

DOI: 10.5846/stxb201802220375

王伯炜, 牟长城, 王彪. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Wang B W, Mu C C, Wang B. Carbon storage of a primary coniferous forested wetland ecosystem in the temperate Changbai Mountain of China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

## 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量

王伯炜, 牟长城\*, 王 彪

东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

**摘要:** 采用年轮分析及相对生长方程法与碳/氮分析仪测定法, 测定温带长白山沿湿地过渡带环境梯度依次分布的 5 种典型原始沼泽类型(草甸沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭藓沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX 和落叶松苔草沼泽-LT)生态系统碳储量(植被和土壤)、植被净初级生产力与年净固碳量, 定量评价温带森林湿地固碳能力及其长期碳汇作用, 并揭示其沿过渡带水分环境梯度的空间分异规律。结果表明: ① 5 种天然沼泽类型的植被碳储量(3.18±1.70)~(112.2±18.3) tC/hm<sup>2</sup>沿过渡带环境梯度总体上呈递增趋势, 针叶林沼泽显著高于 C 和 G 12.2—34.3 倍, G 高于 C 0.6 倍, 且 LX 和 LT 显著高于 LN 0.3—0.6 倍; ② 土壤碳储量(296.3±42.2)~(824.50±50.79) tC/hm<sup>2</sup>沿过渡带环境梯度总体上呈递减趋势, C 显著高于 G 和针叶林沼泽 30.8%—178.3% ( $P < 0.05$ ), G 显著高于针叶林沼泽 38.7%—112.8%, 且 LN 和 LT 显著高于 LX 32.8%—53.4%; ③ 生态系统碳储量(408.42±57.53)~(827.52±50.96) tC/hm<sup>2</sup>沿过渡带环境梯度总体上也呈递减趋势, C 显著高于 G 和针叶林沼泽 30.2%—102.7%, G 显著高于针叶林沼泽 21.5%—55.6%, 且 LN 和 LT 显著高于 LX 18.8%—28.0%; ④ 5 种沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量分布在(5.74±0.08)~(10.98±1.67) t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和(2.44±0.03)~(5.17±0.83) tC hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 其中, LX 和 LT 的植被净初级生产力显著高于 C、G 和 LN 61.2%—91.3%和34.5%—59.6%; 而在植被年净固碳量方面, 3 种针叶林沼泽类型均显著高于 C 和 G 28.7%—111.9%和 19.4%—96.6%。故长白山 5 种天然沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量沿湿地过渡带环境梯度总体上呈现出阶梯式递增趋势, 且仅有 LX 和 LT 达到了中国陆地植被及全球陆地植被平均固碳水平。因此, 温带长白山草甸沼泽和灌丛沼泽长期碳汇作用强于森林沼泽, 湿地碳汇管理实践中应重视草甸沼泽和灌丛沼泽的保护与恢复。

**关键词:** 温带长白山; 原始针叶林沼泽湿地; 生态系统碳储量; 净初级生产力; 年净固碳量

## Carbon storage of a primary coniferous forested wetland ecosystem in the temperate Changbai Mountain of China

WANG Bowei, MU Changcheng\*, WANG Biao

Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** An annual ring analysis, relative growth equation method, and carbon/nitrogen analysis assay were used to determine the ecosystem carbon stocks (vegetation and soil) of five typical types of primitive swamps (Swamp C, Shrub Swamp-G, *Larix olgensis-Sphagnum magellanicum* swamp-LN, *Larix olgensis-moss* swamp-LX, and *Larix olgensis-Carex schmidtii* swamp-LT) in the transitional zone of the wetland in the temperate zone of Changbai Mountain. The results showed that ① The vegetation carbon stocks of the five natural swamp types were (3.18±1.70)~(112.2±18.3) tC/hm<sup>2</sup>, which increased gradually along the transitional zone. The conifer forest swamps had significantly higher values than did C and G by 12.2 and 34.3 times, respectively, G was higher than C by 0.6 times, and LX and LT were significantly higher than LN by 0.3 and 0.6 times; ② The soil carbon stocks of (296.3±42.2)~(824.50±50.79) tC/hm<sup>2</sup> declined along the environmental gradient of the transitional zone, C was significantly higher than that of G and the coniferous forest swamps by

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370461); 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC050021-02)

收稿日期: 2018-02-22; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: muccjs@163.com

30.8%—178.3%。Coniferous forest swamps were lower by 38.7%—112.8%, and LN and LT were significantly higher than LX 32.8%—53.4%; ③ The ecosystem carbon stocks of  $(408.42 \pm 57.53)$ — $(827.52 \pm 50.96)$  tC/hm<sup>2</sup> also showed a decreasing trend along the transitional zone, C was significantly higher than G and coniferous forest swamps by 30.2%—102.7%, and G was significantly higher than that of coniferous forests. Marsh was higher by 21.5%—55.6%, and LN and LT were significantly higher than LX by 18.8%—28.0%; ④ The net primary productivity and annual net carbon sequestration of vegetation in the five swamp types were distributed at  $(5.74 \pm 0.08)$ — $(10.98 \pm 1.67)$  t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> and  $(2.44 \pm 0.03)$ — $(5.17 \pm 0.83)$  tC hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, of which, the net primary productivity of LX and LT was significantly higher than that of C, G, and LN by 61.2%—91.3% and 34.5%—59.6%. In terms of annual net carbon sequestration of vegetation, the coniferous forest swamp types were significantly higher than those of C and G by 28.7%—111.9% and 19.4%—96.6%. That is why the net primary productivity and annual net carbon fixation of the five natural marsh types in Changbai Mountain show a stepwise increasing trend along the environmental gradient in the transitional zone of wetlands. However, only LX and LT reached the average carbon fixation of land vegetation and global terrestrial vegetation in China. Therefore, the long-term carbon sink effect of the Changbai mountain marsh swamps and shrub swamps is stronger than that of forest swamps. We should protect and restore swamps and shrub swamps in our wetland carbon sink management practices.

