

DOI: 10. 11766/trxb201305070218

泥炭湿地碳储量核算与其影响因素分析*

周文昌 崔丽娟[†]

(中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091)

摘要 泥炭湿地占全球陆地表面面积的 2% ~ 3% 和全球湿地面积的 40% ~ 70%, 却存储 $3.0 \times 10^{17} \sim 6.0 \times 10^{17}$ g 碳。以前有关泥炭湿地碳储量的研究主要偏重于土壤, 尤其在北方, 缺乏对植被和枯枝落叶层的综合报道。本文综述了近几年来全球泥炭地碳储量(土壤碳储量、植被碳储量和枯枝落叶层碳储量)核算的研究进展。目前, 全球泥炭地碳储量的核算仍存在较大的不确定性, 其主要原因是全球泥炭地碳储量核算方法的数据信息不足, 缺乏植被生物量、地表凋落物、碳质量分数、深度、容重和面积等全面数据, 尤其是关于全球泥炭地面积较大的地区或国家; 其次, 人为干扰活动也进一步增加了全球泥炭地碳储量估算的不确定性, 使得碳储量估算变得更困难。我国湿地面积居亚洲第一, 世界第四, 然而泥炭地/湿地有机碳储量估算与其他国家比较, 相差较大, 数据信息不足且存在较大波动。因此, 为了提高泥炭湿地碳储量的估计精度和预测陆地生态系统应对气候变化响应机制的准确性, 进一步加大泥炭地碳储量研究是非常必要的。

关键词 泥炭湿地; 碳储量; 土壤有机碳; 植被生物量; 凋落物

中图分类号 Q148 **文献标识码** A

泥炭湿地是指泥炭厚度 ≥ 30 cm 或有机质含量超过 50% 的湿地, 全球泥炭地面积大约为 $3.443 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ hm^2 , 大约占陆地表面积 ($14.93 \times 10^9 \sim 15.12 \times 10^9$ hm^2) 的 2.3% ~ 3.3%^[1-6] 和全球湿地面积 ($7.48 \times 10^8 \sim 7.78 \times 10^8$ hm^2) 的 40% ~ 70%^[6-7], 泥炭地吸收大气中碳的速率为 $12.0 \sim 80.0$ $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 代表大气 CO_2 的吸收汇^[2,8-16], 它们储存了 $3.29 \times 10^{17} \sim 6.12 \times 10^{17}$ g 碳^[1-2,17-18], 占到全球陆地土壤 0 ~ 100 cm 有机碳库 (15.02×10^{17} g) 的 21.9% ~ 40.7% 和 0 ~ 300 cm 有机碳库 (23.44×10^{17} g) 的 14.0% ~ 26.1%^[19], 其动态在全球碳循环中扮演着十分重要的作用^[2,20-22]。

国际上有关泥炭湿地碳储量的估算和核算方法主要集中在北方的加拿大、美国、俄罗斯联邦、欧洲(芬兰、苏格兰、爱尔兰), 亚洲东南部的印度尼西亚和马来西亚等国。20 世纪 70 年代, Schlesinger^[23] 第一次报道北方泥炭地面积 2.0×10^8 hm^2 , 土壤 0 ~ 100 cm 的泥炭湿地碳储量为 1.37×10^{17} g; 20 世纪 80 年代 Sjörs^[24] 第二次报道北方泥炭湿地面积 4.0×10^8 hm^2 , 泥炭深度 (> 0 ~ 100 cm) 的土壤碳储

量为 3.0×10^{17} g, 而 Armentano 和 Menges^[25] 报道北方泥炭地面积为 3.49×10^8 hm^2 , 泥炭深度 0 ~ 100 cm 的土壤碳储量为 2.56×10^{17} g。20 世纪 90 年代, 随着国际社会对全球气候变化问题的日益关注, 天然泥炭湿地作为大气 CO_2 的汇和 CH_4 的排放源^[21,26-27], 日益成为国际科学家研究的前沿和热点。Gorham^[2] 估算了北方和亚北极泥炭地面积为 3.46×10^8 hm^2 , 它们的生态系统碳储量大约为 4.62×10^{17} g, 其中 98.5% (4.55×10^{17} g) 以泥炭的形式存储于土壤中, 大约占到全球土壤 0 ~ 100 cm 深度有机碳储量 (1.395×10^{18} g) 的 33%^[28], 而被大量的引用; 又如, Weishampel 等^[29] 报道温带泥炭地生态系统碳密度 (128.6 kg m^{-2}) 是山地森林生态系统碳密度 ($15.3 \sim 19.7$ kg m^{-2}) 的 6 倍 ~ 8 倍, 泥炭地面积仅为研究区的 13%, 却占总碳库的 48%, 大约有 90% ~ 99% 以泥炭的形式存储于土壤中。21 世纪以后, 温室效应已经成为全球关注的一个极其重要的问题^[3], 由于泥炭地是巨大的土壤碳库, 在减缓全球气候变暖的潜力中起着重要的作用。因此, 国际上对泥炭地生态系统碳储量的研究覆盖到热带

* 国家林业公益性行业科研专项(201304315)、国家科技支撑项目(2011BAC02B03)和中国清洁发展机制基金赠款项目(2012076)资助

[†] 通讯作者, E-mail: lkyclj@126.com

作者简介: 周文昌(1983—), 男, 贵州镇远人, 博士研究生, 主要研究湿地生态系统碳循环。E-mail: zhouwchangky@aliyun.com

收稿日期: 2013-05-07; 收到修改稿日期: 2013-10-28

泥炭地^[18]、温带泥炭地^[13,30-32]、寒温带泥炭地^[33-34]、北极冻土区^[35-36]。

中国自然泥炭地面积大约为 42 349 km², 主要分布在青海-西藏高原(29 809 km²)和东北(10 100 km²), 大约占到中国天然泥炭地的 94%^[27]。我国对泥炭地碳储量的研究也取得了一定的进展, 大多集中在中国东北泥炭湿地土壤有机碳密度的研究^[37-43], 对于区域和国家尺度上, 最近也有一些报道^[11,44-46], Zheng 等^[46]最近报道中国湿地生态系统有机碳储量(土壤、植被和水体)大约为 5.39×10^{15} ~ 7.25×10^{15} g, 占到全球湿地有机碳库的 1.3% ~ 3.5%, 而 Liu 等^[44]估算的中国泥炭湿地土壤有机碳储量为 1.5×10^{15} g, 占到中国湿地有机碳储量的 20% ~ 28%^[46]。因此, 中国泥炭地/湿地是一个重要有机碳库, 在区域或全球气候变化中发挥着重要的作用。但是泥炭地/湿地有机碳储量仍存在较大的不确定性, 主要源于泥炭地泥炭深度、容重、泥炭地面积、碳储量空间差异性, 以及田间实测数据的不足^[6,18,31-32,42,46-48]。为此, 进一步加强中国泥炭地/湿地有机碳储量的研究具有重要意义。

