性

湿地碳计量的主要困难在于 3 个方面: 湿地碳循

环的复杂性<sup>[14]</sup>、湿地边界确定的困难性<sup>[15]</sup>和监测数据的缺乏性<sup>[3,16]</sup>。由于湿地变化快, 地面调查可达性差, 即使使用现代的遥感技术也无法获得实时的湿地分布、特别是水淹范围的准确时空动态。

湿地碳循环过程受气候、地形、水文、土壤、植被和人类干扰等多种因素控制, 其分解速率和转化产物存在较大的差异(图 1), 造成湿地碳空间分布的异质性更为复杂。气候、地形和水文条件是湿地碳循环过程的重要驱动因素, 决定着湿地的水位变化、NPP、化学活动能力、有机质的获得量、沉积量和输出量等。土壤碳库是湿地碳库的重要组成部分, 它主要受三方面因素的制约: 影响分解微环境的因子(水文、温度、pH 和 Eh 等)、待分解底物的性质和分解时间。湿地植被通过气孔调节影响碳循环, 碳的固定量主要由植被类型、植被冠层的 CO<sub>2</sub> 浓度和季节性的干湿变化以及水位变化等因素所决定, 其中植被残体因受多水和还原性强的限制, 常转化为泥炭<sup>[17]</sup>。水体固定 CO<sub>2</sub> 的能力主要受气候、N、P、Fe<sup>[18]</sup>、水体酸化、富营养化、太阳紫外辐射增加和邻近生态系统等的影响, 而水体碳输出主要为随出湖河道径流的输出、矿化降解、人类捕捞造成的输出。人类干扰造成湿地碳源汇格局变化, 导致温室气体排放增加; 过去几个世纪, 泥炭地由于被排干或开垦等原因导致向大气排放的碳达到 160~250 Tg/a<sup>[19]</sup>。大约相当于 2010 年人类化石燃料燃烧造成的碳排放量 9 pg<sup>[20]</sup>(90 亿吨)的 1.8%~2.8%。湿地碳循环的复杂性造成湿地源汇计量极为困难。

湿地碳计量的一个重要前提是确定湿地边界, 然而湿地的科学定义及边界确定却是摆在全球科学家面前的两道科学难题。虽然湿地独特的水文、土壤和植被特征已被公认, 但湿地的各种特征是渐变的, 且湿地与陆地、水体又共同组成一个连续统一体, 在连续统一体内划分湿地边界异常困难。用某些湿地特征确定的湿地边界具有季节变化和年际波动性, 用不同时间段的观测资料和不同的研究方法确定的湿地边界往往差异很大<sup>[15]</sup>。这些都给湿地碳库计量造成影响。

湿地碳计量涉及生态系统类型(林地、农地、草地、湿地、居住地和其他土地)之间的相互转化, 还涉及活生物量、死有机质、矿质土壤、有机土壤和水体等组分的源汇变化, 所有国家都会不同程度地遇到缺乏数据的问题。我国湿地生态系统监测刚刚起

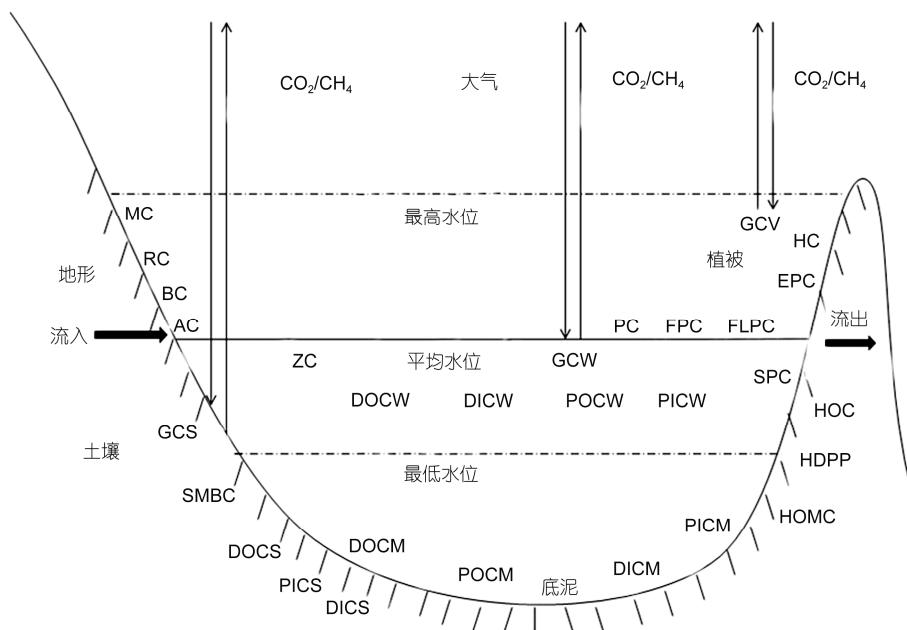


图1 典型湿地碳循环模式图

湿地土壤碳: HDPP, 半分解植物残体; HOC, 半分解产物碳; SMBC, 微生物量碳; HOMC, 腐植化碳; DOCS, 溶解有机碳; GCS, 气态碳; DICS, 溶解无机碳; PICS, 颗粒无机碳. 湿地生物碳: PC, 浮游植物态碳; FLPC, 浮叶植物态碳; SPC, 沉水植物态碳; FPC, 漂浮植物态碳; EPC, 挺水植物态碳; HC, 湿生植物态碳; GCV, 植被气态碳; BC, 鸟类态碳; FC, 鱼类态碳; MC, 兽类态碳; AC, 两栖类碳; RC, 爬行类碳; ZC, 浮游动物态碳. 水体碳: DICW, 溶解态无机碳; DOCW, 溶解态有机碳; POCW, 颗粒态有机碳; PICW, 颗粒态无机碳; GCW, 气态碳. 沉积物碳: DOCM, 溶解态有机碳; POCM, 颗粒态有机碳; DICM, 溶解态无机碳; PICM, 颗粒态无机碳

步<sup>[3,16]</sup>, 但对湿地碳的监测并不足, 造成我国湿地有机碳库计量尤为困难.