**Key Words:** temperate Changbai Mountain; original coniferous forest swamp wetland; ecosystem carbon storage; net primary productivity; net carbon sequestration

湿地因具有高生产力及水淹厌氧环境能够在土壤中积累大量有机碳,起着显著碳汇功能,故湿地在全球碳循环中具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。湿地面积仅占全球陆地表面6%—8%,但其碳储量(455—700 Pg)却约占全球土壤有机碳库(1550 Pg-C)1/3<sup>[3-5]</sup>,引起不同学科的学者们对湿地在地球辐射力方面关键作用的极大关注<sup>[6-9]</sup>。

然而,目前全球湿地碳储量估算仍存在诸多不确定性,限制了学界对湿地在全球碳循环及减缓气候变化重要作用的认识。首先,湿地面积不断减少,因气候变化(变暖变干)和人为活动干扰(采掘、垦殖、排水等)影响,全球湿地总面积已减少68%<sup>[10-13]</sup>,使得湿地碳储量估算在局地、国家、区域和全球尺度上产生较大不确定性<sup>[14-15]</sup>。其次,测定方法仍存在问题,目前依据全球陆地土壤平均深度1 m标准,得到全球湿地碳储量估计值225 Pg<sup>[12]</sup>,与早期估计值(180—249 Pg)<sup>[16-17]</sup>相一致;但有学者采用平均泥炭层厚度2.3 m估计北方和亚北极泥炭地碳储量后,得到全球湿地碳储量估计值为445 Pg<sup>[18]</sup>,较早期估计值提高近1倍;最近对热带湿地面积及碳储量调查后将全球湿地碳储量估计值修正为445—700 Pg<sup>[4]</sup>,占全球陆地有机碳库估计值(1550 Pg)<sup>[5]</sup>的29.4%—45.2%。此外,其他学者则认为不同气候区的湿地碳储量变异性较大,而且还受到植被类型、景观及水文条件的强烈影响<sup>[13-14,18-21]</sup>。例如,热带红树林湿地碳储量沿潮汐水淹梯度相差1—8倍<sup>[22-24]</sup>;美国东南部亚热带泛滥平原各湿地类型土壤碳储量相差近4倍<sup>[25]</sup>。因此,目前尚有必要查清不同气候区及不同类型的湿地面积和碳储量,最终方能实现全球湿地碳储量的准确估算。

目前全球湿地碳通量还远未确定<sup>[26]</sup>,如早期全球湿地固碳速率估计值(137 TgC a<sup>-1</sup>)存在超过100%的不确定性<sup>[27]</sup>,近期通过对热带湿地面积及固碳速率研究将世界湿地固碳速率估计值修正为830 TgC a<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>,较早期估计值提高了5倍。过往有关湿地碳源/碳汇的认识多来自广泛研究的北方泥炭地<sup>[18,28]</sup>,北方及亚极地生物群区经历低温环境,部分限制了有机物分解,同时也限制生产力<sup>[29]</sup>;热带与亚热带气候区的湿地一般具有更高生产力,但同时高温也可能导致分解速率超过生产力<sup>[30-31]</sup>;而温带气候区夏季炎热短暂及冬季寒冷漫长,湿地生产力与呼吸速率将如何变化目前仍不清楚。此外,湿地固碳速率似乎也同样受到湿地类型、水文地貌特征及植物群落所影响<sup>[9,32-33]</sup>,例如,温带沿不同水文地貌梯度分布的封闭拗陷湿地的固碳速率高于河流湿地2倍多<sup>[32]</sup>;热带缓流湿地固碳速率高于封闭湿地及季节性河流湿地的2—3倍<sup>[9]</sup>;美国亚热带佛罗里达沿水分梯度分布的5种湿地类型的固碳速率相差3.5倍<sup>[33]</sup>。因此,揭示湿地固碳速率沿过渡带环境梯度总体上的空间分异规律势必有助于客观准确估算局地、区域乃至全球尺度上的湿地碳汇作用。

全球泥炭地集中分布于温带和北方区域<sup>[12]</sup>,中国东北湿地恰处该区域,也是我国森林沼泽最集中分布区(山地湿地面积达 452.3 万  $\text{hm}^2$ ,分布于长白山和大、小兴安岭林区)<sup>[34-35]</sup>,目前有关东北林区湿地碳储量研究主要集中在大、小兴安岭<sup>[36-44]</sup>,而有关长白山原始森林沼泽碳储量研究甚少。本文以温带长白山沿沼泽至森林方向原始湿地过渡带环境梯度上依次分布的 5 种典型沼泽类型(草丛沼泽、灌丛沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽)为对象,采用树木年轮分析及相对生长方程法与碳/氮分析仪测定法,测定各沼泽类型的生态系统碳储量(植被和土壤)、净初级生产力与年净固碳量,揭示温带沼泽湿地碳储量及年固碳量沿过渡带水分环境梯度的空间分异规律,并定量评价各沼泽湿地类型的长期碳汇,以便为准确估算湿地碳汇作用及管理湿地碳汇提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于长白山林区吉林省白河林业局东方红林场(41°42′—42°45′N,127°33′—128°16′E)。长白山地处温带,属于受季风影响的温带大陆性气候,平均海拔 800 多米,坡度一般 5°—10°,年平均气温达到 2.9℃,每年最高温度的季节在 7 月份,平均气温 27.9℃,年平均温度最低在 1 月,平均温度达到 -32.0℃,无霜期 110 d;年平均降水主要集中在 6 月到 8 月,年降水量平均在 700 mm。地带性土壤属于暗棕壤。地带性植被属于温带针阔混交林,但目前多退化为次生林与人工林。在谷地分布有各类型沼泽湿地,随着坡度变化,微地形逐渐升高,积水量逐渐减少,地下水位逐渐降低,积水周期逐渐变短,泥炭层越来越薄,植物长期适应过渡带水分环境梯度,依次形成草丛沼泽、灌丛沼泽、落叶松泥炭沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽。试验地乔木树种为长白落叶松(*Larix olgensis*),灌木层主要有柴桦(*Betula fruticosa*)、细叶杜香(*Ledum palustre*),草本层主要彭囊苔草(*Carex schmidtii*)、白毛羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)和小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)等。由于本区针叶林沼泽的林木生长相对缓慢及干形较差,生产上从未对其进行过采伐作业,目前仍保持原始状态,这为研究温带原始森林湿地碳储量及固碳能力提供了理想场所。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置