1 泥炭湿地生态系统碳储量

泥炭湿地生态系统碳储量包括三部分: 土壤碳储量、植被碳储量和地表枯枝落叶层碳储量。Bernal 和 Mitsch^[49]研究温带湿润、热带湿润和热带干

旱 3 个气候带湿地土壤中无机碳(Inorganic carbon) 占到总碳含量的 0.2% ~ 1.0%, 显示土壤样品中几乎所有的碳是有机碳(Organic carbon)。Gorham^[2]和 Bridgham 等^[4]在 20 世纪末和 21 世纪初分别估算北方和全球泥炭地生态系统碳储量大约均为 4.60×10^{17} g, 98.5% 的碳存储于土壤中, 1.5% 存储于植被中; Gorham 等^[50]据 Yu 等^[17]研究表明全球泥炭地土壤储存 6.12×10^{17} g 碳, 进而认为全球泥炭地生态系统大约包含 5.0×10^{17} ~ 6.0×10^{17} g 有机碳。根据全球泥炭地有机碳储量表明: 置信区间 95% 的全球泥炭地土壤有机碳储量最佳估计值为 458.40×10^{15} g (范围为 309.74×10^{15} ~ 607.06×10^{15} g), 变异系数为 26.12% (表 1)。由于全球或者区域上泥炭地生态系统碳储量的估算大多集中高纬度土壤中, 而植被和地表枯枝落叶层估算较少(表 1)。因此, 本文就国内外泥炭地土壤有机碳储量、植被碳储量和地表枯枝落叶层碳储量的研究进展, 以及不确定性影响因素进行综合分析。

1.1 泥炭湿地土壤有机碳储量

泥炭地主要指 bogs 和 fens 湿地^[2,10], 泥炭地形成与发育开始于过去 1 万 a 左右, 其碳储量大约超过 50% 是过去 4 000 ~ 7 000 a 前存储的^[10,15,47]。然而, 不同作者采用不同方法核算泥炭地土壤有机碳储量, Armentano 和 Menges^[25]采用碳密度乘以面积估算全球泥炭地 (3.93×10^8 hm²) 土壤 0 ~ 100 cm 有机碳储量为 2.76×10^{17} g; Gorham^[2]以前苏联、美

表 1 不同作者估算的泥炭地碳储量

Table 1 Peatland carbon storages estimated by different authors

地区 Region	面积 Area ($\times 10^6$ hm ²)	土壤 Soil ($\times 10^{15}$ g C)	植被 Vegetation ($\times 10^{15}$ g C)	年代 Year	参考文献 References
北方 Northern	200	137		1977	[23]
北方 Northern	400	300		1980	[24]
北方 Northern	280	202		1982	[28]
北方 Northern	110	125		1989	[51]
北方 Northern	346	455	6.8	1991	[2]
北方 Northern	398.5	234 ~ 252		1996	[52]
北方 Northern	346	270 ~ 370		2002	[11]
全球 Global	393	276		1986	[25]
全球 Global	398.5	462(329 ~ 525)		1993	[1]
全球 Global	344.3	462	6.9	2006	[4]
全球 Global	399.7	480(469 ~ 486)		2011	[18]
全球 Global	441.35	612		2010, 2011	[17], [20]

国、加拿大和芬诺斯坎底亚(芬兰、挪威、丹麦和瑞典)泥炭地平均泥炭深度 2.3 m、平均有机碳质量分数 517 g kg^{-1} 、平均容重 0.112 g cm^{-3} 、面积为 $3.46 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 估算北方和亚北极土壤有机碳储量($4.55 \times 10^{17} \text{ g}$)较 Post 等^[28]报道的北方泥炭地土壤碳储量($2.02 \times 10^{17} \text{ g}$)增加了 1 倍多,并被大量的引用。Turunen 等^[11]以芬兰的泥炭地核算因子数据推算到北方泥炭地,估算北方泥炭地土壤碳储量为 $2.70 \times 10^{17} \sim 3.70 \times 10^{17} \text{ g}$,并指出 Gorham^[2]估算的北方泥炭地土壤有机碳储量较大。Yu 等^[17]通过泥炭年龄-碳积累率-面积估算北方泥炭地大约为 $5.47 \times 10^{17} \text{ g}$,全球泥炭地土壤有机碳储量为 $6.12 \times 10^{17} \text{ g}$; Turunen 等^[11]采用泥炭平均年龄 4 300 a,估算北方和亚北极泥炭地土壤碳储量为 $2.73 \times 10^{17} \text{ g}$; Page 等^[18]采用泥炭地体积法估算热带泥炭地碳储量为 $88.6 \times 10^{15} \text{ g}$ ($81.7 \times 10^{15} \sim 91.9 \times 10^{15} \text{ g}$),再以过去的泥炭地面积、碳密度($1.0995 \text{ Gg hm}^{-2}$)、平均深度(1.5 m)估算非热带地区,得出全球泥炭地土壤有机碳储量大约为 $4.80 \times 10^{17} \text{ g}$ ($4.69 \times 10^{17} \sim 4.86 \times 10^{17} \text{ g}$)。Liu 等^[44]采用泥炭体积法估算我国泥炭地土壤有机碳储量为 $1.5 \times 10^{15} \text{ g}$,大约占到全球泥炭地土壤有机碳储量的 0.2% ~ 0.5%。而有关陆地生物圈生态系统的碳储量评估方法,即通过不同生态系统土壤有机碳密度和泥炭地面积相乘估算泥炭地碳储量是普遍的方法^[23,47],而土壤有机碳密度常常是基于一定土壤深度的容重、有机碳质量分数和深度来计算的,其公式:

$$C_{\text{pool}} = \sum_i^k (A_i \times \text{SOC}D_i)$$

$$\text{SOC}D_i = \sum [C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)/100]$$

式中, C_{pool} 为土壤有机储量 (kg); A_i 为某种泥炭地 i 面积 (m^2); $\text{SOC}D_i$ 为某种泥炭地 i 的土壤有机碳密度; C_i 为 i 土层土壤有机碳质量分数 (g kg^{-1}); D_i 为 i 土层土壤容重 (g cm^{-3}); E_i 为 i 土层厚度 (cm); G_i 为 i 土层直径 $\geq 2 \text{ mm}$ 的砾石所占的体积比例 (%)。

但是,随着科学技术的发展,遥感和地理信息系统在估算泥炭地土壤有机碳储量中得以应用,通过制图的方法和土壤属性,同时结合野外数据采集估算区域或国家尺度泥炭地土壤碳储量。Beilman 等^[33]采用高分辨率(1:50 000)和地统计学法估算加拿大麦克肯齐盆地泥炭地土壤碳储量($9.82 \times 10^{14} \sim 10.25 \times 10^{14} \text{ g}$)较采用平均深度估算的泥炭地碳储量($9.14 \times 10^{14} \sim 9.27 \times 10^{14} \text{ g}$)提高了大约 10%; Sheng 等^[34]采用地理信息系统技术(GIS)和田间土

壤钻心估算西伯利亚泥炭地碳储量为 $7.0 \times 10^{16} \text{ g}$,较以前估计的泥炭地土壤有机碳储量增加了 $15.11 \times 10^{15} \sim 30.19 \times 10^{15} \text{ g}$; Chapman 等^[31]采用 1:250 000 分辨率土壤制图数据和 GIS 估算欧洲苏格兰泥炭地碳储量为 $1.62 \times 10^{15} \text{ g}$,较 Milne 和 Brown^[53]估计的苏格兰泥炭地土壤碳储量($4.523 \times 10^{15} \text{ g}$)减少了 $2.9 \times 10^{15} \text{ g}$ 。因此,遥感、GIS 结合相关变量可能是提高泥炭地碳储量估计精度的有效方法。