在全球尺度上, 许多学者对湿地碳库进行了估算, 认为全球湿地碳储量在 154~550 pg, 详见表 1. 在中国, 马学慧等人<sup>[38]</sup>、孙维侠等人<sup>[39]</sup>、刘晓辉和吕宪国<sup>[40]</sup>对东北地区泥炭土、沼泽土和沼生植被的有机碳进行研究, 但研究结果存在数量级差异. 马学慧等人<sup>[38]</sup>认为三江平原的沼泽土和泥炭土累积了 270 Tg 的有机碳, 而孙维侠等人<sup>[39]</sup>认为整个东三省的沼泽土和泥炭土只累积了 12.05 Tg 的有机碳. 王绍强等人<sup>[41]</sup>、潘根兴等人<sup>[42]</sup>、解宪丽等人<sup>[43]</sup>和刘庆花等人<sup>[44]</sup>认为中国水稻土有机碳的储量在 0.90~5.09 pg 之间. 近些年, Yu 等人<sup>[45]</sup>、张旭辉等人<sup>[46]</sup>和牛振国等人<sup>[5]</sup>认为中国湿地土壤有机碳库为 3.67~12.20 pg.

### 3 中国湿地碳库的初步估算

中国湿地到底有多少有机碳? 我们在先前研究的基础上<sup>[5]</sup>, 利用更新的数据<sup>[47,48]</sup>和改进后的清单法进行研究, 并将植被和水体一并纳入湿地有机碳库计量范畴.

表1 全球湿地碳库

类型	碳库(pg)	面积( $\times 10^4$ km <sup>2</sup> )	文献
全球湿地土壤 <sup>b)</sup>	550	-	a)
	225~377	530~570	[21]
全球湿地 <sup>b)</sup>	280	280	[22]
	300	500	[23]
	377	-	[24]
	225	350	[25]
	357	1745	[26]
	202	280	[27]
	154	240	[28]
全球泥炭地 <sup>b)</sup>	330	240	[29]
	455	269	[30]
	500 $\pm$ 100	-	[31]
全球泥炭地 <sup>c)</sup>	45	120	[32]
	120~260	-	[33]
全球泥炭地 <sup>d)</sup>	160~165	-	[34]
	450	-	[35]
	243~253	400	[36]
全球湿地植被 <sup>e)</sup>	0.5 $\times 10^2$ ~13.5 $\times 10^2$	-	[37]

a) <http://www.wetlands.org/articlemenu.aspx?id=ae774022-0c1a-4293-a107-a73225128e75>; b) 厚度 1 m; c) 厚度 0.33 m; d) 厚度不详; e) 单位: t C/km<sup>2</sup>

在方法上,对湿地土壤剖面不同深度的有机碳密度分别进行了计算,有机碳密度通过不同深度的有机碳含量乘以土壤容重而实现,这与以往不区分土层深度的研究相比,更接近真实情况;土壤容重数据来自全国土种志和地方土种志;为便于国际交流,深度取 1 m.

在数据方面,对中国湿地遥感制图数据进行了更新,采用 2007~2009 年的数据,并进行了野外验证和精度评价<sup>[47]</sup>;同时,对全国土壤剖面数据(包括容重)进行补充收集<sup>[48]</sup>.

中国湿地有机碳库计量公式如下:

$$C = \sum S_j D_j, \quad (1)$$

$$D_j = \sum 0.58 W_j H_{ij} O_{ij}, \quad (2)$$

式中,  $C$  为中国湿地土壤有机碳库(g),  $S_j$  为面积( $\text{cm}^2$ ),  $D_j$  为有机碳密度( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $j$  为土壤类型, 0.58 为碳转换系数,  $W_j$  为容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $H_{ij}$  为土壤厚度(cm),  $O_{ij}$  为有机质含量(%),  $i$  为土层序号. 单位之间的换算关系是:  $1 \text{ pg} = 1 \times 10^{15} \text{ g} = 10$  亿吨,  $1 \text{ Tg} = 1 \times 10^{12} \text{ g} = 100$  万吨.

将中国湿地遥感制图数据和 1:100 万中国土壤分布图进行空间叠加,扣除养殖场、盐田、盐壳、江河、湖泊、水库、岩石和城区等非土壤地物,得到中国湿地土壤分布图. 利用 7799 个土壤剖面数据<sup>[48]</sup>,依据中国湿地内所分布的土壤类型,建立中国湿地土类名录,主要包括沼泽土、泥炭土和草甸土等 53 个土类. 中国湿地上分布的土类、容重、有机碳密度和土壤面积,详见表 2 和图 2.

我国湿地土壤碳密度研究主要集中在东北平原、长江中下游平原、滨海和青藏高原等地,但由于取样深度、取样时间、研究角度、土壤命名和研究方法等的不同,难以用于全国土壤碳密度的修正. 赵传冬等人<sup>[49]</sup>认为 2006 年扎龙沼泽湿地土壤有机碳密度为  $3.79 \text{ g}/\text{cm}^2$ ,与张旭辉等人<sup>[46]</sup>的研究结果相符,与同为黑龙江省的三江平原湿地大致相当,低于若尔盖湿地,而高于我国其他地区的湿地,但明显低于全球湿地的平均水平. 奚小环等人<sup>[50]</sup>认为东北平原土壤碳密度处于全国平均水平,其中黑龙江沼泽湿地土壤有机碳密度为  $3.28 \text{ g}/\text{cm}^2$ ,而表层(20 cm)的沼泽湿地土壤有机碳密度在 20 年期间,共增加了 9.2%,这与赵传冬等人<sup>[49]</sup>的研究结果比较接近. 根据奚小环等人<sup>[50]</sup>、赵传冬等人<sup>[49]</sup>和刘子刚<sup>[51]</sup>等人的研究结果,将我国沼泽土和泥炭土的有机碳密度修正为 3.54 和  $4.47 \text{ g}/\text{cm}^2$ . 以湿地土壤有机碳密度的算术平均值和

加权平均值作为估算依据(见表 2),认为中国湿地土壤有机碳库介于 5.04~6.19 pg.