本研究于 2016 年 7 月上旬进行样地设置,首先在研究区选取典型的原始针叶林沼泽湿地过渡带(未受到人为采伐干扰),然后沿着沼泽到森林方向过渡带水分环境梯度,依次设置草丛沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX、落叶松苔草沼泽-LT 五种沼泽湿地类型的标准地(地下水位依次距地表 0—6、5—15、15—20、20—26、25—35 cm)。标准地面积为 20 m×30 m,每一沼泽类型均为 3 次重复,共计 15 块固定标准地。于 2016 年 8 月上旬即(生长季旺盛期)对标准地进行每木调查。同时采集植被,土壤以及凋落物样品,评价其长期碳汇作用。各森林沼泽类型的林分状况见表 1。

表 1 温带长白山 3 种针叶林沼泽湿地类型林分特征

Table 1 Characteristics of three kinds of coniferous forested wetland stands in temperate Changbai mountain of China

湿地类型 Wetland type	树种 Tree Species	林龄 Stand age/a	密度 Stand density/ (株/ $\text{hm}^2$ )	胸高断面面积 Basal area at breast height/( $\text{m}^2/\text{hm}^2$ )	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	胸径范围 Range of diameter at breast height/cm
LN	落叶松 <i>Larix olgensis</i>	150	394	8.1	16.2	4.4—41.0
LX	落叶松 <i>Larix olgensis</i>	160	611	13.7	16.9	4.0—38.5
LT	落叶松 <i>Larix olgensis</i>	160	633	11.3	15.1	4.1—39.5

LN:落叶松-泥炭藓沼泽 *Larix olgensis/gagamem*; LX:落叶松-藓类沼泽 *Larix olgensis racomitrium/moss*; LT:落叶松-苔草沼泽 *Larix olgensis/carex*

#### 1.2.2 植被碳储量测定

乔木层生物量测定:采用相对生长方程法,首先对各沼泽类型标准地中胸径 $\geq 2$  cm 的林木进行每木检

尺,然后利用各样地胸径生长数据结合现有长白山区森林沼泽群落建群种落叶松相对生长方程(表2)<sup>[45]</sup>,估算各样地乔木层生物量。

灌木层和草本层生物量测定:采用收获法,在每个标准地中随机设置5个2 m×2 m样方测定灌木层生物量及10个1 m×1 m样方测定草本层生物量,具体测定时分别地上枝叶和地下根系进行生物量鲜重测定,并对枝叶和根系进行取样烘干(70℃下烘干至恒重),进而得到灌木层和草本层的生物量干重。

凋落物生物量测定:于2016年秋季落叶后,在各样地中分别设置10个20 cm×20 cm样方,收集其中全部凋落物装入封口袋,带回实验室,在70℃下烘干至恒重,得到凋落物生物量。

植被碳储量测定:利用碳/氮分析仪 MultiN/C3100 和 HT1300SolidsModule (AnalytikJenaAG, Germany) 通过1300℃干烧法测定乔木层、灌木层、草本层、凋落物层有机碳含量,然后用各组分的生物量乘以碳含量,可得到乔木层、灌木层、草本层与凋落物层的碳储量,将四者加和即可获得植被的碳储量。

表2 温带长白山针叶林沼泽群落建群种落叶松相对生长方程

Table 2 Relative growth equation for the dominant species *Larix olgensis* of coniferous forested wetland community in temperate Changbai Mountain of China ( $Y=b_0+b_1D+b_2D^2+b_3D^3$ )

树种 Species	生物量 Biomass/kg	回归系数				相关系数 Rsq	显著性 Sigf	样本 S.n	胸径范围 Domain/cm	方程 Model type
		b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>					
长白落叶松	全树	3.1490	-2.6870	0.6410	-0.0014	0.999	0.000	6	4—24	立方
<i>Larix olgensis</i>	树干	2.6390	-1.7430	0.3470	-0.0002	0.999	0.000	6	4—24	立方
	树根	1.0800	-1.2970	0.3170	-0.0054	0.999	0.000	6	4—24	立方
	树枝	-2.4390	0.7490	-0.0560	0.0034	0.999	0.000	6	4—24	立方
	树叶	-0.0930	0.1130	-0.0220	0.0024	0.999	0.000	6	4—24	立方

### 1.2.3 土壤碳库的调查方法

在每个标准样地中心,以“品”字形设置3个土壤剖面,共计调查土壤剖面45个。由于各沼泽类型土壤深度不同,取样深度均至母质层。确定土壤剖面后,用土壤环刀(100 cm<sup>3</sup>) 在每间隔10 cm 作为一取样层,土样用铝盒封装,带回实验室在烘箱105℃下烘干24 h后,测定其土壤容重;同时在同一土层深度取约500 g土样装入样品袋,带回实验室风干后,取出其中大于2 mm的根系或岩石后,在70℃下烘干24 h,研磨粉碎后过2 mm土壤筛,利用MultiN/C3100分析仪和HT1300SolidModule (AnalytikJenaAG, Germany) 测定土壤有机碳含量,并利用以下公式计算土壤有机碳储量。

某一土层*i*的有机碳密度(SOC<sub>*i*</sub>, kg/m<sup>2</sup>)的计算公式为:

$$SOC_i = C_{ix} D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad [36]$$

式中, C<sub>*i*</sub>为土壤有机碳含量(g/kg), D<sub>*i*</sub>为容重(g/cm<sup>3</sup>), E<sub>*i*</sub>为土层厚度(cm), G<sub>*i*</sub>为直径大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土壤剖面由k层组成,那么该剖面的碳密度(SOC<sub>*i*</sub>, kg/m<sup>2</sup>)<sup>[36]</sup>为:

$$SOC_i = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100$$

### 1.2.4 植被净初级生产力和年净固碳量测定

植被净初级生产力测定:乔木层净初级生产力测定,首先将各沼泽类型标准地林木胸径按照2 cm划分径级,在每个径级中选取3—5株标准木,利用生长锥在胸高(1.3 m)处钻取树木年轮样芯,再利用树木年轮分析仪测定各径级林木近5年胸径生长量,结合相对生长方程计算近5年平均生物量增量而得到;灌木层净初级生产力为其生物量除以平均年龄(5 a)<sup>[35,37]</sup>;草本层净初级生产力为其地上部分与地下部分当年生物量加和(地上部分全部视为当年生,地下部分选取靠近茎干、颜色较浅部分作为当年生新根)。