1.2 泥炭湿地植被碳储量

泥炭地植被碳储量远远低于土壤有机碳储量,泥炭地植被碳储量大约有 1.0% ~ 10% 存储在植被中^[2,4,29]。泥炭地植被地上和地下生物量的大小变化主要依赖于它们是否为森林泥炭地^[3],例如,Grigal 等^[54]通过对比实验研究报道的非森林泥炭地生物量(干重)低达 760 g m^{-2} ,而森林泥炭地高达 $13 800 \text{ g m}^{-2}$,Campbell 等^[55]报道加拿大西部泥炭地植被平均生物量为 $1 198 \pm 1 556 \text{ g m}^{-2}$,Vitt 等^[10]报道的加拿大西部森林泥炭地、灌木泥炭地和草丛泥炭地地上平均生物量分别为 775、275 和 254 g m^{-2} ,Weishampel 等^[29]研究的森林泥炭地植被碳密度(73.3 t hm^{-2})大约为草本泥炭地植被碳密度(12.5 t hm^{-2})的 6 倍。植被碳储量是以植被生物量和碳质量分数转化为碳储量而计算得来。基于不同尺度研究,泥炭地植被碳储量估计主要有实测法、模型估测法、遥感信息与生物量实测估测法等。

样地生物量实测法是估算泥炭地植被碳储量最普遍的方法。一般是在典型的泥炭地生态系统建立标准样地,通过实测乔木、灌木、草本地上和地下生物量,再结合碳质量分数转化系数或者实测植被碳质量分数计算出单位面积的碳密度,最后通过植被碳密度乘以区域不同类型的泥炭地面积。例如,随机选取不同胸径高度的标准木株数,通过树木解析法和建立模型估测泥炭地乔木生物量^[38,56]; Weishampel 等^[29]通过记录物种、木质胸高直径($\geq 2.5 \text{ cm}$)结合异速生长模型估算地上生物量;灌木和草本生物量采用小样方全部收获法^[38,57]。然而,对于地下生物量的估测,胸高直径 $< 2.5 \text{ cm}$ 的木本和草本植物使用根冠比 0.3 ~ 0.5^[29,58],Moore 等^[59]报道的为 6.25。样地实测法是最可靠、最成熟和最基本的方法,广泛地应用于小尺度上的植被生物量的估测^[48]。但是对于中尺度或大尺度,泥炭地植被碳储量的估算难以实现。

Gorham^[2]基于植被平均碳密度 2 kg m^{-2} 初步

估算北方泥炭地植被碳储量为 6.8×10^{15} g; Bridgham 等^[4]以森林植被碳密度为 5.49 kg m^{-2} ($4.9 \sim 6.6 \text{ kg m}^{-2}$) 和非森林植被碳密度 2 kg m^{-2} 估算了北美泥炭地植被碳储量为 4.8×10^{15} g, 全球泥炭地植被碳储量为 6.9×10^{15} g; Clymo^[60]估算全球泥炭地泥炭藓 (*Sphagnum*) 植被生物量(干质量重)为 2.6×10^{15} g, 但不同泥炭藓植被生产力存在较大的变化 ($16 \sim 388 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[61]。Milne 和 Brown^[53]采用遥感 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率植被制图和土地不同植被覆盖类型的平均碳密度估算英国植被碳储量为 1.14×10^{14} g; Vitt 等^[10]以 1:250 000 湿地制图信息、泥炭地 $0.25^\circ \times 0.5^\circ$ 栅格单元 ($0.25^\circ \text{ latitude} \times 0.5^\circ \text{ longitude grids cell}$)、地上植被生物量和碳质量分数估算加大拿西部泥炭地地上植被碳储量为 1.0×10^{14} g。然而,由于地下生物量缺乏大量的研究,遥感信息仅能估算地上植被生物量,必然导致不同地区泥炭地植被生物量存在较大的不确定性。Bridgham 等^[4]假设泥炭地群落地下生物量比例为 50% 来估算北美和全球泥炭地植被碳储量,显然较 Laiho 和 Laine^[56]报道的芬兰泥炭地苏格兰松树 (*Pinus sylvestris* L.) 地下生物量比例为 30% 要大。

1.3 泥炭湿地地表凋落物碳储量

泥炭地地表凋落物层碳储量的研究报道很少,主要是集中在凋落物分解率的研究。据 Giese^[62]报道天然恢复或者较成熟的河岸带森林湿地每年的凋落物量占到净初级生产力(NPP)的 55% ~ 59%, 而以草本为优势的湿地,每年凋落物量仅占到 NPP 的 5%。因此,这可能导致不同种群湿地凋落物量对生态系统碳汇潜力的贡献存在差异。Greenway^[63]报道澳大利亚昆士兰(Queensland)泛洪平原湿地(Floodplain site)和森林湿地(*Melaleuca quinquenervia*)两种立地的凋落物量为 $725 \sim 809 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $675 \sim 764 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 地表凋落物储量为 2320 g m^{-2} 和 3457 g m^{-2} , 且存在显著地季节和年际变化,森林乔木的叶生物量所占比例较大(56% ~ 65%); van 等^[64]研究美国南部佛罗里达白千层(*Melaleuca quinquenervia*)6种森林湿地2年间凋落物干重在 $650 \sim 990 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间波动(乔木叶子的凋落物量占到 70%), 且不同地表水位下的凋落物量存在差异,与 Greenway^[63]报道的澳大利亚森林湿地凋落物年际变化趋势一致。Weishampel 等^[29]报道温带泥炭地地表层凋落物碳储量为 $100 \sim 1400 \text{ g m}^{-2}$, 而周文昌^[38]报道温带森林泥炭地地表凋落

物碳储量为 $650 \sim 2070 \text{ g m}^{-2}$ 。以上研究表明不同泥炭地/湿地凋落物储量存在空间差异,将可能导致不同植被群落的泥炭积累潜力不同。例如, Thormann 等^[65]研究3种养分梯度的泥炭地/湿地(bog-fen-marsh)第一年凋落物损失量分别为 14% (bogs)、25% ~ 61% (fens) 和 57% ~ 62% (marshes), 而以 *Sphagnum*、Brown moss 为优势植被的泥炭地(bog 和 fen), 与无藓类生长的植被群落湿地(湖泊 fen 和 marshes)第一年凋落物积累率分别为 $170 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $130 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $50 \sim 83 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 指出生长着藓类或灌木/乔木的泥炭地较以禾本科植物为优势群落的湿地有更高的泥炭积累潜力,进而表明了 Turunen 等^[11]报道芬兰泥炭地 bog 长期的碳积累潜力 ($20.8 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 是显著地高于泥炭地 fen ($16.9 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

2 泥炭湿地碳储量核算不确定性的影响因素

2.1 植被生物量

植被碳储量是以植被生物量与碳质量分数计算得来, Vitt 等^[10]估计加拿大西部泥炭地植被碳储量,是以 Campbell 等^[55]的生物量和净初级生产力为参考依据,由于加拿大泥炭地生物量缺乏标准的测量,尤其是地下生物量和生产力的研究缺乏,这就必然导致在估计泥炭地植被碳储量出现较大的不确定性;同理, Gorham^[2]和 Bridgham 等^[4]在估计泥炭地植被碳储量均为参考有限植被生物量的数据,得出一个平均值,并应用到区域或全球。Dyck 和 Shay^[57]估计加拿大安大略(Ontario)的森林泥炭地植被地上生物量为 $7189 \sim 72909 \text{ kg hm}^{-2}$, 凋落物储量为 $1181 \sim 7664 \text{ kg hm}^{-2}$; Moore 等^[59]估计同一地点灌丛(bog)和草本(fen)泥炭地地上植被生物量分别为 4870 kg hm^{-2} 和 3170 kg hm^{-2} , 较 Dyck 和 Shay^[57]研究的森林泥炭地植被地上生物量减少了 $2319 \sim 69739 \text{ kg hm}^{-2}$; Grigal 等^[54]报道美国北部温带明尼苏达州的森林泥炭地植被地上生物量为 $35920 \sim 101755 \text{ kg hm}^{-2}$, Campbell 等^[55]综述北方泥炭地/湿地植被地上生物量(未包含藓类)在 $927 \sim 159950 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间波动。然而, Moore 等^[59]报道泥炭地植被地下生物量存在空间变化:泥炭地草丘(bog hummock)为 24000 kg hm^{-2} , 泥炭地草丘下(hollows)为 14000 kg hm^{-2} , 泥炭地(fen)为 12000 kg hm^{-2} 。据研究的森林泥炭地植被生物量