中国湿地植被碳密度,见表 3. 兴安落叶松群落( $10.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ )<sup>[60]</sup>、长白落叶松群落( $7 \times 10^3 \text{ km}^2$ )<sup>[61]</sup>、红树林群落( $230.82 \text{ km}^2$ )<sup>[62]</sup>、芦苇群落( $4 \times 10^3 \text{ km}^2$ )<sup>[63]</sup>和海三棱藎草群落( $42.35 \text{ km}^2$ )<sup>[64]</sup>等的分布面积数据由文献所得. 对一些没有分布面积数据的湿地植被碳库的估算,以文献<sup>[65]</sup>记录的转化公式进行估算.

中国水体碳库的计量主要依据多年平均水资源量( $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )<sup>[66]</sup>和吕昌伟<sup>[67]</sup>的湖泊碳密度( $0.64 \times 10^4 \sim 1.65 \times 10^4 \mu\text{mol/L}$ ).

主要结果如下: (1) 中国湿地有机碳库总计达 5.39~7.25 pg, 约占全球湿地碳储量的 1.3%~3.5%. (2) 中国湿地土壤有机碳库(5.04~6.19 pg) > 中国水体有机碳库(0.22~0.56 pg) > 中国湿地植被碳库(0.13~0.50 pg), 分别占中国湿地有机碳库的 85.4%~93.5%, 4.1%~7.7% 和 2.4%~6.9%.

#### 4 中国湿地土壤有机碳库的对比

国内已经有一些研究涉及中国陆地土壤有机碳库的估算, 研究结果存在较大的差异, 关于湿地土壤有机碳库的估算也未得到广泛认可. 方精云等人<sup>[68]</sup>利用 1:1000 万中国土壤类型图和 725 个土壤剖面,测得各类土壤面积总计为  $9.45 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 中国土壤碳密度平均为  $2.03 \text{ g}/\text{cm}^2$ , 碳储量为 185.69 pg; 潘根兴<sup>[69]</sup>根据 2500 多个土壤剖面数据<sup>[70]</sup>, 认为中国土壤有机/无机碳库分别为 50 和 60 pg; 王绍强等人<sup>[41,71]</sup>基于 1:400 万的中国土壤图<sup>[72]</sup>, 根据全国两次土壤普查数据(剖面数分别为 236 和 2473)估算中国陆地土壤有机碳总量分别为 100.18 和 92.42 pg; 李克让等人<sup>[73]</sup>和 Wu 等人<sup>[74]</sup>用模型计算的中国土壤碳储量为 82.65 和 70.3 pg; Yang 等人<sup>[75]</sup>在第二次土壤普查数据基础上,增加了西北地区(特别是青藏高原区)的 810 个剖面,并根据新数据库中有有机碳密度与容重、土壤剖面深度变化关系,估算全国土壤有机碳库为 69.1 pg; Li 等人<sup>[76]</sup>根据 2456 个土壤剖面数据,估算得到全国土壤总有机碳库为 88.3 pg; 史学正课题组<sup>[77]</sup>对中国土壤发生分类系统(genetic soil classification of China, GSCC)与美国土壤分类系统(ST)在土纲一级之间进行转换,利用其构建的中国土壤信息系统数据库和编制的 1:100 万土壤图<sup>[78]</sup>,将全部图斑的土壤类型有机碳数据和与土壤图链接,进而提出全国