植被年净固碳量测定:乔木层、灌木层、草本层的年净固碳量通过各自的年净初级生产力与其相应的碳含量的乘积获得,将三者加和即可达到各沼泽类型的植被年净固碳量。



### 1.2.5 数据处理

文中数据均采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)分析不同数据组间的差异性,显著性水平设置为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 长白山 5 种天然沼泽湿地植被碳储量

由表 3 可以得到,长白山 5 种典型天然沼泽类型的植被碳储量存在明显差异性。沿沼泽至森林方向过渡带水分环境梯度依次分布的草丛沼泽-C、灌丛沼泽-G、落叶松泥炭沼泽-LN、落叶松藓类沼泽-LX、落叶松苔草沼泽-LT 的植被碳储量分布在  $(3.18 \pm 1.70) - (112.2 \pm 18.3) \text{ tC hm}^{-2}$ ,其中,3 种针叶林沼泽的植被碳储量显著高于草丛沼泽与灌丛沼泽 20.5—34.3 倍和 12.2—20.6 倍( $P < 0.05$ ),灌丛沼泽又高于草丛沼泽 0.6 倍( $P > 0.05$ ),且 LX 和 LT 显著高于 LN 0.3—0.6 倍( $P < 0.05$ )。因此,温带长白山 5 种天然沼泽类型的植被碳储量沿过渡带环境梯度总体上呈现出递增趋势(即森林沼泽>灌丛沼泽>草丛沼泽)。

此外,5 种天然沼泽类型植被碳储量的空间分布格局也不同。在垂直分布上,草丛沼泽以草本层占优势地位(76.7%),凋落物层次之(23.3%);灌丛沼泽以灌木层和草本层占优势(42.8%和 43.7%),凋落物层比重最小(13.5%);3 种针叶林沼泽均以乔木层占绝对优势地位(93.3%—94.5%),而凋落物层(3.1%—4.7%)、草本层(1.7%—1.9%)、灌木层(0.3%—0.5%)所占比重均较小。在水平分布上,乔木层碳储量以 LX 和 LT 较高,前者显著高于 LN 62.4%( $P < 0.05$ ),后者高于 LN 34.8%( $P > 0.05$ );灌木层碳储量以灌丛沼泽最高,且显著高于 3 种针叶林沼泽灌木层 4.4—8.3 倍( $P < 0.05$ );草本层碳储量以草丛沼泽和灌丛沼泽最高,两者显著高于 3 种针叶林沼泽草本层 31.2%—90.6%和 22.0%—77.3%( $P < 0.05$ );但凋落物层碳储量却是森林沼泽显著高于草丛沼泽和灌丛沼泽 2.6—6.2 倍和 2.8—6.6 倍( $P < 0.05$ )。因此,温带长白山天然沼泽湿地过渡带植被碳储量存在着明显的空间分异规律性。

表 3 温带长白山 5 种典型天然沼泽湿地类型的植被碳储量及其分配

指标 Item	层次 Layer	处理 Treatment				
		C	G	LN	LX	LT
碳储量/ $(\text{t}/\text{hm}^2)$ Carbon storage	乔木层			64.40(9.71) A	104.63(17.20) B	86.83(9.93) AB
	灌木层		2.22(0.01) B	0.24(0.07) A	0.34(0.18) A	0.41(0.04) A
	草本层	2.44(0.04) C	2.27(0.14) C	1.28(0.10) A	1.86(0.17) B	1.75(0.38) B
	凋落物层	0.74(0.01) A	0.70(0.01) A	2.64(0.96) B	5.33(1.37) C	2.95(1.18) B
	植被	3.18(1.70) A	5.19(1.37) A	68.56(9.01) B	112.16(18.27) D	91.94(11.40) C
分配比 Allocation/%	乔木层			93.76(2.08)	93.27(0.47)	94.52(0.93)
	灌木层		42.77(0.05)	0.35(0.10)	0.32(0.22)	0.46(0.10)
	草本层	76.73(0.24)	43.74(0.13)	1.89(0.27)	1.70(0.41)	1.89(0.17)
	凋落物层	23.27(0.06)	13.49(0.09)	4.00(1.97)	4.71(0.44)	3.14(0.85)

表中给出数据是平均值,括号内为标准差;不同大写字母表示不同湿地类型植被碳储量差异显著( $P < 0.05$ )。C: 草丛沼泽 marsh wetland, G: 灌丛沼泽 shrub wetland

### 2.2 长白山 5 种天然沼泽湿地土壤碳储量

由表 4 可以得到,长白山 5 种天然沼泽类型的土壤碳储量也存在差异性。沿湿地过渡带环境梯度依次分布的 5 种沼泽类型的土壤碳储量分布在  $(296.3 \pm 42.2) - (824.50 \pm 50.79) \text{ tC hm}^{-2}$  之间,其中,草丛沼泽显著高于灌丛沼泽和 3 种针叶林沼泽 30.8%和 81.4%—178.3%( $P < 0.05$ );灌丛沼泽显著高于 3 种针叶林沼泽 38.7%—112.8%( $P < 0.05$ );而 3 种针叶林沼泽类型中 LN 和 LT 又显著高于 LX 32.8%—53.4%( $P < 0.05$ )。因此,温带长白山 5 种天然沼泽类型的土壤碳储量沿过渡带环境梯度总体上呈现出递减趋势(即草丛沼泽>灌丛沼泽>森林沼泽)。

5 种天然沼泽类型土壤碳储量的空间分布格局也不同。在垂直分布上,各沼泽类型的土壤深度不同,草从沼泽土壤层最深可分 10 层(按 10 cm 划分)、灌丛沼泽分 8 层、LN 分 6 层,而 LX 与 LT 最浅分 5 层。且同一沼泽类型各土壤层间的碳密度也不同,草从沼泽和灌丛沼泽表层(0—10 cm)土壤碳密度较低,而 10—100 cm 或 10—80 cm 土壤层碳密度高于两者表层 22.5%—57.3%和 15.2%—39.5%);LN 可分 3 层,即 0—20 cm 高碳密度层(高于其他层 12.0%—59.5%)、20—40 cm 中碳密度层(高于后者 19.2%—41.8%)和 40—60 cm 低碳密度层;LX 也可分 3 层,0—10 cm 高碳密度层(高于其他层 41.2%—356.9%)、10—40 cm 中碳密度层(高于后者 171.4%—223.6%)和 40—50 cm 低碳密度层;LT 可分 2 层,0—40 cm 高碳密度层(高于后者 34.7%—64.4%)和 40—50 cm 低碳密度层。可见,草从沼泽和灌丛沼泽土壤碳库基本属于恒定型(上层略低除外),而针叶林沼泽碳库却呈现出随土壤深度增加而递减的垂直分异规律性。

