

DOI: 10.11766/trxb201910210076

彭文宏, 牟长城, 常怡慧, 郝利, 姜宁, 申忠奇. 东北寒温带永久冻土区森林沼泽湿地生态系统碳储量[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1526–1538.

PENG Wenhong, MU Changcheng, CHANG Yihui, HAO Li, JIANG Ning, SHEN Zhongqi. Carbon Storage of Forested Wetland Ecosystems in the Cold Temperate Permafrost Region, Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1526–1538.

## 东北寒温带永久冻土区森林沼泽湿地生态系统碳储量\*

彭文宏, 牟长城<sup>†</sup>, 常怡慧, 郝利, 姜宁, 申忠奇

(东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 湿地在全球碳循环中具有重要作用, 但目前湿地碳储量估算仍存在诸多不确定性。利用相对生长方程与碳/氮分析仪测定法, 同步测定寒温带大兴安岭永久冻土区沿过渡带环境梯度依次分布的 7 种典型天然沼泽类型 ( 草丛沼泽 C、灌丛沼泽 G、毛赤杨沼泽 M、白桦沼泽 B 和落叶松苔草沼泽 LT、落叶松藓类沼泽 LX、落叶松泥炭藓沼泽 LN ) 的生态系统碳储量 ( 植被和土壤 )、植被净初级生产力与年净固碳量, 定量评价各沼泽类型的生态系统碳库及植被固碳能力, 并揭示两者沿过渡带环境梯度的空间分布规律性。结果表明: ( 1 ) 其植被碳储量 ( 3.60~62.18 t·hm<sup>-2</sup> ) 沿过渡带环境梯度呈先上升后降低的偏态型分布趋势; ( 2 ) 土壤碳储量 ( 179.47~320.81 t·hm<sup>-2</sup> ) 呈森林沼泽 ( M 除外 ) 与灌丛沼泽显著高于 C ( 56.4%~78.8%,  $P<0.05$  ) 和 M ( 32.0%~50.9%,  $P<0.05$  ) 的变化规律性; ( 3 ) 生态系统碳储量 ( 183.07~347.14 t·hm<sup>-2</sup> ) 也呈现森林沼泽 ( M 除外 ) 与灌丛沼泽显著高于 C ( 64.0%~89.6%,  $P<0.05$  ) 和 M ( 28.1%~48.1%,  $P<0.05$  ) 的变化规律性, 但森林沼泽土壤碳储量占比 ( 82.1%~96.4% ) 要低于 C 和 G ( 98.0%~98.3% ); ( 4 ) 植被净初级生产力 ( 6.76~11.22 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> ) 和年净固碳量 ( 2.97~5.37 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> ) 均呈现森林沼泽 ( LN 除外 ) 显著高于 C 和 G ( 26.9%~61.4% 和 30.5%~66.0%; 38.6%~77.2% 和 41.4%~80.8%,  $P<0.05$  ) 的变化规律性。因此, 寒温带永久冻土区各类型沼泽湿地的生态系统碳储量均相对较低 ( 仅相当于北方泥炭地碳储量 ( 390~1 395 t·hm<sup>-2</sup> ) 下限值的 46.9%~89.0% ), 且沿过渡带环境梯度总体上呈递增趋势; 森林沼泽 ( LN 除外 ) 的植被固碳能力强于灌丛沼泽与草丛沼泽, 且前者略高于全球陆地植被年均净固碳量估计值 ( 4.1 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> ), 而后两者仅相当于其 3/4。

**关键词:** 大兴安岭; 沼泽湿地; 多年冻土; 生态系统碳储量; 年净固碳量

**中图分类号:** S718      **文献标志码:** A

## Carbon Storage of Forested Wetland Ecosystems in the Cold Temperate Permafrost Region, Northeast China

PENG Wenhong, MU Changcheng<sup>†</sup>, CHANG Yihui, HAO Li, JIANG Ning, SHEN Zhongqi

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

**Abstract:** [ Objective ] Wetlands play an important role in the global carbon cycle, but in estimating their carbon stocks, a number

\* 国家自然科学基金项目 ( 31370461 ) 和国家重点研发计划项目 ( 2016YFA0600803 ) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China ( No. 31370461 ) and the National Key Research and Development Program of China ( No. 2016YFA0600803 )

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author. E-mail: muccjs@163.com

作者简介: 彭文宏 ( 1992— ), 男, 内蒙古人, 硕士研究生, 主要从事湿地生态学研究。E-mail: 734305203@qq.com

收稿日期: 2019-10-21; 收到修改稿日期: 2020-01-23; 网络首发日期 ( www.cnki.net ): 2020-03-30

of uncertainties need to be settled. The aim of this paper is to quantify ecosystem carbon storage and the carbon sequestration capacity of the seven natural wetlands, and explore rules for spatial distribution of the wetlands along the environmental gradient of the permafrost transition zone. 【 Method 】 Ecosystem carbon storage (ECS=vegetation C storage and soil organic C storage), net primary productivity (NPP) and annual net carbon sequestration (ANCS) of seven kinds of typical natural wetlands (C: tussock wetland, G: shrub wetland, M: *Alnus sibirica* wetland, B: *Betula platyphylla* wetland, LT: *Larix gmelinii-Carex schmidtii* wetland, LX: *Larix gmelinii*-Moss wetland, and LN: *Larix gmelinii-Sphagnum* spp. wetland) distributed one by one in an order along the environmental gradient of the transition zone of the Daxing'anling permafrost in the cold temperate zone were measured synchronously by using relative growth equations and Multi N/C 3100, HT 1300 Solids Module (Analytik Jena AG, Germany). 【 Result 】 Results show: (1) VCS of the seven wetlands varied from 3.60 to 62.18 t·hm<sup>-2</sup>, exhibiting a skewing trend of rising first and then decreasing along the water environmental gradient of the transition from marsh to forest; (2) SOCS of the seven wetlands did from 179.47 to 320.81 t·hm<sup>-2</sup>, and the SOCSs of the forested wetlands (except Wetland M) and shrub wetlands were significantly or 56.4%-78.8% higher than that of Wetland C by ( $P<0.05$ ) and 32.0%-50.9% ( $P<0.05$ ) higher than that of Wetland M; (3) ECS of these wetlands did from 183.07 to 347.14 t·hm<sup>-2</sup>, and ECS of the forested wetlands (except Wetland M) and shrub wetlands were significantly or 64.0%-89.6% higher than that of Wetland C ( $P<0.05$ ) and 28.1%-48.1% higher than that of Wetland M ( $P<0.05$ ), yet the proportion of soil carbon stocks in the forested wetlands (82.1%-96.4%) was lower than that in Wetlands C and G (98.0%-98.3%); (4) NPP and ANCS of the seven wetlands did from 6.76 to 11.22 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> and from 2.97 to 5.37 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively, and NPP and ANCS of the forested wetlands(except Wetland LN) were significantly or 26.9%-61.4% and 30.5%-66.0% higher than their respective ones of Wetland C and 38.6%-77.2% and 41.4%-80.8% ( $P<0.05$ ) higher than their respective ones of Wetland G. 【 Conclusion 】 Therefore, the ECSs of all the types of wetlands in the cold temperate permafrost region were relatively low, reaching only up to 46.9%~89.0% of the bottom value of the peat land carbon reserve (390-1 395 t·hm<sup>-2</sup>) in North China, and on the whole displayed an increasing trend along the environmental gradient of the transition zone. Carbon sequestration capacity of the forested wetlands (except Wetland LN) was higher than that of the shrub wetlands and tussock wetlands. And the former was slightly higher than the estimated ANCS of the global terrestrial vegetation (4.1 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), the latter were equal only to 3/4 of that.