表2 中国湿地土壤有机碳密度

土类	土类代码	剖面数(个)	容重(g/cm <sup>3</sup> )	有机碳密度(g/cm <sup>2</sup> )	土壤面积(km <sup>2</sup> )	有机碳库(Tg)
棕色针叶林土	10000	32	1.33	2.29	783.12	17.93
燥红土	13000	22	1.29	1.09	280.27	3.05
褐土	14000	752	1.37	1.76	2034.27	35.80
灰褐土	15000	146	1.36	3.60	451.82	16.27
黑土	16000	3	1.31	3.56	1605.22	57.15
灰色森林土	17000	20	1.33	3.26	159.60	5.20
黑钙土	18000	145	1.32	2.93	3914.95	114.71
栗钙土	19000	215	1.37	1.68	6148.72	103.30
栗褐土	20000	79	1.40	1.20	230.24	2.76
黑垆土	21000	55	1.38	1.88	20.70	0.39
棕钙土	22000	41	1.38	0.97	2896.59	28.10
灰钙土	23000	90	1.41	1.00	182.09	1.82
灰漠土	24000	33	1.39	1.66	436.14	7.24
灰棕漠土	25000	22	1.41	0.58	860.15	4.99
棕漠土	26000	32	1.36	0.59	1157.04	6.83
黄绵土	27000	62	1.38	0.82	417.40	3.42
红黏土	28000	54	1.34	0.78	38.22	0.30
新积土	29000	307	1.58	1.27	5377.14	68.29
龟裂土	30000	4	1.32	0.24	3.93	0.01
风沙土	31000	142	1.62	0.51	6924.93	35.32
石灰(岩)土	32000	106	1.23	1.94	1228.34	23.83
火山灰土	33000	21	1.40	2.83	213.06	6.03
紫色土	34000	207	1.40	1.02	2370.73	24.18
粗骨土	37000	169	1.41	0.94	1281.90	12.05
草甸土	38000	130	1.31	3.05	51134.74	1559.61
砂姜黑土	39000	69	1.32	1.18	383.95	4.53
山地草甸土	40000	58	1.40	6.54	4.99	0.33
林灌草甸土	41000	3	1.39	1.03	1254.24	12.92
潮土	42000	914	1.42	6.92	12063.00	834.76
沼泽土	43000	127	1.28	3.54 <sup>c)</sup>	30239.18	1070.47
泥炭土	44000	25	1.38	4.47 <sup>d)</sup>	1150.09	51.41
盐土	45000	105	1.38	0.97	10861.88	105.36
滨海盐土	47000	58	1.39	1.42	5754.23	81.71
酸性硫酸盐土	48000	8	1.32	2.66	93.89	2.50
寒原盐土	49000	19	1.35	0.57	2822.69	16.09
碱土	50000	22	1.29	0.89	1414.21	12.59
水稻土	51000	1201	1.36	1.30	15094.19	196.22
灌淤土	52000	112	1.47	1.34	623.15	8.35
灌漠土	53000	6	1.39	3.15	211.08	6.65
高山草甸土	54000	17	1.39	8.89	7509.99	667.64
亚高山草甸土	55000	8	1.35	10.10	3031.95	306.23
高山草原土	56000	99	1.51	1.35	17615.82	237.81
亚高山草原土	57000	234	1.37	1.82	2718.70	49.48
灌丛草原土	58000	381	1.43	1.65	398.40	6.57
砖红壤	81000	63	1.29	1.67	1016.21	16.97
赤红壤	82000	121	1.28	1.46	2680.76	39.14
红壤	83000	333	1.32	1.59	6047.86	96.16
黄壤	84000	181	1.39	2.63	1056.32	27.78
黄棕壤	85000	169	1.37	2.80	1090.08	30.52
黄褐土	86000	64	1.30	0.89	1630.13	14.51
棕壤	87000	320	1.35	2.26	1694.59	38.30
暗棕壤	88000	170	1.39	1.34	4540.63	60.84
白浆土	89000	7	1.33	2.85	1789.15	50.99
总数	—	7799	1.37	2.24 <sup>a)</sup> ~2.75 <sup>b)</sup>	224942.65	5038.72~6185.92

a) 算术平均数; b) 加权平均数; c)和 d) 修正值

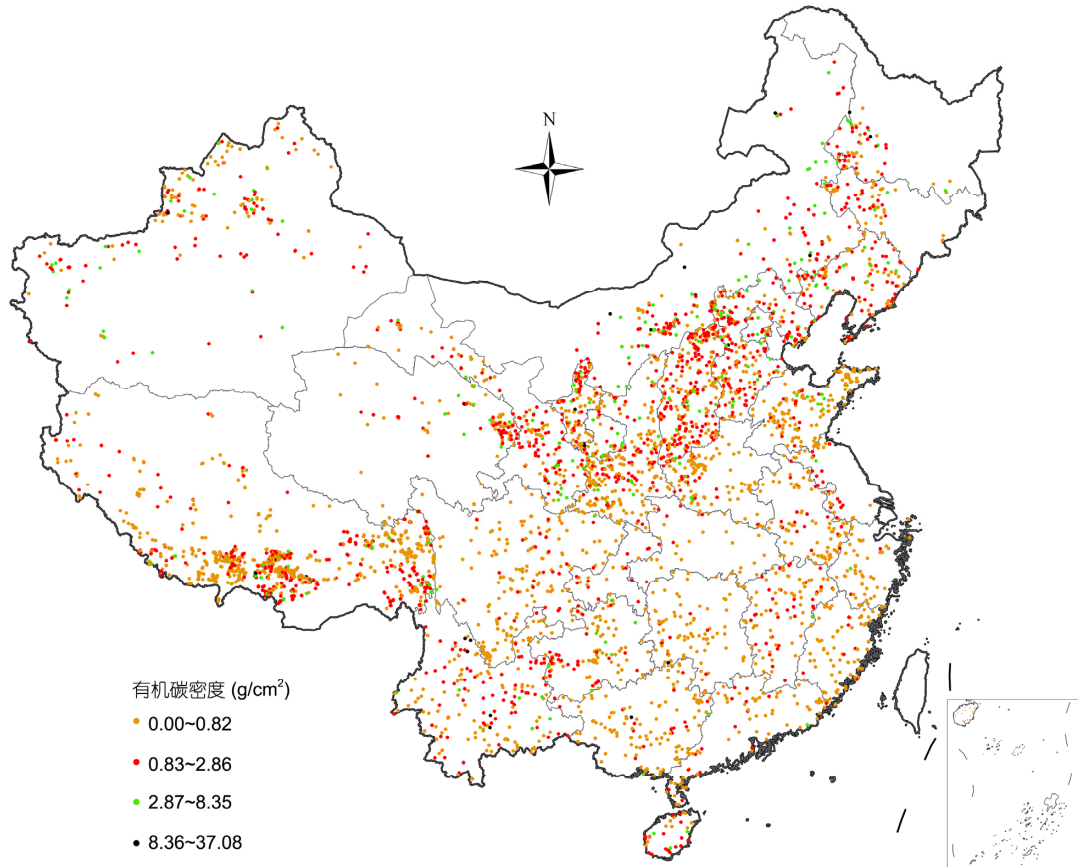


图2 基于全国第二次土壤调查数据的中国湿地土壤碳密度

土壤有机碳库为  $89.1 \text{ pg}^{[45,79]}$ 。在第 236 次香山会议上,土壤学家认为中国土壤总有机碳库应介于  $70\sim 90 \text{ pg}$ ,提出可将  $90 \text{ pg}$  作为中国土壤总有机碳库的默认值<sup>[80]</sup>。尽管国内各位专家学者在中国土壤总有机碳库估算结果上日渐趋近,但估计值尚存在较大的不确定性<sup>[81]</sup>。