在水平分布上,3 种针叶林沼泽类型的土壤碳密度在表层(0—10 cm)显著高于草从沼泽和灌丛沼泽 43.9%—52.9% ( $P < 0.05$ );在 10—30 cm 土壤层与草从沼泽和灌丛沼泽相近(除 LX 显著低于 C 和 G 16.9%—34.4%外);在 30—60 cm 土壤层三者的碳密度均较大幅度低于草从沼泽和灌丛沼泽(其中,30—40 cm 土壤层显著降低 13.2%—35.2% ( $P < 0.05$ ))、40—50 cm 土壤层降低 31.4%—76.0%(仅 LX 降低显著)及 50—60 cm 土壤层(仅 LN 存在该层)降低 21.2%—28.4% ( $P > 0.05$ );且只 C 和 G 具有 60—80 cm 土壤层及只 C 具有 80—100 cm 土壤层。可见,5 种沼泽类型的土壤碳库同样存在着明显的水平空间分异规律性。

表 4 温带长白山 5 种典型天然沼泽湿地类型土壤有机碳储量及其分布特征

Table 4 Soil organic carbon storage and its spatial distribution of five kinds of natural wetlands in temperate Changbai Mountain of China

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment				
	C	G	LN	LX	LT
0—10	63.30(5.11) Aa	61.87(3.97) Aa	92.24(9.62) Bc	94.62(33.62) Bc	91.12(9.21) Bb
10—20	77.55(8.39) Bab	81.76(12.66) Bb	91.86(8.83) Bc	56.21(15.33) Aab	86.21(9.72) Bb
20—30	80.61(4.29) ABab	85.65(5.26) Bb	82.01(8.81) ABbc	67.01(29.87) Ab	86.07(8.61) Bb
30—40	89.07(16.42) Bb	86.00(7.95) Bb	70.95(9.37) Aab	57.72(26.45) Ab	74.62(12.24) Ab
40—50	84.30(4.55) Bab	86.29(1.61) Bb	57.83(9.35) ABa	20.71(7.51) Aa	55.41(14.96) ABa
50—60	83.08(15.00) Aab	75.53(12.29) Aab	59.52(17.73) Aa		
60—70	80.13(8.15) Aab	82.05(17.30) Ab			
70—80	88.18(3.82) Ab	71.28(10.70) Aab			
80—90	99.56(20.69) b				
90—100	78.72(14.66) ab				
合计 Total	824.50(50.79) D	630.43(24.08) C	454.41(23.21) B	296.27(42.23) A	393.43(28.86) B

表中给出数据是平均值,括号内为标准差;不同大写字母表示不同湿地类型土壤碳储量差异显著 ( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示同一类型不同土壤深度有机碳储量差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 2.3 长白山 5 种天然沼泽湿地生态系统碳储量

由表 5 可以得到,长白山 5 种天然沼泽类型的生态系统碳储量存在显著差异性。沿湿地过渡带环境梯度依次分布 5 种沼泽类型的生态系统碳储量分布在  $(408.42 \pm 57.53) - (827.68 \pm 50.96)$  tC  $\text{hm}^{-2}$  之间,其中,草从沼泽显著高于灌丛沼泽和 3 种针叶林沼泽 30.2%和 58.3%—102.7% ( $P < 0.05$ );灌丛沼泽显著高于 3 种针叶林沼泽 21.5%—55.6% ( $P < 0.05$ );而 3 种针叶林沼泽类型中 LN 和 LT 显著高于 LX 18.8%—28.0% ( $P < 0.05$ )。因此,温带长白山 5 种天然沼泽类型的生态系统碳储量沿过渡带环境梯度总体上也呈递减趋势(即草从沼泽 > 灌丛沼泽 > 森林沼泽)。

此外,各沼泽类型生态系统碳储量的组成结构也有所不同。处于湿地过渡带下部生境地段的草从沼泽与灌丛沼泽的生态系统碳储量以土壤碳储量占绝对优势地位(99.2%—99.6%),植被碳储量仅占极小比重(0.4%—0.8%);而处于湿地过渡带中、上部生境地段的 3 种针叶林沼泽的生态系统碳储量虽仍以土壤碳储量占优势地位(72.5%—86.9%),但植被碳储量占比却有较大幅度提升(13.1%—27.5%)。由此可见,草从沼泽

与灌丛沼泽主要以形成泥炭方式来固碳,而森林沼泽则是以形成泥炭与积累植被生物量两种方式来固碳。

表 5 长白山 5 种天然沼泽湿地类型生态系统有机碳储量及其分配

Table 5 Ecosystem carbon storage and allocation proportion of five kinds of natural wetlands in temperate Changbai mounition of China

指标 Item	层次 Layer	处理 Treatment				
		C	G	LN	LX	LT
碳储量/(t/hm <sup>2</sup> ) Carbon storage	植被	3.18(0.17) A	5.19(1.37) A	68.56(9.01) B	112.16(18.32) D	91.94(11.43) C
	土壤	824.50(50.79) D	630.43(24.08) C	454.41(23.21) B	296.27(42.23) A	393.43(28.86) B
	生态系统	827.68(50.96) D	635.62(25.24) C	522.98(27.71) B	408.42(57.53) A	485.37(38.90) B
分配比 Allocation/%	植被	0.38(0.30)	0.82(1.37)	13.11(1.07)	27.46(1.93)	13.10(1.41)
	土壤	99.62(1.19)	99.18(0.97)	86.89(1.07)	72.54(1.93)	86.90(1.41)

不同大写字母表示不同湿地类型生态系统有机碳储量差异显著( $P<0.05$ )