**Key words:** Cold temperate Daxing'anling; Forested wetlands; Permafrost region; Ecosystem carbon storage; Annual net carbon sequestration

分布于高纬度和高海拔区域的永久冻土占地球陆地面积的 20%以上, 储存着 1 400~1 800 Pg 碳, 占全球土壤有机碳 50%以上且相当于大气碳库的 2 倍<sup>[1-3]</sup>, 这使得冻土区在全球碳循环及气候变化中占有重要地位<sup>[4-5]</sup>。全球气候模型预测结果表明高纬度地区到 21 世纪末将会增温 7~8 °C<sup>[6]</sup>, 气候变暖将会进一步加剧永久冻土的退化, 进而导致封存于冻土中碳的释放量将会高达 100 Pg<sup>[7]</sup>。因此, 冻土退化将会如何影响依赖于冻土而存在的湿地生态系统的碳库及其碳氮循环过程是亟待解决的重要科学问题之一。

分布于永久冻土之上的北方泥炭地的面积仅占全球陆地面积的 2%~6%, 却储存着近 1/3 的全球陆地土壤有机碳 (445 Pg)<sup>[8]</sup>。然而, 由于目前在全球湿地碳储量估算方面仍存在着诸多的不确定性,

尚难以客观准确地估算全球湿地的碳储量, 这在一定程度上限制了人们对湿地在全球碳循环及其减缓气候变化等方面所发挥的重要作用的深入认识。这些不确定性首先表现在湿地面积的减少, 如自工业革命以来由于气候变化(变暖变干)和人为活动(如泥炭采掘、开垦湿地、排水造林及发展城市等)干扰影响, 全球湿地总面积已减少 68%<sup>[9-11]</sup>, 这使得湿地碳储量估算无论是在局地、国家、区域和全球尺度上, 还是在全球碳循环影响方面均存在着较大的不确定性<sup>[8, 12-13]</sup>。其次, 湿地碳储量测定方法上仍存问题, 例如, 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为 225 Pg (1 Pg=10<sup>15</sup> g), 这与早期湿地碳储量估计值 (180~249 Pg)<sup>[14-15]</sup>相一致; 但有学者认为早期利用陆地土壤平均深度 1 m 估计湿地碳储量可能会低估湿地

碳储量, 并采用平均泥炭层厚度 230 cm 估计了北方和亚北极泥炭地碳储量, 得到全球湿地碳储量估计值为 445 Pg<sup>[8]</sup>, 较早期估计值提高了近 1 倍。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>[8, 12-13, 16-17]</sup>。因此, 目前尚有必要查清不同气候区域及不同湿地类型的分布面积和碳储量, 最终才有可能实现全球湿地碳储量的准确估算。

我国东北大小兴安岭冻土区是欧亚大陆多年冻土的分布南缘<sup>[18-19]</sup>, 属于高纬度多年冻土区<sup>[20-21]</sup>, 该区域也是气候变化的敏感区, 近 50 年本区气温普遍升高 0.9~2.2 °C, 已引起冻土南缘明显向北推移, 冻土区面积较 20 世纪 70 年代的 (26~27) × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 减少了 (9~10) × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup> 或 35%~37%, 且未来 40~50 年气温如若再提高 1~1.5 °C, 冻土南缘将进一步向北推移, 冻土面积将有可能再减少 35%<sup>[22]</sup>。同时, 我国东北地区分布于各类型冻土之上沼泽湿地面积高达 10.17 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>, 其中, 大、小兴安岭山区湿地面积为 3.32 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>, 约占东北湿地面积的 1/3 (32.6%), 且沼泽类型多, 其中以兴安落叶松森林沼泽为主体<sup>[23-24]</sup>。多年冻土的退化势必会对该区沼泽湿地生态系统碳库及其碳循环产生重大影响, 但目前有关东北林区湿地碳循环研究多集中在沼泽湿地温室气体排放<sup>[25-26]</sup>、湿地植物的生态特征和群落结构<sup>[27-29]</sup>、湿地土壤碳氮含量及酶活性等方面<sup>[30-31]</sup>, 仅有的少数研究表明大兴安岭岭南非连续冻土区沼泽湿地生态系统碳储量沿过渡带环境梯度呈恒定型分布<sup>[32]</sup>, 而长白山季节性冻土区呈递减趋势<sup>[33]</sup>,

在松嫩平原西部沼泽湿地土壤碳储量由南到北呈增加趋势<sup>[34]</sup>, 但是在永久冻土区的沼泽湿地碳储量存在何种空间分异规律目前仍不清楚。

本研究以我国寒温带大兴安岭北部永久冻土区沿沼泽至森林方向湿地过渡带环境梯度上依次分布的 7 种典型天然沼泽湿地 (草丛沼泽、灌丛沼泽、毛赤杨沼泽、白桦沼泽和落叶松苔草沼泽、落叶松藓类沼泽、落叶松泥炭藓沼泽) 为对象, 采用碳/氮分析仪测定法与相对生长方程, 研究天然湿地生态系统碳储量 (植被和土壤)、净初级生产力、年固碳量及其分布格局, 揭示其空间变异规律性, 并定量评价各沼泽湿地类型的生态系统碳储量与固碳能力, 为深入了解寒温带永久冻土区沼泽湿地长期碳汇作用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭地区北部的漠河县北极村, 处于北纬 53°17'—53°30'、东经 122°06'—122°27' (图 1), 属于寒温带大陆性季风气候。年均气温零下 3 °C, 冬季的极端最低温度可降至零下 50 °C 以下, 年日照时数 2 377~2 625 h, 无霜期在 90~110 d, 年均降水量约 400 mm。受大陆及海洋季风交替影响, 夏季湿热多雨, 冬季寒冷漫长, 小气候变化多端, 局部气候差异显著。试验地植被乔木树种为兴安落叶松 (*Larix gmelinii*), 白桦 (*Betula platyphylla*) 和毛赤杨 (*Alnus sibirica* var. *hirsuta*),