作为中国陆地土壤有机碳库的重要组成部分,中国湿地土壤有机碳库到底有多大? Yu 等人<sup>[45,79]</sup>和牛振国等人<sup>[5]</sup>对中国湿地土壤有机碳库进行了初步的研究,估算结果存在 3~4 倍差异。前者利用通过对空间分辨率为  $500 \text{ m}$  的 MODIS 数据分类所得中国湿地分布结果,得到中国湿地土壤面积为  $7.28 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,中国湿地土壤有机碳的总量为  $12.20 \text{ pg}$ 。稍后,张旭辉等人<sup>[46]</sup>依据一些包括有机碳深度分布研究的资料和根据文献整理出的部分主要类型湿地的土壤有机碳密度,采用全国第一次湿地资源普查数据(2000~2003 年)作为中国湿地土壤面积的估算依据,初步估算中国湿地土壤有机碳库为  $8\sim 10 \text{ pg}$ 。2009 年,牛振国

等人<sup>[5]</sup>在 Shi 等人<sup>[77]</sup>的研究基础上(使用相同的土壤参比关系),对湿地土壤面积数据来源(MODIS 数据的土地利用分类)进行了改进,采用中国湿地遥感制图数据(2000 年为基准年的 ETM+ 数据),将它与  $1:100$  万土壤数据叠加,除去城区、水面、冰川、岩石、珊瑚礁岛屿和盐壳等非土壤部分,得到的湿地土壤面积为  $2.45 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,估算中国湿地土壤有机碳总量为  $3.67 \text{ pg}$ 。

Shangguan 等人<sup>[48]</sup>为了气候变化的研究需要而建立中国土壤粒径分布数据库,在全国第二次土壤调查数据和  $1:100$  万土壤分布图的基础上,对我国土壤剖面进行了更为全面的收集整理<sup>[82]</sup>,将省、市和县(特别是西藏地区)的土壤调查数据(包括容重等)补充到土壤剖面数据库,共有 8979 个剖面(33039 个土层)。

本次研究在牛振国等人<sup>[5]</sup>和 Shangguan 等人<sup>[48]</sup>的研究基础上,对土壤剖面数据、面积数据和碳密度计算方法等方面都进行了补充和改进。在湿地土壤面积数据方面,对中国湿地遥感制图数据进行了更

表3 中国湿地植被的有机碳密度

类型	有机碳密度(t C/km <sup>2</sup> )	研究地区	文献
木榄	5.29×10 <sup>4</sup>		
白骨壤	2.91×10 <sup>4</sup>		
混合林	1.92×10 <sup>4</sup>	北部湾	[52]
红海榄	1.28×10 <sup>4</sup>		
桐花树	3.53×10 <sup>3</sup>		
落叶松-藓类沼泽	6.72×10 <sup>3</sup>		
落叶松-苔草沼泽	5.87×10 <sup>3</sup>		
白桦沼泽	3.23×10 <sup>3</sup>	小兴安岭	[53]
毛赤杨沼泽	2.87×10 <sup>3</sup>		
落叶松-泥炭藓沼泽	1.85×10 <sup>3</sup>		
	4.02×10 <sup>3</sup>	崇明东滩	[54]
	2.90×10 <sup>3</sup>	南四湖	[55]
芦苇	4.21×10 <sup>3</sup>	白洋淀	[55]
	4.21×10 <sup>3</sup>	辽河口	[56]
	1.29×10 <sup>4</sup>	盐城	[57]
沉水植物	2.25×10 <sup>3</sup>		
荷花	2.48×10 <sup>2</sup>	南四湖	[55]
毛果苔草	2.90×10 <sup>3</sup>		
甜茅	4.97×10 <sup>2</sup>	三江平原	[38]
漂筏苔草	2.33×10 <sup>2</sup>		
乌拉苔草	2.67×10 <sup>3</sup>		
木里苔草	2.65×10 <sup>3</sup>	若尔盖	[58]
藏蒿草	2.40×10 <sup>3</sup>		
白茅+芦苇	3.49×10 <sup>3</sup>		
互花米草+碱蓬	2.60×10 <sup>3</sup>		
互花米草	2.10×10 <sup>3</sup>	盐城	[57]
蔗草	1.33×10 <sup>3</sup>		
碱蓬	5.04×10 <sup>2</sup>		
海三棱蔗草	5.1×10 <sup>2</sup>	崇明东滩	[59]

新,以2008年为基准年的1442景CBERS(01/02B)影像为数据源,人工解译完成,并经大量野外考察验证,精度达98%<sup>[47]</sup>,湿地遥感制图的比例尺介于1:10万~1:25万,由此得到中国湿地土壤面积为2.25×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>;在计算方法方面,我们按照分类分层的方法,对不同土壤亚类不同土壤深度的有机碳密度进行计算。

通过比较发现,本次研究结果(5.04~6.19 pg)要高于我们先前的研究结果3.67 pg,但低于Yu等人<sup>[45,79]</sup>的12.20 pg和张旭辉等人<sup>[46]</sup>的8~10 pg.2000~2008年间,中国湿地土壤面积共减少了1.97×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,说明湿地土壤有机碳储量的增加主要取决于碳密度

的增加,这与赵传冬等人<sup>[49]</sup>和奚小环等人<sup>[50]</sup>的研究结果相吻合.Yu等人<sup>[45,79]</sup>认为中国湿地土壤碳密度均值为1.68 g/cm<sup>2</sup>,张旭辉等人<sup>[46]</sup>认为介于0.75~8.76 g/cm<sup>2</sup>,本次研究认为介于0.24~10.10 g/cm<sup>2</sup>,算术平均值为2.24 g/cm<sup>2</sup>,加权平均值为2.75 g/cm<sup>2</sup>.据报道,全球湿地1 m深土壤的有机碳密度介于6.00~15.00 g/cm<sup>2</sup>,0~30 cm表土的平均碳密度达3.75 g/cm<sup>2</sup>.因此,我国是低土壤碳密度国家,尚低于全球表土(0~30 cm)的有机碳密度水平。