地下与地上之比为 20% ~ 64% (即植被地上生物量大于地下生物量)^[54,58,66], 反之, Moore 等^[59] 报道的灌木和草本泥炭地为 6.25。Vasander^[66] 报道泥炭地植被生物量为 11 700 kg hm⁻², 周文昌^[38] 报道的森林泥炭沼泽植被生物量为 30 310 ~ 138 080 kg hm⁻²。然而, 藓类植被在泥炭地碳循环中也起着重要作用, 它们的生物量占到地上生物量的 30% ~ 50%^[59], 碳储量占到地上植被碳储量的 46%^[57]。泥炭地活体植被碳密度在 1 ~ 70 t hm⁻² 之间波动^[38,54,57]。以上研究表明了泥炭地生物量存在较大空间变化可能与物种形成的环境条件 (例如, 泥炭水位与化学性质) 有关^[59,67]。因此, 进一步研究泥炭湿地生物量是准确估计其碳储量的必要条件, 尤其是植物根系和藓类在泥炭地碳循环中起着重要的作用^[59,65]。

2.2 植被 (或土壤) 有机碳质量分数

不同作者采用不同碳质量分数作为泥炭地碳储量的一个核算因子, 通常在 400 ~ 600 g kg⁻¹ 之间。Gorham^[2] 采用 450 g kg⁻¹ 的植被碳质量分数估算北方和亚北极植被碳储量; Milne 和 Brown^[53] 采用碳质量分数为 420 g kg⁻¹ 和 460 g kg⁻¹ 分别核算针叶树种和阔叶树种的植被木质部碳储量; Isaev 等^[68] 采用 500 g kg⁻¹ 核算树干、枝、根, 而乔木层叶、林下层植被采用 450 g kg⁻¹ 核算森林植被碳储量。Laiho 和 Laine^[56] 实测了植物样品的碳质量分数, 并将地上乔木层生物量通过碳质量分数转化为碳储量, 超过 70% 的碳储存于乔木层木质部, 导致了较通常从生物量到碳储量的估算采用 500 g kg⁻¹ 的碳质量分数转化因子的平均碳储量增加 5.6%。Giese 等^[62] 实测河岸带森林凋落物叶样品的碳质量分数, 河岸带森林物种混合叶的碳质量分数小于 500 g kg⁻¹, 而在高峰期 (秋季) 降落的凋落物碳质量分数高于 500 g kg⁻¹, 认为可能与气候因子有关 (例如, 降雨期间的淋溶作用)。周文昌^[38] 实测的植被碳质量分数: 森林泥炭沼泽草本平均值为 420 g kg⁻¹, 而木质部平均为 480 ~ 490 g kg⁻¹。因此, 植被物种碳质量分数的变化可能影响植被生物量转化为碳储量的估算。

但有关土壤有机碳储量估算中, 土壤有机碳质量分数有实测和固定比例值核算的两种途径。通常采用土壤有机碳质量分数为 500 g kg⁻¹^[11,18,24-25], 泥炭地土壤有机碳质量分数均值为 511 g kg⁻¹, 变异系数 (CV = 100 × 标准差/算术平均值) 为 9.8% (表 2)。进而一些资料表明不同泥炭地详细的土壤

有机碳质量分数或者有机质含量仍未完全清楚, 但是他们存在较窄的变化已不是影响泥炭地碳库核算的主要误差源^[31,74]。但是许多研究表明有更低的土壤有机碳质量分数: 294.9 g kg⁻¹^[13]、230 ~ 339 g kg⁻¹^[37]、187 ~ 389 g kg⁻¹^[42] 和 260 g kg⁻¹^[73]。这可能是由于泥炭地的土壤 > 0 ~ 100 cm 的有机碳质量分数有较少的数据报道, 而采用其他泥炭地土壤有机碳质量分数替代^[31,33], 为了精确估计泥炭地碳储量, 有必要进一步研究泥炭地土壤有机碳质量分数。

2.3 泥炭深度

泥炭深度和容重是估算泥炭地土壤碳储量大小争论较大的两个主要因素^[11,31,33,74], 这主要是由于泥炭地容重 (见 2.4 部分) 和深度的不确定性或者数据不足^[11,18,31,33,69]。因此, 不同深度和容重得出不同泥炭地碳储量, 例如, Maltby 和 Immirzi^[1] 估算全球泥炭地从平均深度 1 m 的土壤有机碳储量 2.76 × 10¹⁷ g 到 2.3 m 的 5.25 × 10¹⁷ g; Turunen 等^[11] 估算芬兰未排水泥炭地平均深度为 1.1 m, 并结合美国、加拿大、爱尔兰和芬兰泥炭地泥炭深度和容重, 采用泥炭平均深度 1.7 m 和容重 0.091 g cm⁻³, 估算北方和亚北极泥炭地碳储量 (2.74 × 10¹⁷ g) 较 Gorham^[2] 估算的 (4.55 × 10¹⁷ g) 减少了 40%, 认为是 Gorham^[2] 采用的泥炭平均深度 (2.3 m) 和容重 (0.112 g cm⁻³) 较高所致; 又如, Page 等^[18] 估算热带地区泥炭地碳储量对于有资料报道国家平均深度采用 1.3 ~ 8 m, 而对于未报道的国家泥炭沉积深度均采用 0.5 m。因此, 泥炭地碳储量估算存在较大的变化主要反映了全球泥炭地泥炭沉积深度的不确定性 (表 3)。

2.4 土壤容重

土壤容重视为引起泥炭地土壤碳储量变化争论较大的影响因素之二^[31]。Gorham^[2] 报道北方和亚北极泥炭地平均土壤容重为 0.112 g cm⁻³; Sheng 等^[34] 报道俄罗斯西伯利亚泥炭地大多分布在 50° ~ 70° N, 以 63° N 为南北界, 泥炭地土壤容重从南 (0.056 g cm⁻³) 至北 (0.418 g cm⁻³) 逐渐增加, 平均值为 0.094 ~ 0.128 g cm⁻³; Turunen 等^[15] 报道俄罗斯西伯利亚泥炭地为 0.093 g cm⁻³; Beilman 等^[33] 也报道加拿大麦肯齐盆地泥炭地平均土壤容重为 0.093 g cm⁻³; Vitt 等^[10] 报道草丛泥炭地平均土壤容重 0.094 g cm⁻³ 和木本植被泥炭地为 0.105 g cm⁻³; Yu^[77] 报道加拿大西部泥炭地为 0.122 g cm⁻³ (0.068 ~ 0.176 g cm⁻³); Robinson 和 Moore^[16]