#### 2.4 长白山天然沼泽湿地植被净初级生产力与年净固碳量

由表 6 可以得到,长白山 5 种天然沼泽类型植被净初级生产力与年净固碳量有所不同。5 种沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量分布在(5.74±0.08)—(10.98±1.67) t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和(2.44±0.03)—(5.17±0.83) tC hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,其中, LX 和 LT 的植被净初级生产力显著高于草丛沼泽、灌丛沼泽和 LN 61.2%—91.3%和 34.5%—59.6% ( $P<0.05$ );而在植被年净固碳量方面,3 种针叶林沼泽类型均显著高于草丛沼泽和灌丛沼泽 28.7%—111.9%和 19.4%—96.6% ( $P<0.05$ )。因此,长白山 5 种天然沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量沿湿地过渡带环境梯度总体上呈现出阶梯式递增趋势。

此外,5 种沼泽类型植被净初级生产力与年净固碳量的组成结构不同。3 种针叶林沼泽类型的乔木层均占其植被净初级生产力与年净固碳量的绝对优势地位(94.6%—96.1%),草本层(3.5%—4.7%)与灌木层(0.3%—0.9%)仅占极次要地位;灌丛沼泽的草本层占其植被净初级生产力与年净固碳量的优势地位(86.1%—86.3%),灌木层(13.9%和 13.7%)却仅占其次要地位;而草丛沼泽的植被固碳能力仅取决于单一的草本层。同时,各植被层的固碳能力沿过渡带空间分布格局也不同。分布在过渡带中上部的 LX 和 LT 乔木层净初级生产力与年净固碳量显著高于过渡带中下部的 LN 34.9%—62.4%和 37.0%—65.7% ( $P<0.05$ );灌丛沼泽的灌木层净初级生产力与年净固碳量显著高于过渡带中上部的 3 种针叶林沼泽灌木层 10.1—16.8 倍和 17.0 倍( $P<0.05$ );草丛沼泽和灌丛沼泽的草本层净初级生产力与年净固碳量显著高于过渡带中上部的 3 种针叶林沼泽的草本层 11.2—16.9 倍和 11.6—17.8 倍( $P<0.05$ )。因此,这 5 种沼泽类型的植被固碳能力在湿地过渡带上也表现出明显的空间分异规律性。

表 6 温带长白山 5 种天然沼泽湿地植被净生产力和年净固碳量

Table 6 Net primary productivity and annual net carbon sequestration in five natural marsh wetlands in Changbai Mountains

指标 Item	层次 Layer	处理 Treatment				
		C	G	LN	LX	LT
净初级生产力 NPP/(t hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	乔木层			6.44(0.97) A	10.46(1.72) B	8.69(2.19) AB
	灌木层		0.89(0.06) B	0.05(0.02) A	0.07(0.04) A	0.08(0.01) A
	草本层	5.74(0.08) B	5.50(0.31) B	0.32(0.02) A	0.45(0.04) A	0.39(0.07) A
年净固碳量 NCS/(tC hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	植被	5.74(0.08) A	6.39(0.47) A	6.81(0.99) A	10.98(1.67) B	9.16(1.05) B
	乔木层			3.00(0.48) A	4.97(0.84) B	4.11(0.47) AB
	灌木层		0.36(0.04) B	0.02(0.01) A	0.02(0.01) A	0.02(0.01) A
	草本层	2.44(0.03) B	2.27(0.12) B	0.12(0.01) A	0.18(0.02) A	0.18(0.04) A
	植被	2.44(0.03) A	2.63(0.10) A	3.14(0.49) B	5.17(0.83) B	4.31(0.51) B

大写字母不同表示不同湿地类型间植被净初级生产力或年净固碳量差异显著( $P<0.05$ )

### 3 结论与讨论

#### 3.1 天然沼泽湿地植被碳储量

温带长白山 5 种天然沼泽类型的植被碳储量(0.32—11.2 kgC m<sup>-2</sup>)沿湿地过渡带环境梯度总体上呈递增



趋势与我国寒温带大兴安岭天然沼泽植被碳储量( $0.48—8.33 \text{ kg C m}^{-2}$ )沿过渡带呈递增规律<sup>[36]</sup>一致。其原因在于从沼泽到森林方向过渡带存在着水分环境梯度(随着地势缓慢升高,地下水位逐渐降低),植物适应过渡带水分环境,依次形成了草丛沼泽、灌丛沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽等原始沼泽群落类型,由于草丛沼泽、灌丛沼泽缺少乔木层致使两者植被碳储量相对较低,而针叶林沼泽群落建群种落叶松不仅耐水湿且寿命长(150—200a),能够长期积累生物量,故针叶林沼泽碳储量相对较高。至于 LN 植被碳储量相对较低,主要是因其处于湿地过渡带中下部生境地段,严重积水限制了落叶松的生长。至于长白山针叶林沼泽植被碳储量上限值要高于寒温带大兴安岭近 1/3 (34.5%),这可能与两地气候条件存在差距(前者较大兴安岭温暖湿润)及林分密度与林龄不同有关。

长白山 5 种原始沼泽类型的植被碳储量与北方森林植被碳储量估计值( $4.0—6.4 \text{ kg C m}^{-2}$ )<sup>[45]</sup>相比,草丛沼泽、灌丛沼泽低于其下限值(87.0—92.0%),而 3 种针叶林沼泽则高于其上限值(7.2%—75.3%)。因此,温带长白山草丛沼泽、灌丛沼泽的植被碳储量远低于北方森林,但其原始针叶林沼泽的植被碳储量却高于北方森林。

### 3.2 天然沼泽湿地土壤碳储量

温带长白山 5 种天然沼泽类型的土壤碳储量( $29.63—82.45 \text{ kg C m}^{-2}$ )沿湿地过渡带环境梯度总体上呈递减趋势与我国寒温带大兴安岭沼泽湿地及美国东南部亚热带泛滥平原湿地土壤碳储量沿过渡带呈递减规律<sup>[25,36]</sup>相一致。其原因主要在于水位是控制泥炭地碳循环的重要因子,高水位诱发厌氧环境能够降低土壤矿化速率,而低水位易形成有氧环境一般会增加土壤矿化速率<sup>[46-48]</sup>。正是由于湿地过渡带存在着水分环境梯度,在过渡带下部生境地段积水严重,形成了较厚的泥炭层(80—100 cm),随着地势逐渐提高,积水逐渐减轻,泥炭层逐渐变薄,至过渡带上部生境地段泥炭层则降至最低值( $\leq 50 \text{ cm}$ )(见表 4),结果势必导致其土壤碳储量沿湿地过渡带呈递减趋势。