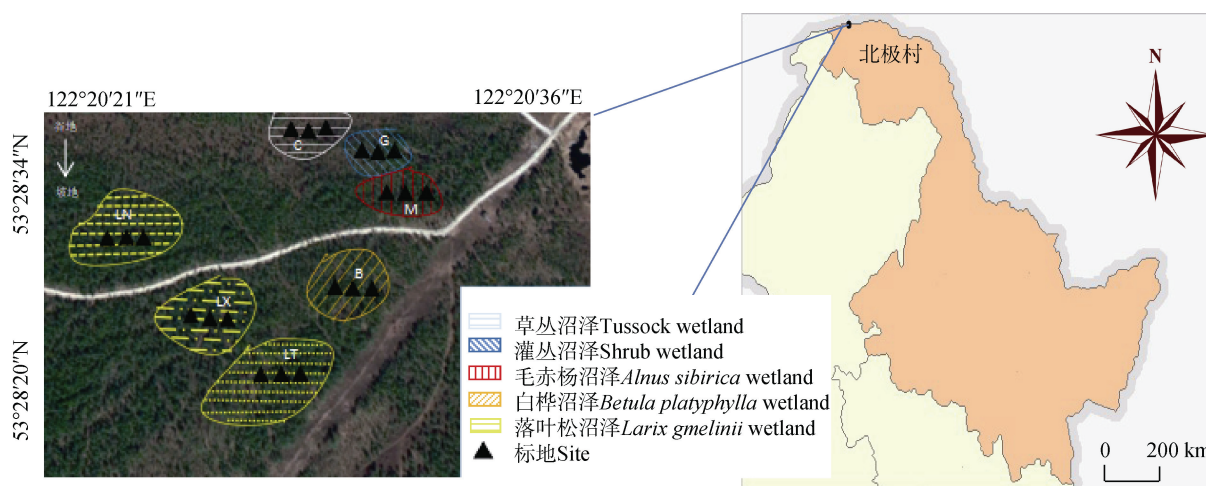


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Location map of the study site

灌木主要有油桦 (*Betula ovalifolia*)、笃斯越橘 (*Vaccinium uliginosum*) 和细叶杜香 (*Ledum palustre*)，草本植物主要有瓣囊苔草 (*Carex schmidtii*)、小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*)。

### 1.2 样地设置

本研究于 2017 年 5 月下旬即生长季初期进行样地设置，在研究区选择有代表性的 7 种典型林区沼

泽湿地类型：落叶松苔草沼泽、落叶松藓类沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、毛赤杨沼泽、白桦沼泽、灌丛沼泽和草丛沼泽。在每个沼泽类型中各设置 3 个 20 m×30 m 样地，共设置 21 个标准样地。在生长季前后对标准地的林木进行每木调查，同时采集植被、土壤以及凋落物样品。各类型沼泽湿地的土壤理化性质见表 1。

表 1 寒温带大兴安岭永久冻土区 7 种森林湿地 0~40 cm 土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of the seven kinds of natural forested wetlands typical of the cold temperate zone permafrost region in the Daxing'an Mountains (0~40 cm)

湿地类型 Wetland type	水位 Water level /cm	化冻深度 Thaw depth /cm	土壤温度 Soil temperature /°C				
			0	10	20	30	40
C	-7.31±0.80bc	115.1±0.6g	2.56±0.42d	-1.67±0.02a	0.94±0.06a	3.17±0.03b	2.99±0.08a
G	-14.53±2.49ab	113.0±0.7f	0.55±0.15b	-1.29±0.07b	1.58±0.05b	3.41±0.03c	3.22±0.01b
M	-5.84±3.88c	105.2±0.1d	0.48±0.28b	-1.27±0.01b	1.58±0.01b	3.48±0.02d	3.43±0.01c
B	-10.49±3.15abc	70.0±0.5a	-0.21±0.02a	-1.32±0.03b	1.94±0.04c	2.50±0.06a	3.21±0.01b
LT	-13.87±3.67ab	80.2±0.7b	1.63±0.26c	-0.39±0.04d	2.22±0.03d	3.82±0.02f	4.24±0.01e
LX	-15.96±0.97a	95.3±0.9c	2.87±0.65d	-0.60±0.06c	1.64±0.06b	3.62±0.03e	3.88±0.01d
LN	-8.09±0.95bc	108.6±0.7e	1.14±0.33bc	-0.66±0.01c	2.73±0.03e	4.75±0.01j	4.50±0.20f

湿地类型 Wetland type	pH	容重	有机碳	全氮	碳氮比	含水量
		Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	Organic carbon/ (mg·g <sup>-1</sup> )	Total nitrogen / (mg·g <sup>-1</sup> )	C/N ratio	Water content/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
C	5.37±0.04a	0.88±0.31a	117.2±62.2a	8.83±3.98a	13.00±1.05a	1.59±0.52abc
G	5.11±0.18a	1.15±0.29a	103.3±39.8a	8.23±1.15a	12.30±3.01a	1.50±0.24abc
M	5.21±0.11a	0.95±0.33a	166.8±120.7a	12.77±7.70a	12.33±1.89a	2.12±0.79c
B	5.22±0.20a	0.92±0.34a	169.3±130.6a	13.10±9.78a	12.77±0.57a	1.10±0.46ab
LT	5.24±0.14a	0.88±0.31a	112.7±81.9a	8.53±6.21a	13.77±1.65a	0.88±0.28a
LX	5.24±0.21a	0.79±0.16a	88.7±71.3a	4.80±3.97a	18.60±0.40b	0.82±0.26a
LN	5.11±0.11a	0.89±0.36a	161.3±78.1a	10.03±3.4a	15.57±2.47ab	1.85±0.56bc

注：1) C: 草丛沼泽, G: 灌丛沼泽, M: 毛赤杨沼泽, B: 白桦沼泽, LT: 落叶松苔草沼泽, LX: 落叶松藓类沼泽, LN: 落叶松泥炭藓沼泽。下同。2) 同一列中小写字母不同表示不同类型湿地差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: 1) C: Tussock wetland, G: Shrub wetland, M: *Alnus sibirica* wetland, B: *Betula platyphylla* wetland, LT: *Larix gmelinii-Carex schmidtii* wetland, LX: *Larix gmelinii*-Moss wetland, LN: *Larix gmelinii-Sphagnum* spp. wetland. The same below. 2) Different lowercase letters indicate significant differences between wetlands ( $P<0.05$ ).

### 1.3 植被碳储量测定

生物量测定：乔木层对森林沼泽中各标准地的林木（胸径大于 4 cm）进行每木检尺，通过已建立的胸径与生物量的回归方程（表 2）<sup>[32]</sup>，即  $W=aD^b$ ，a、b 为系数，计算出天然状态下各沼泽类型乔木层

的生物量。选取 3~5 株标准木，截取部分树根、树干、树枝和树叶带回实验室。灌木层与草本层在每个标准地的中心与四角设置 5 个 2 m×2 m 灌丛样方，并随机设置 10 个 1 m×1 m 的草丛样方，采用收获法取样。凋落物层于秋季落叶后在各样地中分别设置

表 2 大兴安岭森林沼泽群落建群种兴安落叶松、白桦和毛赤杨相对生长方程

Table 2 Relative growth equations for *Larix gmelinii*, *Betula platyphlla* and *Alnus sibirica* var. *hirsuta*, forest constructive species of forested wetlands in Daxing'anling of China