报道加拿大西北部不同类型泥炭地土壤容重存在显著地变化 ($0.071 \sim 0.102 \text{ g cm}^{-3}$)。Chapman 等^[31]指出一些研究人员假设泥炭地土壤容重随深度的增加而增加,蔡体久等^[41]报道的小兴安岭森林泥炭藓泥炭地是随深度增加 ($0 \sim 60 \text{ cm}$) 而增加 ($0.027 \sim 0.097 \text{ g cm}^{-3}$),并指出土壤有机碳质量分数与土壤容重呈显著线性负相关 ($R^2 = 0.81$),周文昌^[38]报道的小兴安岭森林泥炭藓泥炭地也并不是随着深度增加,即 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 的 0.27 g cm^{-3} 增加至 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 的 0.40 g cm^{-3} ,然后逐渐减少至 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 的 0.27 g cm^{-3} ;Tomlinson 和 Davidson^[69]报道北爱尔兰 4 个富营养泥炭地 (bogs) 平均土壤容重为 0.069 g cm^{-3} ,并未发现土壤容重随着深度增加而

显著地增加,土壤容重的降低可能是导致泥炭地碳储量估算较以前估算较低的原因。Chapman 等^[31]报道苏格兰泥炭地 $0 \sim 0.3 \text{ m}$ 、 $0.3 \sim 1 \text{ m}$ 、 $>1 \text{ m}$ 的泥炭地土壤容重分别为 $0.134 \sim 0.136$ 、 $0.114 \sim 0.123$ 和 $0.092 \sim 0.143 \text{ g cm}^{-3}$,并存在随着泥炭深度的增加而相对不变或甚至降低,Turunen 等^[11]采集芬兰 228 个点 1 302 个样本数泥炭地平均土壤容重为 0.081 g cm^{-3} 和不同泥炭地整个泥炭剖面平均深度的土壤容重平均为 0.078 g cm^{-3} ,指出 Gorham^[2]采用北方和亚北极泥炭地土壤平均容重为 0.112 g cm^{-3} 可能太高,并可能是碳储量估算的主要误差源。

表 2 不同地区泥炭地土壤有机碳质量分数

Table 2 Soil organic carbon mass fractions in peatlands in different regions

地区 Region	土壤有机碳质量分数 Soil organic carbon mass fractions (g kg^{-1})	年代 Year	参考文献 References
俄罗斯 Russia	560	1995	[12]
爱尔兰 Irish	511	2000	[69]
芬兰 Finland	539	1998	[70]
瑞典 Sweden	500	2002	[11]
加拿大 Canada	520	2001	[71]
加拿大西部 Western Canada	457 462	1999	[16]
加拿大西 Western Canada	518	2000	[10]
加拿大麦肯齐盆地 Mackenzie River Basin of Canada	520	2008	[33]
西伯利亚平原 West Siberian lowland	520	2004	[34]
北方 Northern	517	1991	[2]
加里曼丹 Kalimantan	620	2004	[72]
热带东南亚 Southeast Asia	416	2002	[73]
热带 Tropics	500	2011	[18]
小兴安岭 Xiaoxing'an	474	2010	[41]
中国 Mountains of China	438	2010	[43]
小兴安岭 Xiaoxing'an	438	2010	[43]
中国 Mountains of China	580	2012	[44]
中国 China	580	2012	[44]
全球 Global	550	1993	[1]
平均值 \pm 标准差 Mean \pm standard deviation (n = 18)	511 \pm 50		

表 3 不同地区泥炭地深度

Table 3 Thicknesses of the peatlands in different regions

地区 Region	平均深度 Mean depth (m)	年代 Year	参考文献 References
安大略哈得逊湾平原 Hudson Bay Lowland	2.2	1994	[75]
北美 North American	1.37 ~ 2.55	2011	[76]
芬兰 Finland	2.49	2012	[50]
苏格兰 Scottish	1.1	2002	[11]
美国 American	2.0	2009	[31]
美国明尼苏达 Minnesota	2.5	1991	[2]
加拿大 Canada	1.0 ~ 2.83	2009	[29]
加拿大西部 Mackenzie River Basin of Canada	2.2	1991	[2]
加拿大西部 Western Canada	2.52	2008	[33]
俄罗斯 Russian	2.59	2000	[10]
西伯利亚 West Siberian	2.5	1991	[2]
热带地区 Tropics	2.2	1995	[12]
中国三江平原 Sanjiang plain of China	2.0 ~ 2.8	2004	[34]
	0.5 ~ 8	2011	[18]
	1.4	2011	[13]

2.5 泥炭湿地面积

全球泥炭地面积大约为 $3.443 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ hm^2 ^[1,4,6],但普遍采用全球泥炭地面积为 4.0×10^8 hm^2 ^[1,6,18],Joosten 和 Clarke^[6]综合报道世界有 6 个国家泥炭地面积占到全球泥炭地面积的 93%——俄罗斯为 1.42×10^8 hm^2 、加拿大为 1.235×10^8 hm^2 、美国为 6.25×10^7 hm^2 、芬兰为 9.6×10^6 hm^2 、瑞典为 7.0×10^7 hm^2 和印度尼西亚为 2.7×10^7 hm^2 。然而,由于不同国家定义分类的泥炭地不同,导致泥炭地面积存在较大波动^[6,18,31,78]:一些国家定义泥炭地的泥炭有机质含量 $\geq 65\%$ 和泥炭厚度 ≥ 30 cm,而其他国家定义泥炭厚度为 ≥ 40 cm,甚至 ≥ 50 cm,有机质含量达到 $\geq 30\% \sim 35\%$ 的来计算泥炭地面积和碳动态。例如,Maltby 和 Immirzi^[1]以有机质含量 $\geq 50\%$ 或者泥炭深度 ≥ 30 cm 定义的全球泥炭地面积大约为 4.0×10^8 hm^2 ,并认为泥炭地面积存在较大差异是由于不同的制图方法;而 Bridgham 等^[4]以美国和加拿大最新的土壤分类定义泥炭深度 ≥ 40 cm,其全球泥炭地面积为 3.443×10^8 hm^2 ;Page 等^[18]和 Sheng 等^[34]采用泥炭厚度 ≥ 50 cm 计

算区域上泥炭地碳储量,以及论述区域上泥炭地面积的变化影响到其碳储量的变化。因此,泥炭地标准化调查(例如,陆地生态系统的描述和精确地分类)和合理评估方法为更精确地估算全球泥炭地面积和碳储量起着重要的作用^[18,33,78]。

表 4 不同地区泥炭地土壤有机碳储量

Table 4 Soil organic carbon storage of the peatlands in different regions

地区 Region	面积 Area ($\times 10^6$ hm^2)	土壤 Soil ($\times 10^{15}$ g C)	年代 Year	参考文献 References
加拿大 Canada	113		1983	[79]
加拿大西部 Western Canada	124	154	1999	[80]
俄罗斯 Russia	36.515 7	47.9	2000	[10]
北美 North American	165	215	1995	[12]
西伯利亚平原 West Siberian	116	156	2002	[81]
苏格兰 Scottish	137.2	178	2006	[4]
芬兰 Finland	163	163	2012	[50]
北方 Northern	59.24	70	2004	[34]
热带 Tropics	2.625	4.523	1997	[53]
中国热带地区 Tropical China	1.727	1.62	2009	[31]
中国 China	4.25	2.257	2002	[11]
中国 China	400	547	2010, 2011	[17],[20]
中国 China	41.5	70	1993	[1]
中国 China	44.102 5	88.6	2011	[18]
中国 China	36.85	50	2010, 2011	[17],[20]
中国 China	0.531 2	0.268	2011	[18]
中国 China	3.477 ~ 13.083	—	1993	[1]
中国 China	1.044 ^[83]	1.5	2012	[44]