进一步与我国天然林土壤碳储量  $10.9 \text{ kg C m}^{-2}$ <sup>[49]</sup>和北方森林土壤碳储量  $8.5 \text{ kg C m}^{-2}$ <sup>[45]</sup>相比较,长白山天然草丛沼泽、灌丛沼泽土壤碳储量为我国天然林的 5.8—7.6 倍及北方森林的 7.4—9.7 倍;3 种原始针叶林沼泽土壤碳储量为前者的 2.7—4.2 倍及后者的 3.5—5.3 倍。这说明温带天然沼泽湿地土壤的碳汇功能远强于森林土壤。

### 3.3 天然沼泽湿地生态系统碳储量

温带长白山天然沼泽湿地碳储量( $40.8—82.8 \text{ kg C m}^{-2}$ )沿过渡带环境梯度总体上呈递减趋势与热带红树林湿地碳储量( $47.9—106.8 \text{ kg C m}^{-2}$ )沿潮汐梯度呈现递增趋势<sup>[23]</sup>及寒温带大兴安岭沼泽湿地碳储量( $27.5—38.8 \text{ kg C m}^{-2}$ )沿过渡带呈恒定趋势<sup>[36]</sup>并不一致。其原因可能在于陆地沼泽湿地与海岸湿地发育过程不同,陆地沼泽在过渡带下部积水严重生境地段形成草丛沼泽,并积累较厚泥炭层,随着微地势逐渐升高,积水周期变短,依次演替成灌丛沼泽及森林沼泽,故形成的泥炭层逐渐变薄;而海岸红树林湿地则是由高潮间带向低潮间带逐步推进过程,面向陆地生境群落形成早,湿地碳储量大,而面向海洋生境则群落形成晚,湿地碳储量低<sup>[23]</sup>。而与寒温带沼泽不同则可能在于两者过渡带坡度不同(前者(8—10°)大于后者(4—5°)),过渡带坡度越大,下部生境地段积水越深,形成泥炭层越厚,使得整个过渡带土壤碳储量差距加大,反之坡度越小则整个过渡带土壤碳储量差距变小。加之沼泽系统碳储量沿过渡带变化趋势主要取决于土壤碳储量递减及植被碳储量递增的综合作用,过渡带坡度增大会使土壤碳储量递减趋势大于植被碳储量递增趋势,导致生态系统碳储量呈递减趋势,过渡带坡度减小会使土壤碳储量递减趋势与植被碳储量递增趋势相近,导致生态系统碳储量呈恒定趋势。

长白山这 5 种天然沼泽类型的生态系统碳储量为北方森林( $12.5—14.9 \text{ kg C m}^{-2}$ )<sup>[45]</sup>的 2.7—6.6 倍;但与北方泥炭地( $39.0—134.0 \text{ kg C m}^{-2}$ )<sup>[45]</sup>相比较,3 种针叶林沼泽仅略高于其下限值(4.7%—34.1%),而草丛沼泽与灌丛沼泽则远高于其下限值(62.9%—112.2%),但仍低于其上限值(36.3%—51.1%)。这说明温带森林沼泽碳储量接近北方泥炭地的下限,温带草丛沼泽与灌丛沼泽则相当于其平均水平。这可能与其分布在北方



泥炭地的南部边缘有关,气候温暖湿润,有利于土壤微生物分解活动,进而限制了泥炭层的积累过程。

### 3.4 天然沼泽湿地植被净初级生产力与年固碳量

温带长白山5种天然沼泽类型的植被净初级生产力( $0.57\text{--}1.11\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )和年净固碳量( $0.24\text{--}0.52\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )与我国寒温带大兴安岭沼泽植被净初级生产力( $0.68\text{--}1.08\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )与年净固碳量( $0.32\text{--}0.51\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )<sup>[36]</sup>一致,但植被固碳能力沿过渡带环境梯度总体上呈阶梯式递增趋势却与之(A > C、G、B > LT)不同。原因在于后者并未涉及到LX和LN两个原始针叶林沼泽类型。至于其植被固碳能力沿过渡带呈阶梯式递增趋势的原因,还是取决于过渡带水分环境梯度,过渡带下部生境地段的水位接近地表(0—15 cm),只适宜草丛沼泽与灌丛沼泽生存,且因生境积水限制,两者固碳能力相对较低;过渡带中下部生境地段的水位尽管有所降低(15—20 cm),也只适宜落叶松泥炭藓沼泽发育,且落叶松生长相对缓慢(往往形成老头树),导致其固碳能力较低;而在过渡带上部生境地段随着微地势升高,水位进一步降低(20—35 cm),才适合于落叶松藓类及落叶松苔草沼泽的发育,且落叶松生长随之加快,植被固碳能力得到增强,进而形成过渡带下部固碳低及上部固碳高的分布格局。