树种 Species	树龄 Tree age /a	胸径生长量 DBH growth /cm	生物量方程 Growth equation for biomass	$R^2$	显著性 Significance	
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	35~60	0.10~0.26	树干 Trunk	$W = 0.031 7D^{2.693 0}$	0.992 7	0.000 0
			树枝 Branch	$W = 0.005 4D^{2.828 2}$	0.954 7	0.000 0
			树叶 Leaf	$W = 0.014 1D^{1.913 0}$	0.959 3	0.009 6
			树皮 Bark	$W = 0.335 4D^{1.125 1}$	0.989 3	0.000 0
			树根 Root	$W = 0.009 5D^{2.877 9}$	0.976 3	0.000 0
			全树 Tree	$W = 0.131 9D^{2.414 7}$	0.994 9	0.000 4
白桦 <i>Betula platyphlla</i>	20~40	0.31~0.35	树干 Trunk	$W = 0.052 9D^{2.563 8}$	0.908 5	0.000 1
			树枝 Branch	$W = 0.000 2D^{3.728 2}$	0.929 7	0.000 0
			树叶 Leaf	$W = 0.000 2D^{3.584 0}$	0.904 1	0.000 0
			树皮 Bark	$W = 0.001 3D^{2.712 0}$	0.993 0	0.000 5
			树根 Root	$W = 0.599 5D^{0.952 1}$	0.948 2	0.000 2
			全树 Tree	$W = 0.019 6D^{3.026 4}$	0.930 7	0.000 0
毛赤杨 <i>Alnus sibirica</i> var. <i>hirsuta</i>	20~30	0.37~0.40	树干 Trunk	$W = 0.107 7D^{2.035 7}$	0.990 1	0.000 0
			树枝 Branch	$W = 0.008 2D^{2.594 8}$	0.952 0	0.000 4
			树叶 Leaf	$W = 0.002 5D^{2.900 9}$	0.977 2	0.000 1
			树皮 Bark	$W = 0.000 6D^{2.946 1}$	0.992 2	0.000 0
			树根 Root	$W = 0.210 3D^{1.405 0}$	0.974 9	0.000 3
			全树 Tree	$W = 0.2393 D^{1.996 7}$	0.992 8	0.000 4

注: W: 生物量, kg; D: 胸径, cm。Note: W: Biomass, kg; D: Diameter at breast height, cm.

10 个 20 cm×20 cm 的样方, 收集其中全部凋落物。样品带回实验室后在 70 °C 下烘干至恒重, 得到此三层的生物量。

利用碳/氮分析仪 Multi N/C 3100 和 HT 1300 Solids Module (Analytik Jena AG, Germany) 通过 1 300 °C 干烧法测定各层的有机碳含量, 乘以各层的生物量, 四者相加即植被的碳储量。

#### 1.4 土壤碳储量测定

在每个标准样地中心, 以“品”字形设置 3 个土壤剖面。在剖面上用土壤环刀(100 cm<sup>3</sup>)以 10 cm 为一个土壤层取样, 由于泥炭层厚度均未超过 1 m, 故采样时按 1 m 标准<sup>[14-15]</sup>, 土样带回实验室在 105 °C 下烘干 24 h, 测定其土壤容重; 再在同一土层深度取约 500 g 土样带回实验室风干, 取出其中大于 2 mm 的根系或岩石, 在 70 °C 下烘干 24 h, 粉碎过 2 mm 土壤筛, 利用 Multi N/C 3100 分析仪和

HT 1300 Solid Module (Analytik Jena AG, Germany) 测定土壤有机碳含量, 并利用公式计算土壤有机碳储量<sup>[35]</sup>。

#### 1.5 植被净初级生产力和年净固碳量测定

植被净初级生产力乔木层是在各森林湿地类型中按划分好的径级选取 3~5 株标准木, 使用生长锥钻取胸高处的树轮样芯, 通过树木年轮分析仪得到每一径级样芯近 5 年的胸径生长量, 结合相对生长方程计算近 5 年的平均值, 灌木层净初级生产力为其生物量除以平均年龄 (5 a)<sup>[36-37]</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相加 (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); 植被年净固碳量是各层的年净初级生产力与其相应的碳含量的乘积。三个植被层相加为各沼泽类型的植被净初级生产力和年净固碳量。

## 1.6 数据处理

文中数据均采用 SPSS17.0 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

### 2.1 大兴安岭永久冻土区沼泽湿地植被碳储量

由表 3 可知, 大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽类型的植被碳储量 ( $3.60\sim 62.18\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 存在差

异性。4 种森林沼泽 (落叶松泥炭藓沼泽除外) 显著高于草丛沼泽和灌丛沼泽 5.1 倍~16.3 倍和 3.2 倍~11.0 倍 ( $P<0.05$ ); 5 种森林沼泽植被碳储量由高到低依次为落叶松苔草沼泽 (显著高于其他 4 种类型 0.5 倍~4.2 倍)、白桦沼泽和落叶松藓类沼泽 (显著高于后两者 0.6 倍~2.5 倍)、毛赤杨沼泽 (显著高于后者 0.8 倍)、落叶松泥炭藓沼泽的单峰型变化趋势; 灌丛沼泽略高于草丛沼泽 (0.4 倍,  $P>0.05$ )。因此, 寒温带大兴安岭永久冻土区天然沼泽植被碳储量沿过渡带环境梯度呈现出先上升后降低的偏态型分布规律。

表 3 寒温带大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽湿地的植被碳储量及其分配

Table 3 Vegetation carbon storage and its allocation in the seven kinds of natural wetlands at Mohe permafrost sites in cool temperate Daxin'anling of China

湿地类型 Wetland type	碳储量 Carbon storage/ ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )					分配比 Allocation/%			
	乔木层 Tree	灌木层 Shrub	草本层 Herb	凋落物层 Litter	植被 Vegetation	乔木层 Tree	灌木层 Shrub	草本层 Herb	凋落物层 Litter
C			3.03±0.49b	0.57±0.11a	3.60±0.49a			84.20±2.09	15.80±2.09
G		1.99±0.46b	2.57±0.44b	0.62±0.07a	5.18±0.10a		38.42±8.58	49.61±8.53	11.97±0.23
M	17.21±1.52a	1.01±0.27ab	1.29±0.13a	2.30±0.54b	21.81±1.70b	78.91±1.21	4.63±0.86	5.91±0.93	10.55±0.78
B	30.05±4.79b	0.95±0.23ab	0.65±0.15a	3.66±0.35c	35.31±4.86c	85.10±1.67	2.69±0.37	1.84±0.63	10.37±1.30
LT	58.45±3.87c	0.77±0.07a	0.78±0.32a	2.18±0.56b	62.18±3.58d	94.00±0.87	1.24±0.15	1.25±0.59	3.51±0.21
LX	39.00±5.91b	1.40±0.54ab	0.47±0.10a	1.06±0.23a	41.93±5.77c	93.01±1.59	3.34±1.57	1.12±0.32	2.53±0.32
LN	9.49±0.89a	0.76±0.09a	0.80±0.08a	0.89±0.17a	11.94±0.80a	79.48±2.17	6.37±1.06	6.70±0.80	7.45±0.49

注: 平均值±标准差; 不同小写字母表示不同湿地类型植被碳储量差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different capital letters mean significant difference significant difference between wetlands in vegetation carbon storage ( $P<0.05$ ).