我国湿地面积居亚洲第一,世界第四,泥炭地土壤有机碳储量为 1.5×10^{15} g^[44],这个值远远小于其他国家估算的泥炭地土壤碳储量(表 4)。尹善春^[82]20 世纪 80 年代调查我国泥炭资源的泥炭地面积为 1.044×10^6 hm^2 ,而 Ding 等^[27]21 世纪初第一次采用的我国自然泥炭地面积为 4.2×10^6 hm^2 初步估算甲烷(CH_4)排放,该面积大约是前者的 4 倍;Page 等^[18]最近报道我国热带地区泥炭地面积 $531 200$ hm^2 计算热带和全球泥炭地碳储量。我国

早期泥炭资源调查若尔盖高寒泥炭地面积为 282 945 hm^2 ^[44,82],而 Zhang 等^[83]采用遥感信息报道若尔盖高原泥炭地面积为 473 348 hm^2 ,较前者增加了 190 403 hm^2 。因此,不同作者为了不同目的以不同方法研究泥炭地^[12],导致了泥炭地面积存在较大的波动^[34]。据 Sheng 等^[34]采用 GIS 和泥炭地剖面数据信息报道西伯利亚平原泥炭地面积($5.924 4 \times 10^7 \text{hm}^2$)和碳储量($7.0 \times 10^{16} \text{g}$)较以前报道的泥炭地面积($3.19 \times 10^7 \sim 5.83 \times 10^7 \text{hm}^2$)和碳储量($4.0 \times 10^{16} \sim 5.5 \times 10^{16} \text{g}$)分别增加了 $9.44 \times 10^5 \sim 27.34 \times 10^5 \text{hm}^2$ 和 $15.11 \times 10^{15} \sim 30.19 \times 10^{15} \text{g}$ 。因此,通过地理信息系统和遥感信息来加强我国泥炭地面积调查和修订,为精确估计我国泥炭地碳储量具有重要意义。

3 结语与展望

全球泥炭地生态系统碳储量大约为 $5.0 \times 10^{17} \sim 6.0 \times 10^{17} \text{g}$,由于泥炭地生态系统碳储量估算多集中高纬度土壤中,根据资料,全球泥炭地土壤有机碳储量最佳估计为 $4.58 \times 10^{17} \text{g}$,变异系数为 26%,超过 76% ~ 90% 以上的碳存储于土壤中,为减缓全球气候变暖起着重要的作用。但是由于全球泥炭地碳储量是基于资料不足和假设相关因子而估算的,使得全球泥炭地碳储量仍存在较大的不确定性。例如, Yu^[47]估算的北方泥炭地碳储量(500 ± 100) $\times 10^{15} \text{g}$ 与其他文献资料比较,不确定性存在 20%; Bridgham 等^[4]估算的北美湿地碳储量潜力的不确定性超过 100%; Milne 和 Brown^[53]估算苏格兰泥炭地碳储量存在 50% 的不确定性,这种不确定性主要是由于泥炭地植被生物量(包括枯枝落叶层)、碳质量分数、泥炭深度、容重和面积的差异。因此,由于泥炭地碳储量核算因子的实测数据较少,而精确估算全球或者区域泥炭地碳储量存在较大难度。为了确保泥炭地碳储量精确估计,今后开展泥炭地碳储量研究的工作主要集中加大区域上泥炭地碳储量核算因子的实测调查——植被生物量(尤其是地下部分和地表枯枝落叶层)、泥炭深度、容重和面积等全面数据,特别是泥炭地面积较大的国家(俄罗斯、加拿大、美国和芬兰等)或者地区(西伯利亚、北美、热带和中国东北和若尔盖高原)。例如, Chapman 等^[31]通过更好地整合泥炭地泥炭深度,而容重、深度、面积和碳质量分数的相关参数误差率(标准误差/平均值)分别减少 8.3%、

7.2%、4.5% 和 3.4%,最终苏格兰泥炭地碳储量误差率缩小 4.3%。当然,自然因素和人为干扰活动也可能进一步加大泥炭地碳储量和碳汇评估的不确定性^[21],例如,火烧^[37,84-86]、排水造林^[70,87-88]、开垦^[89-90]和采伐^[91]使得泥炭地碳储量估算变得更复杂。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007 报告全球平均温度升高 $0.3^\circ\text{C} \sim 0.6^\circ\text{C}$,自 1975 年以来,人类活动的净影响已成为变暖的原因之一(可靠性达到 90% 以上)^[92]。这些干扰因素可能进一步加大预测泥炭地应对气候变化反馈机制的不确定性^[93]。因此,加大泥炭地碳储量的研究具有重要意义。

参考文献

- [1] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils, regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993, 27(6): 999—1023
- [2] Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182—195
- [3] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate change 2001: The scientific basis*// Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001
- [4] Bridgham S D, Megonigal P J, Keller J K, et al. The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 2006, 26(4): 889—916
- [5] Paavilainen E, Päivänen J. *Peatland forestry: Ecology and principles*. Ecological Studies 111. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1995
- [6] Joosten H, Clarke D. *Wise use of mires and peatlands*. Saarijärvi. Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, Finland; International Mire Conservation Group and International Peat Society, 2002
- [7] Ramsar Convention Secretariat. *The Ramsar Convention Manual: A guide to the convention on wetlands (Ramsar, Iran, 1971)*, 6th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland, 2013
- [8] Roulet N T, Lafleur P M, Richard P J H, et al. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 397—411
- [9] Caitlin E, Pries H, Schuur E A G, et al. Holocene carbon stocks and carbon accumulation rates altered in soils undergoing permafrost thaw. *Ecosystems*, 2012, 15(1): 162—173
- [10] Vitt D H, Halsey L A, Bauer I E, et al. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2000, 37(5): 683—693
- [11] Turunen J, Tomppo E, Tolonen K, et al. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland-application to bore-