## 5 问题及不确定性讨论

湿地碳循环过程主要在土壤、水体、植被和底泥等层次上进行,受到湿地的类型和要素等诸多因素的控制,其分解速率和转化产物存在较大的差异,造成湿地碳空间分布的异质性更为复杂.由此导致,湿地温室气体排放和吸收的空间变异规律、时间变化规律以及对氮沉降和大气CO<sub>2</sub>浓度升高的响应都存在诸多争议.特别是好氧状况下植物产生甲烷引起科学界极大的争论,其中包括其对全球甲烷预算的贡献以及观测本身的真实性.例如,全球湿地CH<sub>4</sub>排放量估算范围在100~250 Tg,变幅较大.湿地的科学定义和边界确定的争议不断,湿地碳循环的控制因素和机制以及源/汇格局转化的阈值并不明确,加上湿地详细监测程度较低,这些因素都造成湿地碳计量存在较大的不确定性。

目前,涡度相关法、箱式法、NPP测定法和同位素示踪法等多种直接测量方法与清单法及其包括生态系统过程模型和光能利用率模型等在内的模型估算法的联合使用和交互验证已成为湿地碳计量和尺度推移的重点之一.当今最准确的数据还是点上的观测数据,它们常被用来当作真实值对其他尺度的估算数据进行验证.尽管目前在FLUXNET上登记的碳通量塔已达545座([http://fluxnet.ornl.gov/site\\_status](http://fluxnet.ornl.gov/site_status)),但绝大多数是建立在森林、草地和农田等生态系统之上的,远不能满足湿地碳计量的需要.在我国,只有长江口和鄱阳湖两处建有湿地通量塔。

我们利用最新湿地遥感制图数据、土壤剖面和容重数据以及改进后的清单法,从碳汇角度初步估算了中国湿地有机碳库,但由于受目前研究程度、数据支持等的限制,尚存在一些不确定性。

首先,由于湿地碳源/汇之争在科学界备受议论,我们只是简单地估算碳汇,暂未考虑湿地源/汇格局

转化关系,并未计算碳的流入速率、流出速率、流入量和流出量.估算过程割裂了与碳源之间的内在联系,造成了估算结果的不确定性.

其次,由于无机/有机碳库之间转化机制并不明确,以及监测数据的缺失,我们也仅探讨湿地主要要素(植被、土壤和水体)的有机碳库,忽略了无机碳库和动物、微生物、沉积物等其他有机碳库.

第三,土壤、植被和水体的有机碳库计量也受资料来源、样本容量和研究方法等因素的差异所影响,其结果存在较大的不确定性.

(1) 由于缺乏准确的中国水体有机碳密度监测数据和湿地水量时空序列数据,我们仅采用2个内蒙古高原湖泊(乌梁素海和岱海)的有机碳密度作为全国水体有机碳密度<sup>[67]</sup>,并以多年平均水资源量为估算依据<sup>[66]</sup>.然而全国湿地类型多样,各流域水质和水量各异,并且受诸多因素影响而存在年际变化和季节变化的现象,河流与外流型湖泊的碳密度可能差异很大,数据的代表性较低.此外,水量数据是根据1956~1979年资料统计得到的,较为陈旧.

(2) 由于缺乏精确的中国湿地植被碳密度数据和湿地植被空间分布数据,我们只能通过文献总结予以简单估算.当前各种湿地植被碳储量估算是收割法和清单法,主要利用两个公式:碳密度=生物量×碳转化系数;碳储量=碳密度×面积,并利用地下/地上生物量比率来实现地下生物量的估算.木本湿地植被生物量估算方法为解析木调查法或每木检尺调查法,前者适用于单株或几株树,后者适用于大面积森林,主要测定胸径和树高.受实验条件和样本数量的限制,生物量模型(胸径和树高与根、茎、枝、叶和枯落物等生物量的函数关系)可用于估算木本湿地植被的碳储量.

尽管许多学者对中国湿地植被的类型、特征和分布格局进行了系统总结和梳理,但并未公布准确而全面的面积数据<sup>[83-87]</sup>.仅有芦苇、水稻等几种湿地植被类型的空间分布数据,数据陈旧,并不能满足中国湿地植被碳计量的需求.尽管我们全面总结了我国湿地植被类型的分布面积,但也仅统计了5种植被类型,仍有许多湿地植被的分布面积不详,如海藻(*Zostera marina* Linn.L)、柴桦(*Betula fruticosa*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)和水松(*Glyptostrobus pensilis*)等.此外,近些年我国政府开展了天然湿地植被恢复和人工湿地植被种植等工作,这些成果尚无文献报道,而这些人

工种植的湿地植被恰恰具有较大的固碳潜力.

(3) 第二次全国土壤普查数据比较陈旧,湿地土壤调查的代表性不够,造成湿地土壤有机碳库计量存在一定的不确定性.

第二次土壤普查是在1979~1985年期间开展的,但30年来,天然湿地已经广泛受到不同程度的人类干扰<sup>[3,47]</sup>.由于土壤调查并非针对湿地土壤而设计,湿地抽样的代表性不足(样点过于接近农田),而天然湿地土壤剖面样点设置的代表性与否很大程度上决定了估算结果的差异性.此外,采样密度过低(采样密度 $<8.12$ 个/ $10^4$  km<sup>2</sup>),这样必然忽略成土因素造成的湿地土壤空间异质性及湿地土壤本身不均一性的影响,极大地增加了湿地土壤有机碳库估算的不确定性.