在水平空间上, 草丛沼泽植被碳储量以草本层占优势 (84.20%), 灌丛沼泽以草本层 (49.61%) 与灌木层 (38.42%) 共同占优势, 而森林沼泽则以乔木层 (78.91%~94.00%) 占绝对优势地位。在垂直空间上, 乔木层碳储量沿过渡带环境梯度呈现单峰型分布; 灌木层碳储量呈现灌丛沼泽大于森林沼泽 (高于 5 种森林沼泽类型 0.4 倍~1.6 倍, 且显著高于落叶松苔草沼泽和落叶松泥炭藓沼泽); 草本层碳储量则呈现草丛沼泽与灌丛沼泽大于森林沼泽 (显著高于 5 种森林沼泽 1.0 倍~6.0 倍,  $P<0.05$ )。因此, 7 种沼泽类型的植被碳储量水平分布格局沿过渡带环境梯度趋于复杂化, 垂直分布格局沿该梯度表现为乔木层碳储量呈单峰型分布, 灌木层、草本层碳储量呈灌丛沼泽或草丛沼泽与灌丛沼泽大于

森林沼泽。

### 2.2 大兴安岭永久冻土区天然沼泽湿地土壤碳储量

大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽类型的土壤碳储量 ( $179.47\sim 320.81\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 存在显著差异性 (表 4)。灌丛沼泽、白桦沼泽和 3 种落叶松沼泽显著高于草丛沼泽和毛赤杨沼泽 56.4%~78.8% 和 32.0%~50.9% ( $P<0.05$ ), 但前五者间差异性并不显著 (1.5%~14.3%,  $P>0.05$ ), 后两者间差异性也不显著 (18.5%,  $P>0.05$ )。因此, 寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的土壤碳储量沿过渡带呈现出灌丛沼泽与森林沼泽 (毛赤杨沼泽除外) 相近且高于毛赤杨沼泽与草丛沼泽的变化趋势。

在垂直空间上, 草丛沼泽可分为 0~10 cm 高碳

表 4 寒温带大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽湿地土壤有机碳储量及其分布特征

Table 4 Soil organic carbon storage and its distribution in the seven kinds of wetlands at Mohe permafrost sites in cool temperate Daxin'anling of China

土壤深度 Soil depth/cm	湿地类型 Wetland type						
	C	G	M	B	LT	LX	LN
0~10	57.45±2.94Ae	67.27±8.19ABCc	53.26±8.67Ac	65.41±1.49ABCb	82.47±4.62Cc	76.69±4.44BCc	62.11±5.04ABb
10~20	11.44±2.37Aab	44.10±11.18BCb	47.33±2.10BCc	69.48±17.99Cb	69.52±7.73Cc	36.42±5.54Bb	62.87±5.09BCb
20~30	16.19±0.76Acd	23.21±5.09ABa	28.90±3.35Bb	27.56±2.61Ba	20.49±2.39ABab	25.33±2.45ABa	24.92±3.23ABa
30~40	17.68±1.02ABd	14.96±1.41Aa	25.75±2.75Bb	12.96±0.21Aa	18.92±3.35ABab	25.61±4.33Ba	20.23±1.45ABa
40~50	15.40±0.47ABbcd	24.08±0.61Da	12.71±0.49Aa	23.49±0.33CDa	21.72±4.00CDb	18.35±0.47BCa	25.40±1.59Da
50~60	14.07±0.81Aabcd	22.77±0.94Ba	10.82±0.27Aa	22.39±0.77Ba	19.18±7.85ABab	22.59±2.68Ba	24.45±0.15Ba
60~70	12.06±0.11Aabc	23.64±1.83CDa	12.48±0.74Aa	24.42±0.89CDa	15.45±3.71ABab	20.05±0.64BCa	26.41±1.05Da
70~80	12.17±0.36Aabc	27.91±2.59Ca	9.94±0.97Aa	23.16±0.17BCa	20.16±1.15Bab	19.75±2.70Ba	26.54±0.42Ca
80~90	12.45±1.30Aabc	21.48±3.55Ba	6.67±0.81Aa	20.31±0.45Ba	10.79±2.99Aab	19.27±0.87Ba	23.13±2.48Ba
90~100	10.56±0.59Ba	25.69±2.38Da	4.80±0.24Aa	20.92±0.80CDa	6.26±0.81ABa	16.69±0.27Ca	24.75±3.57Da
合计 Total	179.47±0.75A	295.11±11.64B	212.66±13.17A	310.10±21.60B	284.96±4.96B	280.75±18.33B	320.81±5.55B

注: 不同大写字母表示沼泽湿地类型间土壤有机碳储量差异显著, 不同小写字母表示土层间有机碳储量差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate significant difference between wetlands in soil organic carbon storage, and different lowercase letters do significant difference between soil layers in soil organic carbon storage ( $P<0.05$ ).

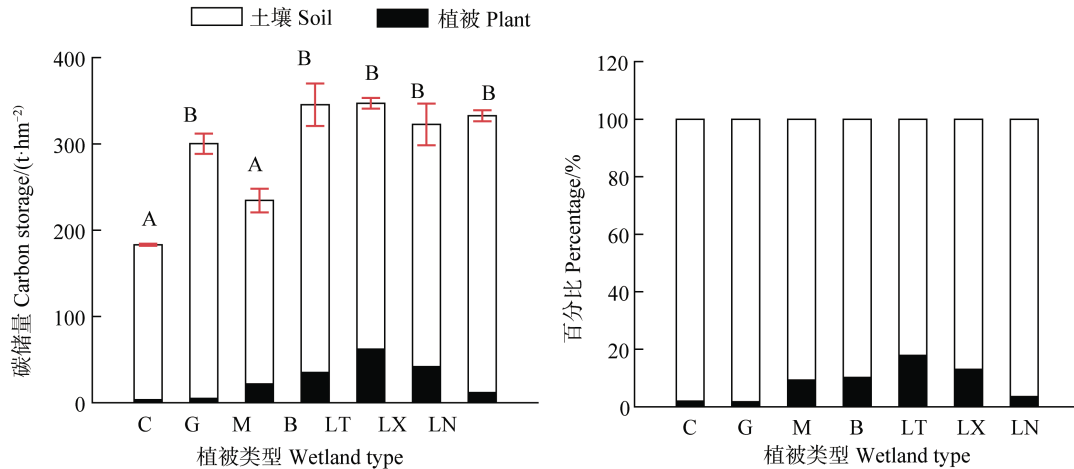
密度层 (32.0%) 和 10~100 cm 低碳密度层 (5.9%~9.9%); 白桦沼泽、落叶松苔草沼泽和落叶松泥炭藓沼泽可分 0~20 cm 高碳密度层 (19.4%~28.9%) 和 20~100 cm 低碳密度层 (2.2%~8.9%); 灌丛沼泽和落叶松藓类沼泽可分 0~10 cm 高碳密度层 (22.8%~27.3%)、10~20 cm 中碳密度层 (13.0%~14.9%) 和 20~100 cm 低碳密度层 (5.1%~9.5%); 毛赤杨沼泽可分 0~20 cm 高碳密度层 (22.3%~25.0%)、20~40 cm 中碳密度层 (12.1%~13.6%) 和 40~100 cm 低碳密度层 (2.3%~6.0%)。故各沼泽类型土壤碳密度的垂直分层有所不同, 但总体上均呈现出随土壤深度增加而递减的变化趋势。