- al and subarctic regions. *Holocene*, 2002, 12(1): 69—80
- [12] Botch M S, Kobak K I, Vinson T S, et al. Carbon pools and accumulation in peatlands of the Former Soviet Union. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 37—46
- [13] Bao K S, Zhao H M, Xing W, et al. Carbon accumulation in temperate wetlands of Sanjiang plain, northeast China. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(6): 2386—2397
- [14] Chimner R A, Karberg J M. Long-term carbon accumulation in two tropical mountain peatlands, Andes Mountain, Ecuador. *Mires and Peat*, 2008, 3(4): 1—10
- [15] Turunen J, Tahvanainen T, Tolonen K, et al. Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia *Sphagnum* peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21 000 years. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 285—296
- [16] Robinson S D, Moore T R. Carbon and peat accumulation over the past 1 200 years in a landscape with discontinuous permafrost, northwestern Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(2): 591—601
- [17] Yu Z C, Loisel J, Brosseau D P, et al. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13), doi: 10. 1029/2010GL043584
- [18] Page S E, Rieley J O, Banks C J. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 798—818
- [19] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423—426
- [20] Yu Z C. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications. *Holocene*, 2011, 21(5): 761—774
- [21] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, 20(4): 605—615
- [22] 宋洪涛, 崔丽娟, 栾军伟, 等. 湿地固碳功能与潜力. 世界林业研究, 2011, 24(6): 6—11. Song H T, Cui L J, Luan J W, et al. Wetland function and potential in carbon sequestration (In Chinese). *World Forestry Research*, 2011, 24(6): 6—11
- [23] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8(1): 51—81
- [24] Sjörs H. Peat on earth: Multiple use or conservation. *Ambio*, 1980, 9(6): 303—308
- [25] Armentano T V, Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 755—774
- [26] 栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛, 等. 国外湿地生态系统碳循环研究进展. 湿地科学, 2012, 10(2): 235—242. Luan J W, Cui L J, Song H T, et al. Foreign research progress on carbon cycle in wetland ecosystems (In Chinese). *Wetland Science*, 2012, 10(2): 235—242
- [27] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(5): 751—759
- [28] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156—159
- [29] Weishampel P, Kolka R, King J Y. Carbon pools and productivity in a 1-km² heterogeneous forest and peatland mosaic in Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 747—754
- [30] Bao K S, Yu X F, Jia L, et al. Recent carbon accumulation in Changbai Mountain peatlands, northeast China. *Mountain Research and Development*, 2010, 30(1): 33—41
- [31] Chapman S J, Bell J, Donnelly D, et al. Carbon stocks in Scottish peatlands. *Soil Use and Management*, 2009, 25(2): 105—112
- [32] Zhang W J, Xiao H A, Tong C L, et al. Estimating organic carbon storage in temperate wetland profiles in northeast China. *Geoderma*, 2008, 146(1/2): 311—316
- [33] Beilman D W, Vitt D H, Bhatti J S, et al. Peat carbon stocks in the southern Mackenzie River Basin: Uncertainties revealed in a high-resolution case study. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1221—1232
- [34] Sheng Y W, Smith L C, MacDonald G M, et al. A high-resolution GIS-based inventory of the West Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3), doi: 10. 1029/2003GB002190
- [35] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2), doi: 10. 1029/2008GB003327
- [36] O'Donnell J A, Jorgenson M T, Harden J W, et al. The effects of permafrost thaw on soil hydrologic, thermal, and carbon dynamics in an Alaskan peatland. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 213—229
- [37] 周文昌, 牟长城, 刘夏, 等. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响. 生态学报, 2012, 32(20): 6387—6395. Zhou W C, Mu C C, Liu X, et al. Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii-carex schmidtii* swamps in the Xiaoxing'an Mountains of northeast China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6387—6395
- [38] 周文昌. 火干扰对小兴安岭森林沼泽生态系统碳储量的影响研究. 哈尔滨: 东北林业大学生态研究中心, 2012. Zhou W C. Effects of fire on carbon storage from forested swamps ecosystem in Xiaoxing'an Mountains, northeast China (In Chinese). Harbin: Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, 2012
- [39] 殷书柏, 杨青, 吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤有机碳剖面分布及碳贮量. 土壤通报, 2006, 37(6): 659—661. Yin S B, Yang Q, Lu X G. Distribution and accumulation of organic carbon in typical annular wetlands of the Sanjiang plain (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 659—661
- [40] 石福臣, 李瑞利, 王绍强. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1425—1431. Shi F C, Li R L, Wang S Q. Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang plain (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1425—1431
- [41] 蔡体久, 辛国辉, 张阳武, 等. 小兴安岭泥炭藓湿地土壤有机碳分布特征. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 109—113. Cai T J, Xin G H, Zhang Y W, et al. Characteristic of soil organic

- carbon of the *Sphagnum* spp. Wetland in Xiao Hing an Mountains (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(5): 109—113
- [42] 张文菊, 吴金水, 童成立, 等. 三江平原湿地沉积有机碳密度和碳储量变异分析. 自然资源学报, 2005, 20(4): 537—544. Zhang W J, Wu J S, Tong C L, et al. Spatial variability of the density of organic carbon and carbon storage in sediment profiles of wet lands in Sanjiang plain northeast China (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 537—544
- [43] 满秀玲, 刘斌, 李奕. 小兴安岭草本泥炭沼泽土壤有机碳、氮和磷分布特征. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 48—53. Man X L, Liu B, Li Y. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soils of herbaceous peat swamps in the Xiaoxing' an Mountains (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 48—53
- [44] Liu Z G, Wang M, Ma X H. Estimation of storage and density of organic carbon in peatlands of China. Chinese Geographical Science, 2012, 22(6): 637—646
- [45] 刘子刚, 张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(6): 788—791. Liu Z G, Zhang K M. Wetland soils carbon stock in the Sanjiang plain (In Chinese). Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(6): 788—791
- [46] Zheng Y M, Niu Z G, Gong P, et al. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(6): 662—670
- [47] Yu Z C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: A review. Biogeosciences, 2012, 9(10): 4071—4085
- [48] 崔娟娟, 马琼芳, 宋洪涛, 等. 湿地生态系统碳储量估算方法综述. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2673—2680. Cui L J, Ma Q F, Song H T, et al. Estimation methods of wetland ecosystem carbon storage: A review (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2673—2680
- [49] Bernal B, Mitsch W J. A comparison of soil carbon pools and profiles in wetlands in Costa Rica and Ohio. Ecological Engineering, 2008, 34(4): 311—323
- [50] Gorham E, Lehman C, Dyke A, et al. Long-term carbon sequestration in North American peatlands. Quaternary Science Reviews, 2012, 58: 77—82
- [51] Oechel W C. Nutrient and water flux in a small arctic watershed: An overview. Holarctic Ecology, 1989, 12(3): 229—237
- [52] Lappalainen E. General review on world peatlands and peat resources. Jyska, Finland: Global peat resources, International Peat Society, 1996: 53—56
- [53] Milne R, Brown T A. Carbon in the vegetation and soils of Great Britain. Journal of Environmental Management, 1997, 49(4): 413—433
- [54] Grigal D F, Buttlerman C G, Kernik L. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota. Canadian Journal of Botany, 1985, 63(12): 2416—2424
- [55] Campbell C, Vitt D H, Halsey L A, et al. Net primary production and standing biomass in northern continental wetland. Edmonton, Alberta: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Information report, NOR-X-369, 2000
- [56] Laiho R, Laine J. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland. Forest Ecology and Management, 1997, 93(1/2): 161—169
- [57] Dyck B S, Shay J M. Biomass and carbon pool of two bogs in the Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario. Canadian Journal of Botany, 1999, 77(2): 291—304
- [58] Whittaker R H, Marks P L. Methods of assessing terrestrial productivity// Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975: 55—118
- [59] Moore T R, Bubier J L, Frolking S E, et al. Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog. Journal of Ecology, 2002, 90(1): 25—36
- [60] Clymo R S. *Sphagnum*, the peatland carbon economy, and climate change// Bates J W, Ashton N W, Duckett J G. Bryology for the twenty-first century. Leeds, UK: Maney Publishing and the British Bryological Society, 1998: 361—368
- [61] Laiho R, Paavo O, Ilomets M, et al. Moss production in a boreal, forestry-drained peatland. Boreal Environment Research, 2011, 16(5): 441—449
- [62] Giese L A B, Aust W M, Kolka R K, et al. Biomass and carbon pools of disturbed riparian forests. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/3): 493—508
- [63] Greenway M. Litter accession and accumulation in a *Melaleuca quinquenervia* (Cav.) S. T. Blake wetland in south-eastern Queensland. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1994, 45(8): 1509—1519
- [64] van T K, Rayachhetry M B, Center T D, et al. Litter dynamics and phenology of *Melaleuca quinquenervia* in south Florida. Journal of Aquatic Plant Management, 2002, 40(1): 22—27
- [65] Thormann M N, Szumigalski A R, Bayley S E. Aboveground peat and carbon accumulation potentials along a bog-fen-marsh wetland gradient in southern boreal Alberta, Canada. Wetlands, 1999, 19(2): 305—317
- [66] Vasander H. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland. Annales Botanici Fennici, 1982, 19(2): 103—125
- [67] Glaser P H, Janssens J A, Siegel D I. The response of vegetation to chemical and hydrologic gradients in the lost river peatland, northern Minnesota. Journal of Ecology, 1990, 78(4): 1021—1048
- [68] Isaev A, Korovin G, Zamolodchikov D, et al. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, 82(1/2): 247—256
- [69] Tomlinson R W, Davidson L. Estimates of carbon stores in four Northern Irish lowland raised bogs. Suo, 2000, 51(3): 169—179
- [70] Minkinen K, Laine J. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(9): 1267—1275
- [71] Klarquist M. Peat growth and carbon accumulation rates during the Holocene in boreal mires. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria, 2001, 203: 37