第四,清单法本身的缺陷.尽管我们对清单法进行了改进,对不同土壤深度的有机碳密度进行了计算,但清单法的缺陷并不能忽视.它只能间歇地记录碳储量,不能反映年际和季节变化的效应;忽略了土壤微生物对有机碳分解的影响;由于样地的密度、数量、估测方法等并无统一的标准,且各地研究的时间尺度、空间范围和精细程度各异,造成研究结果的可靠性和可比性较差.尽管如此,利用清单法估算国家尺度的中国湿地有机碳库仍不失为一种较为现实可行的途径.

## 6 展望

(1) 阐明湿地碳循环的控制机制是湿地科学目前研究的重点之一,其中需要深入的方向是:水位、温度、pH、Eh、N、P、Fe、水体酸化、富营养化、太阳紫外辐射增加、人类干扰和邻近生态系统等关键影响因素对不同湿地不同要素的碳源/碳汇的控制机制,尤其是格局转化的各种阈值及对全球变化的响应.例如,加强对不同类型湿地植被传输温室气体能力的系统比较研究以及湿地植被传输温室气体能力与水位、温度等关键因素之间的关系研究.

(2) 湿地固碳潜力和技术措施的研究是国际碳循环研究的重要内容之一,重点关注不同湿地不同要素的固碳增汇技术措施(模拟实验、田间实验和野外调查)和固碳潜力的估算与评价.积极探索基于碳排放和碳积累为目标的湿地保护和科学管理模式,充分发挥人工湿地技术在降解水体碳污染、增加土壤和植被碳累积等方面的积极作用.加强中国湿地植被调查工作,并积极探索各种湿地植被类型的空间



搭配方案对湿地固碳减排的各种效应和作用机理。

(3) 加强湿地温室气体排放和固定的估算方法研究,特别是充分利用遥感的快速、大尺度、实时等优势,积极探索不同类型湿地的碳遥感估算方法。逐步完善不同湿地类型的碳监测网络,加强通量塔与无线传感器、远程传输的配套建设,利用遥感和地理

信息系统技术,建立高分辨率湿地分布与面积的定期更新数据库,提取植被指数、水分指数、水深等湿地生态系统参数,耦合清单法、遥感驱动模型和过程模型,并辅以湿地要素的碳通量、生物量、GPP 或 NPP 等实测数据,进行跨尺度、分类别的碳计量和交互验证。

**致谢** 中国科学院遥感应用研究所张海英博士提供了一些帮助,在此表示感谢。

## 参考文献

- 1 Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253–260
- 2 Duarte C M, Middelburg J J, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2005, 2: 1–8
- 3 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. *科学通报*, 2012, 57: 207–230
- 4 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. *湿地科学*, 2003, 1: 7–11
- 5 牛振国, 宫鹏, 程晓, 等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 188–203
- 6 Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861–865
- 7 Zhao L, Li J, Xu S, et al. Seasonal variations in carbon dioxide exchange in an alpine wetland meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biogeosciences*, 2010, 7: 1207–1221
- 8 Melillo J M, Mcguire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234–240
- 9 Li C S, Farahbakhshazad N, Jaynes D B, et al. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa. *Ecol Model*, 2006, 196: 116–130
- 10 Li Z Q, Yu G R, Xiao X M, et al. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. *Remote Sens Environ*, 2007, 107: 510–519
- 11 Govind A, Chen J M, McDonnell J, et al. Effects of lateral hydrological processes on photosynthesis and evapotranspiration in a boreal ecosystem. *Ecohydrol*, 2011, 4: 394–410
- 12 Zhang Y, Li C S, Trettin C C, et al. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation of carbon dynamics in wetland ecosystem. *Glob Biogeochem Cy*, 2002, 16: 1061
- 13 Guo Y Y, Amundson R, Gong P, et al. Quantity and spatial variability of soil carbon in the conterminous United States. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 590–600
- 14 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞, 等. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004
- 15 殷书柏, 吕宪国, 武海涛. 湿地定义研究中的若干理论问题. *湿地科学*, 2010, 8: 182–188
- 16 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏. 对《〈中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估〉中的偏差》一文的回应. *科学通报*, 2012, 57: 1371–1376
- 17 Albuquerque A L S, Mozeto A A. C:N:P ratios and stable carbon isotope compositions as indicators of organic matter sources in a riverine wetland system(Moji-Guacu River, Sao Paulo-Brazil). *Wetlands*, 1997, 17: 1–9
- 18 Martin J H, Gordon R M, Fitzwater S E. Iron in antarctic water. *Nature*, 1990, 345: 156–158
- 19 Bridgham S D, Magonigal J P, Keller J K, et al. The carbon balance of north American wetlands. *Wetlands*, 2006, 26: 889–916
- 20 Peters G P, Marland G, Quéré C L, et al. Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 2–4
- 21 Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Curr Sci*, 2005, 88: 25–35
- 22 Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the Present. *Nature*, 1990, 348: 711–714
- 23 Sjørs H. Peat on earth: Multiple use or conservation? *Ambio*, 1980, 9: 303–308
- 24 Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils: II. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 1118–1119
- 25 WBGU, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Die Anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschlag für den globalen Umweltschutz. Sondergutachten, Bremerhaven, Germany, 1998. 76