在水平空间上, 落叶松苔草沼泽与落叶松藓类沼泽在 0~10 cm 土壤层碳密度显著高于草丛沼泽 33.5%~43.6% ( $P<0.05$ ); 灌丛沼泽和 5 种森林沼泽在 10~20 cm 土壤层均显著高于草丛沼泽 218.4%~507.7% ( $P<0.05$ ); 毛赤杨沼泽、白桦沼泽在 20~30 cm 土壤层显著高于草丛沼泽 70.2%~78.5% ( $P<0.05$ ); 毛赤杨沼泽和落叶松藓类沼泽在 30~40 cm 土壤层显著高于灌丛沼泽和白桦沼泽 (71.2%~98.7%,  $P<0.05$ ); 灌丛沼泽、白桦沼泽、

落叶松藓类沼泽 (40~50 cm 土壤层除外) 及落叶松泥炭藓沼泽在 40~100 cm 各土壤层碳密度均显著高于毛赤杨沼泽和草丛沼泽 (44.4%~435.2%和 41.0%~143.3%,  $P<0.05$ ), 而落叶松苔草沼泽在 40~80 cm 土壤层显著高于毛赤杨沼泽 (71.0%~102.8%,  $P<0.05$ ) 及在 40~50 cm 和 70~80 cm 土壤层显著高于草丛沼泽 (41.0%~65.7%,  $P<0.05$ )。故其土壤碳密度沿过渡带环境梯度水平分布规律为草丛沼泽在各土壤层 (0~100 cm) 一般均低于灌丛沼泽和森林沼泽 (仅在 0~30 cm 土壤层低于毛赤杨沼泽), 毛赤杨沼泽在各土壤层 (40~100 cm) 一般均低于灌丛沼泽和其他 4 种森林沼泽。

### 2.3 大兴安岭永久冻土区天然沼泽湿地生态系统碳储量

大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽类型的生态系统碳储量存在显著差异性 (图 2)。各沼泽类型的生态系统碳储量分布在 183.07~347.14 t·hm<sup>-2</sup> 之间, 其中, 灌丛沼泽、白桦沼泽、3 种落叶松沼泽显著高于草丛沼泽和毛赤杨沼泽 64.0%~89.6%和 28.1%~48.1% ( $P<0.05$ ), 但前 5 种沼泽类型之间差异性不显著 (7.5%~15.6%,  $P>0.05$ ), 毛赤杨沼



注：1) C: 草沼泽, G: 灌丛沼泽, M: 毛赤杨沼泽, B: 白桦沼泽, LT: 落叶松苔草沼泽, LX: 落叶松藓类沼泽, LN: 落叶松泥炭藓沼泽。2) 大写字母不同表示不同类型湿地差异显著 ( $P < 0.05$ )。Note: 1) C: Tussock wetland, G: Shrub wetland, M: *Alnus sibirica* wetland, B: *Betula platyphylla* wetland, LT: *Larix gmelinii-Carex schmidtii* wetland, LX: *Larix gmelinii*-Moss wetland, LN: *Larix gmelinii-Sphagnum* spp. wetland. 2) Different lowercase letters indicate significant differences between wetlands ( $P < 0.05$ ).

图2 大兴安岭7种天然沼泽湿地生态系统有机碳储量及其分配

Fig. 2 Ecosystem organic carbon storage and its allocation in the seven kinds of natural wetlands in Daxing'anling of China

泽与草沼泽差异性也不显著 (高于 28.1%,  $P > 0.05$ )。因此, 寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的生态系统碳储量沿过渡带环境梯度呈现出灌丛沼泽与森林沼泽 (毛赤杨沼泽除外) 相近且显著高于草沼泽和毛赤杨沼泽的变化规律性。

草沼泽和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 (98.03%~98.28%), 植被碳储量仅占很少比重 (1.72%~1.97%); 而森林沼泽生态系统碳储量仍以土壤碳储量占优势地位 (82.09%~96.41%), 但植被碳储量所占比重却有较大幅度增加 (3.59%~17.91%)。这说明各沼泽类型发挥碳汇功能的方式有所不同, 草沼泽和灌丛沼泽主要是以形成泥炭方式将碳素储存在土壤中, 而森林沼泽则以形成泥炭与积累植被生物量两种方式储存碳素。

#### 2.4 大兴安岭永久冻土区天然沼泽湿地植被净初级生产力与年净固碳量

由表 5 可知, 大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽类型的植被净初级生产力 ( $6.76 \sim 11.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 和年净固碳量 ( $2.97 \sim 5.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 均存在显著差异。毛赤杨沼泽、白桦沼泽、落叶松苔草沼泽、落叶松藓类沼泽的植被净初级生产力和年净固碳量显著高于草沼泽 (26.9%~61.4%和 38.6%~77.2%,  $P < 0.05$ ) 和灌丛沼泽 (30.5%~66.0%和 41.4%~

80.8%,  $P < 0.05$ ), 而落叶松泥炭藓沼泽仅略高于草沼泽 (15.0%和 20.1%,  $P > 0.05$ ) 和灌丛沼泽 (18.2%和 21.5%,  $P > 0.05$ ), 且 5 种森林沼泽中落叶松苔草沼泽的植被净初级生产力显著高于毛赤杨沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松泥炭藓沼泽 20.4%~40.4% ( $P < 0.05$ ), 植被年净固碳量显著高于其他类型 21.8%~47.5% ( $P < 0.05$ ), 而草沼泽和灌丛沼泽却相近 (2.8%和 2.0%,  $P > 0.05$ )。因此, 寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的植被净初级生产力与年净固碳量沿过渡带环境梯度呈现出森林沼泽 (落叶松泥炭藓沼泽除外) 显著高于草沼泽与灌丛沼泽的变化规律性。

此外, 7 种沼泽类型各植被层的净初级生产力和年净固碳量也有所不同。植被净初级生产力和年净固碳量为乔木层呈现落叶松苔草沼泽 (显著高于其他 4 种森林沼泽 16.0%~59.5%和 23.0%~63.8%,  $P < 0.05$ ) > 白桦沼泽和落叶松藓类沼泽 (显著高于后两者 22.0%~37.5%和 25.5%~33.2%,  $P < 0.05$ ) > 毛赤杨沼泽和落叶松泥炭藓沼泽; 灌木层呈现灌丛沼泽显著高于森林沼泽 97.4%~165.5%和 42.9%~166.7% ( $P > 0.05$ ), 森林沼泽灌木层相对较低且相近; 草本层呈现草沼泽和灌丛沼泽显著高于森林沼泽 107.3%~588.1%和 89.6%~544.7% ( $P < 0.05$ ), 森林沼泽草本层相对较低且相近。因此, 7 种沼泽



表 5 寒温带大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽湿地植被净初级生产力与年植被年净固碳量

Table 5 Net primary productivity and net carbon sequestration of the seven kinds of natural wetlands vegetation in cool temperate Daxing'anling of China