- [72] Page S E, Wüt R A J, Weiss D, et al. A record of Late Pleistocene and Holocene carbon accumulation and climate change from an equatorial peat bog (Kalimantan, Indonesia): Implications for past, present and future carbon dynamics. *Journal of Quaternary Science*, 2004, 19 (7): 625—635
- [73] Sajarwan A, Notohadiprawiro T, Radjagukguk B, et al. Diversity of tropical peat characteristics in intact peatland forest, under the influence of forest type, peat thickness, and position of peat deposit// Rieley J O, Page S E, Setiadi B. *Peatlands for People: Natural resource functions and sustainable management. proceedings of the international symposium on tropical peatland, Jakarta, Indonesia, 2002*; 119—124
- [74] Parry L E, Charman D J. Modelling soil organic carbon distribution in blanket peatlands at a landscape scale. *Geoderma*, 2013, 211/212; 75—84
- [75] Riley J L. Peat and peatland resources of northeastern Ontario. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper, 1994, 153: 1—155
- [76] Riley J L. Wetlands of the Hudson Bay Lowland; An Ontario review. Toronto, Ontario: Nature Conservancy of Canada and the Ontario Ministry of Natural Resources, 2011
- [77] Yu Z C. Holocene carbon accumulation of fen peatlands in boreal western Canada: Complex ecosystem response to climate variation and disturbance. *Ecosystems*, 2006, 9 (8): 1278—1288
- [78] Hooijer A, Page S, Canadell J G, et al. Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in southeast Asia. *Biogeochemistry*, 2010, 7 (5): 1505—1514
- [79] Zoltai S C, Pollett F C. Wetlands in Canada: Their classification, distribution, and use// Gore A J P, Mires; Swamp, bog, fen and moor. Netherlands; Elsevier Scientific. 1983; 245—268
- [80] Kettles I M, Tarnocai C. Development of a model for estimating the sensitivity of Canadian peatlands to climate warning. *Geographie Physique et Quaternaire*, 1999, 53 (3): 323—338
- [81] Stolbovoi V. Carbon in Russian soils. *Climatic Change*, 2002, 55 (1/2): 131—156
- [82] 尹善春. 中国泥炭资源及其开发利用. 北京:地质出版社, 1991:119—121. Yin S C. Peat resource in China and its development and utilization (In Chinese). Beijing: Publishing House of Geology, 1991: 119—121
- [83] Zhang X H, Liu H Y, Baker C, et al. Restoration approaches used for degraded peatlands in Ruoergai (zoige), Tibetan plateau, China, for sustainable land management. *Ecological Engineering*, 2012, 38 (1): 86—92
- [84] Turetsky M, Wieder K, Halsey L, et al. Current disturbance and the diminishing peatland carbon sink. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (11): 21—1—21—4
- [85] Wang X W, Song C C, Sun X X, et al. Soil carbon and nitrogen across wetland types in discontinuous permafrost zone of the Xiao Xing'an Mountains, Northeastern China. *Catena*, 2013, 101: 31—37
- [86] 牟长城, 包旭, 卢慧翠, 等. 火干扰对大兴安岭兴安落叶松瘤囊苔草湿地生态系统碳储量的短期影响. *林业科学*, 2013, 49 (2): 8—14. Mu C C, Bao X, Lu H C, et al. Short-term effects of fire disturbance on carbon storage of *Larix gmelinii-carex schmidtii* forested wetlands ecosystem in Daxing'an mountain (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49 (2): 8—14
- [87] Murphy M, Laiho R, Moore T R. Effects of water table drawdown on root production and aboveground biomass in a boreal bog. *Ecosystems*, 2009, 12 (8): 1268—1282
- [88] Minkinen K, Vasander H, Jauhiainen S, et al. Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, Central Finland. *Plant and Soil*, 1999, 207 (1): 107—120
- [89] 王丽丽, 宋长春, 葛瑞娟, 等. 三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量研究. *中国环境科学*, 2009, 29 (6): 656—660. Wang L L, Song C C, Ge R J, et al. Soil organic carbon storage under different land-use types in Sanjiang plain (In Chinese). *China Environmental Science*, 2009, 29 (6): 656—660
- [90] 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. *土壤学报*, 2005, 42 (5): 857—859. Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Effect of cultivation on organic carbon composition in a histosol in the Sanjiang plain, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (5): 857—859
- [91] Mu C C, Lu H C, Wang B, et al. Short-term effects of harvesting on carbon storage of boreal *Larix gmelinii-Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 293: 140—148
- [92] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: the physical science basis*// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007
- [93] Moore T R, Roulet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic Change*, 1998, 40 (2): 229—245

BUDGETING OF CARBON STORAGE IN PEAT WETLANDS AND ITS AFFECTING FACTORS

Zhou Wenchang Cui Lijuan^{1*}

(*Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*)

Abstract Though peatlands comprise approximately only 2% ~ 3% of the global terrestrial area and about 40% ~ 70% of all the wetlands of the world, their carbon storage reaches as high as $3.0 \times 10^{17} \sim 6.0 \times 10^{17}$ g, accounting for 14% ~ 40% of the global soil organic carbon pool ($1.5 \times 10^{18} \sim 2.344 \times 10^{18}$ g). In the past, studies on carbon storage in peatlands focused mainly on carbon pool in the soil, especially in regions high in latitude, and few comprehensive reports were available on carbon pools in vegetation and litter layers. Here, a comprehensive analysis and review of the progress of the study on budgeting carbon storages in the soil, vegetation and litter layer carbon pools, the three major components of the carbon pool of the global peatlands. Now, it is still existing big uncertainties in budgeting carbon storage of the global peatlands. Inadequacy of information and data available from the countries or regions that have largest areas of peatlands, including biomasses of the vegetation and litters, carbon mass fraction, and thickness, bulk density and area of the peat layers, is a major one in budgeting. Then anthropogenic disturbance may further contribute to the uncertainty, thus making the budgeting more difficult. It is well known that China ranks first in Asia and fourth in the world in area of wetlands. However, in budgeting organic carbon storage in peatlands/wetlands, China differs quite sharply from others in the world, because the data and information are inadequate and varying sharply. Therefore, in order to improve precision of the budgeting peat wetland carbon storage and accuracy of the prediction of mechanism of the terrestrial ecosystem responding to climate change. It is, therefore, essential to intensify the study on carbon storage in peatlands.

Key words Peatlands; Carbon storage; Soil organic carbon; Vegetation biomass; Litters

(责任编辑:汪叔生)