- 26 Eswaran H, Berg E V D, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 192–194
- 27 Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156–159
- 28 FAO. Global Forest Resources Assessment 2000. Main Report. FAO Forestry Paper, 2001. 140
- 29 Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur J Soil Sci*, 1996, 47: 151–163
- 30 Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecol Appl*, 1991, 1: 182–195
- 31 Yu Z. Northern peatland carbon stocks and dynamics: A review. *Biogeosci Disc*, 2012, 9: 5073–5107
- 32 Buringh P. Organic carbon in soils of the world. In: Wondwell G M, ed. *The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing*. SCOPE 23. 1984. 91–109
- 33 Franzen L G. Can earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect. In: *Proceeding of the 9th International Peat Congress*, Uppsala. 1992. 1–18
- 34 Bolin B. How much CO<sub>2</sub> will remain in the atmosphere? In: Bolin B, Döös B R, Jäger J, et al., eds. *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems*. SCOPE 29. Chichester: John Wiley & Sons, 1986. 93–155
- 35 Ouse W R, Lafleur P M, Griffis T J. Controls on energy and carbon fluxes from select high-latitude terrestrial surfaces. *Phys Geog*, 2000, 21: 345–367
- 36 Eino L. Global Peat Resources. Finland: International Peat Society of Finland, 1996
- 37 Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions. *J Atmos Chem*, 1989, 8: 307–358
- 38 马学慧, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原沼泽地碳循环初探. *地理科学*, 1996, 16: 323–330
- 39 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 基于 1:100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究——以中国东北三省为例. *地理科学*, 2004, 24: 568–572
- 40 刘晓辉, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统固碳功能及其价值评估. *湿地科学*, 2008, 6: 212–217
- 41 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55: 533–544
- 42 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. *地球科学进展*, 2003, 18: 609–618
- 43 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, 41: 35–43
- 44 刘庆花, 史学正, 于东升, 等. 中国水稻土有机和无机碳的空间分布特征. *生态环境*, 2006, 15: 659–664
- 45 Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China. *J Environ Manage*, 2007, 85: 680–689
- 46 张旭辉, 李典友, 潘根兴, 等. 中国湿地土壤碳库保护与气候变化问题. *气候变化研究进展*, 2008, 4: 202–208
- 47 牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978~2008 年中国湿地类型变化. *科学通报*, 2012, 57: 1400–1411
- 48 Shanguan W, Dai Y J, Liu B Y, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China. *Geoderma*, 2012, 171(SI): 85–91
- 49 赵传冬, 刘国栋, 杨柯, 等. 黑龙江省扎龙湿地及其周边地区土壤碳储量估算与 1986 年以来的变化趋势研究. *地学前缘*, 2011, 18: 27–33
- 50 奚小环, 杨忠芳, 崔玉军, 等. 东北平原土壤有机碳分布与变化趋势研究. *地学前缘*, 2010, 17: 213–221
- 51 刘子刚. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. *地理科学*, 2004, 24: 634–639
- 52 曹庆先. 北部湾沿海红树林生物量和碳储量的遥感估算. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院, 2010
- 53 李婉姝, 牟长城, 吴云霞, 等. 小兴安岭地区天然沼泽林生产力与植被碳密度. *东北林业大学学报*, 2010, 38: 39–44
- 54 梅雪英, 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以崇明东滩芦苇带为例. *中国生态农业学报*, 2008, 16: 269–272
- 55 沈吉, 张祖陆, 杨丽原, 等. 南四湖——环境与资源研究. 北京: 地震出版社, 2008
- 56 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究——以辽河三角洲盘锦地区为例. *海洋学研究*, 2010, 28: 67–71
- 57 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响. *应用生态学报*, 2009, 20: 293–297
- 58 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动. *植物生态学报*, 2003, 27: 490–495
- 59 梅雪英, 张修峰. 长江口湿地海三棱蔗草的储碳、固碳功能研究——以崇明东滩为例. *农业环境科学学报*, 2007, 26: 360–363
- 60 刘丹, 杜春英, 于成龙, 等. 黑龙江省兴安落叶松和红松的生态地理分布变化. *安徽农业科学*, 2011, 39: 9643–9645
- 61 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 等. 中国东北落叶松属 3 种植物潜在分布对气候变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2007, 31: 825–833
- 62 傅秀梅, 王亚楠, 邵长伦, 等. 中国红树林资源状况及其药用研究调查 II. 资源现状、保护与管理. *中国海洋大学学报*, 2009, 39: 705–711
- 63 闫明, 潘根兴, 李恋卿, 等. 中国芦苇湿地生态系统固碳潜力探讨. *中国农学通报*, 2010, 26: 320–323
- 64 黄华梅. 上海滩涂盐沼植被的分布格局和时空动态研究. 博士学位论文. 上海: 华东师范大学研究生院, 2009
- 65 于泉洲, 张祖陆, 袁怡. 山东省南四湖湿地植被碳储量初步研究. *云南地理环境研究*, 2010, 22: 88–93
- 66 水利部水文司. 中国水文志. 北京: 中国水利水电出版社, 1997

- 67 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古大学研究生院, 2008
- 68 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞, 编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109-128
- 69 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量的研究. 科技通报, 1999, 15: 330-332
- 70 全国土壤普查办公室. 中国土种志, 第1-6卷. 北京: 中国农业出版社, 1995
- 71 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18: 349-356
- 72 田琦, 李军, 黄方红, 等. 中国土壤分布图. 见: 裴相斌, 编. 中国资源环境数据库(1:400万). 北京: 中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 1996
- 73 李克让, 王绍强, 曹明奎, 等. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 72-80
- 74 Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Glob Change Biol*, 2003, 9: 305-315
- 75 Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84: 131-141
- 76 Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma*, 2007, 138: 119-126
- 77 Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 78-83
- 78 Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. A framework for the 1:1000000 soil database of China. In: *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok*. Inter Union of Soil Sci, 2002, 1757: 1-5
- 79 Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. National scale analysis of soil organic carbon storage in China based on chinese soil taxonomy. *Pe-dosphere*, 2007, 17: 11-18
- 80 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第236次香山科学会议侧记. *地球科学进展*, 2005, 20: 587-590
- 81 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题. *科学通报*, 2011, 56: 2162-2173
- 82 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998
- 83 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980
- 84 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999
- 85 中国植被编辑委员会. 1:1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001
- 86 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被及其地理格局: 中华人民共和国植被图(1:1000000)说明书. 北京: 地质出版社, 2007
- 87 田自强. 中国湿地及其植物与植被. 北京: 中国环境科学出版社, 2011