湿地类型 Wetland type	净初级生产力 NPP/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )				植被年净固碳量 VNCS/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			
	乔木层 Tree	灌木层 Shrub	草本层 Herb	植被 Vegetation	乔木层 Tree	灌木层 Shrub	草本层 Herb	植被 Vegetation
C			6.95±1.02B	6.95±1.02A			3.03±0.49B	3.03±0.49A
G		0.77±0.17B	5.99±1.01B	6.76±0.84A		0.40±0.09A	2.57±0.44B	2.97±0.35A
M	6.08±0.06A	0.35±0.05A	2.89±0.21A	9.32±0.14B	2.75±0.02A	0.20±0.05A	1.29±0.13A	4.24±0.11B
B	7.88±0.44B	0.36±0.03A	1.48±0.34A	9.72±0.12BC	3.57±0.26B	0.19±0.05A	0.65±0.15A	4.41±0.15B
LT	9.14±0.40C	0.29±0.06A	1.79±0.89A	11.22±0.59C	4.39±0.24C	0.20±0.05A	0.78±0.32A	5.37±0.24C
LX	7.42±0.11B	0.39±0.04A	1.01±0.21A	8.82±0.28B	3.45±0.10B	0.28±0.11A	0.47±0.10A	4.20±0.07B
LN	5.73±0.15A	0.32±0.04A	1.94±0.15A	7.99±0.09AB	2.68±0.07A	0.15±0.02A	0.80±0.08A	3.64±0.07AB

类型各植被层的净初级生产力与年净固碳量随沼泽类型的变化规律为乔木层呈单峰型分布, 灌木层、草本层呈灌丛沼泽或草丛沼泽和灌丛沼泽 > 5 种森林沼泽。

### 3 讨论

#### 3.1 天然沼泽湿地植被碳储量

寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的植被碳储量沿湿地过渡带环境梯度呈先升高后降低的偏态型分布规律, 与大兴安岭岭南非连续冻土区及长白山季节性冻土区天然沼泽湿地的植被碳储量沿过渡带环境梯度呈递增规律<sup>[32-33]</sup>不一致。这可能与各研究区的气候、水文及林分状况等存在差异以及本研究中增加了沼泽类型(落叶松藓类沼泽和落叶松泥炭藓沼泽)有关。至于其植被碳储量沿过渡带呈偏态型分布的原因, 则在于自沼泽到森林方向的过渡带中存在水分梯度, 植物适应不同的水分环境, 依次形成了草丛沼泽、灌丛沼泽、毛赤杨沼泽、白桦沼泽、落叶松苔草沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松泥炭藓沼泽(其中, 前五者随微地势升高, 水位一般会呈降低趋势, 而后两者则处于平坦地势相对低洼地段, 落叶松泥炭藓沼泽地势低, 水位高, 落叶松藓类沼泽则处于落叶松苔草沼泽和落叶松泥炭藓沼泽的过渡地段, 水位高于前者低于后者)(表 1), 其中草丛沼泽和灌丛沼泽由于缺少乔木层致使两者的植被碳储量相对较小, 而落叶松藓类沼泽和落叶松泥炭藓沼泽由于水位限制其碳储量有所降低, 故其植被碳储量沿过渡带呈偏态型分布; 5 种森林沼

泽因具有乔木层碳储量相对较高, 但由于五者所处的生境地段不同, 引起在水位、形成时间及生长速度等方面均有所差异(生长季平均水位在 -5.8 ~ -16.0 cm; 林龄在 25 ~ 55 年; 近 5 年平均胸径生长量 0.12 ~ 0.38 cm·a<sup>-1</sup>) (表 1 和表 2), 使得处于过渡带最上部的落叶松苔草沼泽植被碳储量最高, 白桦沼泽与落叶松藓类沼泽较高, 而毛赤杨沼泽与落叶松泥炭藓沼泽较低, 故 5 种森林沼泽的植被碳储量沿过渡带呈现单峰型分布。

7 种天然沼泽类型的植被碳储量与北方森林植被碳储量估计值 40 ~ 64 t·hm<sup>-2</sup><sup>[38]</sup>相比, 草丛沼泽与灌丛沼泽和毛赤杨沼泽与落叶松泥炭藓沼泽仅相当于其下限值的 9.0% ~ 13.0% 和 29.8% ~ 54.5%, 白桦沼泽和落叶松藓类沼泽与其下限值相近(88.3% ~ 104.9%), 而落叶松苔草沼泽则接近其上限值(97.2%)。因此, 寒温带大兴安岭永久冻土区仅白桦沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽植被的碳储量与北方森林植被的碳储量相近, 而草丛沼泽、灌丛沼泽及另 2 种森林沼泽(毛赤杨沼泽和落叶松泥炭藓沼泽)植被的碳储量却低于北方森林。

#### 3.2 天然沼泽湿地土壤碳储量

寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地土壤碳储量沿过渡带所呈现灌丛沼泽与 4 种森林沼泽(毛赤杨沼泽除外) > 草丛沼泽与毛赤杨沼泽的变化规律性, 与大兴安岭岭南非连续冻土区及长白山季节性冻土区天然沼泽湿地的土壤碳储量沿过渡带环境梯度呈递减规律<sup>[32-33]</sup>不一致。其原因主要在于后两者的泥炭层厚度沿过渡带水分环境梯度呈现递减趋势, 致使两者的土壤碳储量沿过渡带也呈递减趋势。

而大兴安岭北部永久冻土区沼泽湿地的泥炭层厚度沿过渡带水分环境梯度却呈草丛沼泽与毛赤杨沼泽低于灌丛沼泽与其他 4 种森林沼泽的变化趋势, 致使其土壤碳储量也呈类似趋势。例如, 草丛沼泽 0~100 cm 土层的碳密度及毛赤杨沼泽在 40~100 cm 土层的碳密度一般均显著低于灌丛沼泽和森林沼泽(见表 4), 导致两者的土壤碳储量显著低于灌丛沼泽和其他 4 种森林沼泽(毛赤杨沼泽除外)。至于草丛沼泽各土层的碳密度均较低的原因可能存在两方面原因: 一是草丛沼泽可能正处于水生群落向沼生群落演替的早期阶段, 形成的泥炭层较薄; 二是本区春季干旱少雨, 火干扰发生比较频繁, 过往的火灾也有可能烧毁了泥炭层。毛赤杨沼泽在 40~100 cm 土层的碳密度相对较低可能是由于其处于溪流沿岸经常水淹的生境地, 群落形成时间要晚于其他森林沼泽群落。

此外, 7 种沼泽类型的土壤碳储量(179.47~320.81 t·hm<sup>-2</sup>) 高于我国天然林平均土壤碳储量(109 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[39]</sup> 1.7 倍~3.2 倍和北方森林土壤碳储量(85 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[36]</sup> 2.2 倍~4.1 倍。故寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地土壤的碳汇功能强于森林土壤。