这5种天然沼泽类型的植被净初级生产力( $0.57\text{--}1.10\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )与中国东北植被净初级生产力( $0.6\text{--}1.4\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )<sup>[50-52]</sup>相一致,但C、G和LN( $0.57\text{--}0.68\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )仅接近其下限值,而LT与LX( $0.92\text{--}1.10\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )接近其上限值,且接近温带森林沼泽植被净初级生产力( $1.0\text{--}1.5\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )<sup>[53-54]</sup>的下限值;在植被固碳( $0.24\text{--}0.52\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )方面,仅有LX超过中国陆地植被年均固碳量( $0.49\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )<sup>[55]</sup>6.1%,LX和LT超过全球植被年均固碳量( $0.41\text{ kg m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ )<sup>[56]</sup>4.9%—26.8%。故温带长白山2种原始针叶林沼泽(LT和LX)应属于中等固碳型及草丛沼泽、灌丛沼泽及落叶松泥炭藓沼泽则应属于低固碳型沼泽类型。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Odum W E, Odum E P, Odum H T. Nature's pulsing paradigm. *Estuaries*, 1995, 18(4): 547.
- [ 2 ] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, Lynch J C. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111.
- [ 3 ] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 2005, 88(1): 25-35.
- [ 4 ] Mitsch W J, Gosselink J G. *Wetlands*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.
- [ 5 ] Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 815-830.
- [ 6 ] Whiting G J, Chanton J P. Greenhouse carbon balance of wetlands; methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*, 2001, 53(5): 521-528.
- [ 7 ] Frolking S, Roulet N, Fuglestedt J. How northern peatlands influence the Earth's radiative budget: sustained methane emission versus sustained carbon sequestration. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G1): G01008.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [ 10 ] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351(6324): 304-306.
- [ 11 ] Larson D L. Effects of climate on numbers of northern prairie wetlands. *Climatic Change*, 1995, 30(2): 169-180.
- [ 12 ] IPCC. *Special Report: Land Use, Land—Use Change and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 13 ] Neher D A, Barbercheck M E, El-Allaf S M, Anas O. Effects of disturbance and ecosystem on decomposition. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(2): 165-179.
- [ 14 ] Bai J H, Ouyang H, Deng W, Zhu Y M, Zhang X L, Wang Q G. Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 181-192.
- [ 15 ] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol: prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, 20(4): 605-615.
- [ 16 ] 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.
- [17] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [18] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182-195.
- [19] Tolonen K, Vasander H, Damman A W H, Clymo R S. Preliminary estimate of long-term carbon accumulation and loss in 25 boreal peatlands. *Suo*, 1992, 43(4/5): 277-280.
- [20] Bockheim J G, Hinkel K M, Nelson F E. Predicting carbon storage in tundra soils of Arctic Alaska. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 948-950.
- [21] Moore T R, Turunen J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 690-696.
- [22] Wang G, Guan D S, Peart M R, Chen Y J, Peng Y S. Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 539-546.
- [23] Kauffman J B, Heider C, Cole T G, Dwire K A, Donato D C. Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 2011, 31(2): 343-352.
- [24] Kauffman J B, Bhomia R K. Ecosystem carbon stocks of mangroves across broad environmental gradients in West-Central Africa: global and regional comparisons. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0187749.
- [25] Ricker M C, Lockaby B G. Soil organic carbon stocks in a large eutrophic floodplain forest of the southeastern Atlantic Coastal Plain, USA. *Wetlands*, 2015, 35(2): 291-301.
- [26] Bridgman S D, Megonigal J P, Keller J K, Bliss N B, Trettin C. The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 2006, 26(4): 889-916.
- [27] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993, 27(6): 999-1023.
- [28] Roulet N T, Lafleur P M, Richard P J H, Moore T R, Humphreys E R, Bubier J. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 397-411.
- [29] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, Arshad M A, Schomberg H H, Hons F M. Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1103-1111.
- [30] Mitsch W J, Nahlik A, Wolski P, Bernal B, Zhang L, Ramberg L. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(5): 573-586.
- [31] Bernal B, Mitsch W J. Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities. *Global Change Biology*, 2012, 18(5): 1636-1647.
- [32] Villa J A, Mitsch W J. Carbon sequestration in different wetland plant communities in the Big Cypress Swamp region of Southwest Florida. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2015, 11(1): 17-28.
- [33] 郎惠卿. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999.
- [34] 李文华. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究 林业卷: 东北地区森林与湿地保育及林业发展战略研究. 北京: 科学出版社, 2007.
- [35] Mu C C, Lu H C, Wang B, Bao X, Cui W. 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.
- [36] 李婉姝, 牟长城, 吴云霞, 徐蕊. 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(8): 39-44.
- [37] 周文昌, 牟长城, 刘夏, 顾韩. 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.
- [38] 牟长城, 包旭, 卢慧翠, 王彪, 崔巍. 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.
- [39] 刘夏, 牟长城, 周文昌, 包旭. 采伐对小兴安岭森林沼泽土壤碳质量分数和碳密度的影响. *东北林业大学学报*, 2013, 41(1): 42-47.
- [40] 牟长城, 卢慧翠, 包旭, 王彪, 崔巍. 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响. *生态学报*, 2013, 33(17): 5286-5298.
- [41] 卢慧翠, 牟长城, 王彪, 包旭, 崔巍. 采伐对大兴安岭落叶松-苔草沼泽土壤有机碳储量的影响. *林业科学研究*, 2013, 26(4): 459-466.
- [42] 崔巍, 牟长城, 卢慧翠, 包旭, 王彪. 排水造林对大兴安岭湿地生态系统碳储量的影响. *北京林业大学学报*, 2013, 35(5): 28-36.
- [43] Blais A M, Lorrain S, Plourde Y, Varfalvy L. Organic carbon densities of soils and vegetation of tropical, temperate and boreal forests//Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, Carneau M, eds. *Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 155-185.

- [44] Mu C C, Han S J, Luo J C, Wang X P. Biomass distribution patterns of ecotones between forest and swamp in Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2000, 11(3): 198-202.
- [45] 牟长城, 王彪, 卢慧翠, 包旭, 崔巍. 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量. *生态学报*, 2013, 33(16): 4956-4965.
- [46] Silvola J, Alm J, Ahlholm U, Nykanen H, Martikainen P J. CO<sub>2</sub> fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 219-228.
- [47] Chimner R A, Cooper D J. Influence of water table levels on CO<sub>2</sub> emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 345-351.
- [48] Blodau C, Moore T R. Experimental response of peatland carbon dynamics to a water table fluctuation. *Aquatic Sciences*, 2003, 65(1): 47-62.
- [49] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [50] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. *资源科学*, 1993, (1): 15-21.
- [51] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11-19.
- [52] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 韩信兴. 1982—2009年东北多年冻土区植被净初级生产力动态及其对全球变化的响应. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1511-1519.
- [53] Campbell C, Vitt D H, Halsey L A, Campbell I D, Thormann M N, Bayley S E. Net Primary Production and Standing Biomass in Northern Continental Wetlands. Canadian: Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service, 2000: 152-161.
- [54] Trettin C C, Jurgensen M F, Gale M R. Soil carbon in northern forested wetlands: impacts of silvicultural practices//Kelly J M, McFee W W, eds. *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1995.
- [55] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [56] 李银鹏, 季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究. *地理学报*, 2001, 56(4): 379-389.