### 3.3 天然沼泽湿地生态系统碳储量

寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的生态系统碳储量沿过渡带环境梯度呈现灌丛沼泽与森林沼泽(毛赤杨沼泽除外)相近且显著高于草丛沼泽与毛赤杨沼泽的变化规律性, 与大兴安岭岭南非连续冻土区天然沼泽湿地的生态系统碳储量沿过渡带环境梯度基本上呈恒定分布<sup>[32]</sup>及长白山季节性冻土区湿地生态系统碳储量呈递减趋势<sup>[33]</sup>不一致。上述三者不同的原因则主要在于长白山的植被碳储量呈递增趋势及土壤碳储量呈递减趋势, 且以土壤碳储量占优势地位, 故其生态系统碳储量呈递减趋势; 大兴安岭岭南的植被碳储量呈递增趋势, 土壤碳储量呈递减趋势, 且两者作用相近, 故其生态系统碳储量呈恒定型分布; 而大兴安岭永久冻土区的植被碳储量呈递增趋势, 土壤碳储量总体上也呈递增趋势(灌丛沼泽与森林沼泽一般显著高于草丛沼泽和毛赤杨沼泽), 故其生态系统碳储量也呈递增趋势。

寒温带大兴安岭永久冻土区 7 种天然沼泽类型的生态系统碳储量(183.07~345.40 t·hm<sup>-2</sup>) 为北方森林生态系统碳储量(125~149 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[38]</sup>的 1.2 倍~2.8 倍, 相当于北方泥炭地生态系统碳储量

(390~1395 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[15]</sup>下限值的 46.9%~89.0%。故寒温带大兴安岭永久冻土区天然沼泽湿地的生态系统碳储量高于北方森林但低于北方泥炭地。因此, 位于北方泥炭地南缘的大兴安岭永久冻土区, 因其生态系统碳储量相对较少, 在未来全球气候进一步变暖与冻土退化加速的情景下, 封存于其冻土中碳的释放量可能要远低于预期。

### 3.4 天然沼泽湿地植被净初级生产力与年净固碳量

寒温带大兴安岭永久冻土区沼泽湿地的植被净初级生产力与年净固碳量沿过渡带环境梯度呈现森林沼泽高于草丛沼泽和灌丛沼泽的变化趋势, 与长白山天然沼泽类型的植被净初级生产力与年净固碳量沿过渡带呈阶梯式递增趋势(毛赤杨沼泽与白桦沼泽>草丛沼泽与灌丛沼泽)<sup>[33]</sup>相一致, 与大兴安岭岭南沼泽湿地基本呈恒定型(各类型间一般无显著差异性)<sup>[32]</sup>不一致。这可能与各区域气候条件、生境特征及沼泽类型不同有关。至于其植被净初级生产力与年净固碳量沿过渡带呈森林沼泽高于草丛沼泽与灌丛沼泽的原因, 可能主要存在两个方面的原因: 一是森林沼泽的群落垂直结构较草丛沼泽和灌丛沼泽复杂, 增大了植被对光能利用能力, 导致其生产力与固碳能力较高; 二是森林沼泽(毛赤杨沼泽、白桦沼泽、落叶松泥炭藓沼泽)的 0~40 cm 土壤层的全氮含量高于草丛沼泽与灌丛沼泽 14.1%~54.4%和 21.9%~59.2%(可能源于冻土融化引起储存于冻土之中的氮素的释放)(见表 1), 也可能有助于提高森林沼泽的生产力与固碳能力。

7 种天然沼泽类型的植被净初级生产力(6.76~11.22 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 与现有中国东北植被净初级生产力(6~14 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)<sup>[40-41]</sup>相一致; 但森林沼泽仅接近温带森林沼泽植被净初级生产力(10~15 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)<sup>[42-43]</sup>的下限值(-20.0%~12.0%), 草丛沼泽和灌丛沼泽较其降低近 1/3(30.5%~32.4%); 且 4 种森林沼泽(落叶松泥炭藓沼泽略高 5.1%除外)高于寒温带兴安落叶松天然林(7.6 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)<sup>[44]</sup> 16.1%~47.6%, 草丛沼泽和灌丛沼泽较其略低 8.6%~11.1%; 植被年净固碳量(2.97~5.37 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 与全球平均植被固碳能力(4.1 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)<sup>[45]</sup>相比, 仅落叶松苔草沼泽高于全球平均值(9.6%和 31.0%), 其余 4 种森林沼泽接近或达到全球平均值, 草丛沼泽和灌丛沼泽低于全球平均值约 1/4(26.10%和

27.56%)。因此,寒温带大兴安岭永久冻土区森林沼泽植被净初级生产力略低于温带森林沼泽,其植被固碳能力接近或达到全球植被平均值;而草丛沼泽与灌丛沼泽植被净初级生产力与固碳能力仅相当于前两者的 2/3 和 3/4。

## 4 结 论

寒温带永久冻土区各类型沼泽湿地的生态系统碳储量(183.07~345.40 t·hm<sup>-2</sup>)沿过渡带环境梯度总体上呈递增趋势(灌丛沼泽与森林沼泽显著高于草丛沼泽与毛赤杨沼泽),且其生态系统碳储量均相对较低(仅相当于北方泥炭地碳储量(390~1395 t·hm<sup>-2</sup>)下限值的 46.9%~89.0%)。因此,在未来全球气候进一步变暖与冻土退化加速的情景下,封存于其冻土中碳的释放量可能要远低于预期。森林沼泽(落叶松泥炭藓沼泽除外)的植被固碳能力强于灌丛沼泽与草丛沼泽,且前者略高于全球陆地植被年均净固碳量估计值(4.1 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>),而后两者仅相当于其 3/4。因此,应加大本区森林沼泽湿地的保护力度并充分发挥其碳汇作用。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. *Nature*, 2015, 520 (7546): 171—179.
- [ 2 ] Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11 (23): 6573—6593.
- [ 3 ] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23 (2). <https://doi.org/10.1029/2008gb003327>.
- [ 4 ] Abbott B W, Jones J B. Permafrost collapse alters soil carbon stocks, respiration, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in upland tundra[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21 (12): 4570—4587.
- [ 5 ] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440 (7081): 165—173.
- [ 6 ] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[M]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [ 7 ] Gruber N, Friedlingstein P, Field C, et al. The vulnerability of the carbon cycle in the 21st century: An assessment of carbon-climate-human interactions [EB/OL]. 2004.
- [ 8 ] Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. *Ecological Applications*, 1991, 1 (2): 182—195.
- [ 9 ] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351 (6324): 304—306.
- [ 10 ] Larson D L. Effects of climate on numbers of northern prairie wetlands[J]. *Climatic Change*, 1995, 30 (2): 169—180.
- [ 11 ] IPCC. Land use, land use change and forestry: A special report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 12 ] Bai J H, Ouyang H, Deng W, et al. Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands[J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 181—192.
- [ 13 ] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada[J]. *Wetlands*, 2000, 20 (4): 605—615.
- [ 14 ] Armentano T V, Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone[J]. *The Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 755—774.
- [ 15 ] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156—159.
- [ 16 ] Bockheim J G, Hinkel K M, Nelson F E. Predicting carbon storage in tundra soils of arctic Alaska[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (3): 948—950.
- [ 17 ] Moore T R, Turunen J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (2): 690—696.
- [ 18 ] Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q. China permafrost[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [ 19 ] Wei Z, Jin H J, Zhang J M, et al. Prediction of permafrost change in northeast China under climate change[J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41 (1): 74—84. [魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41 (1): 74—84.]
- [ 20 ] Sun G Y. Discussion on the symbiotic mechanisms of swamp with permafrost—Taking Da-Xiao Hinggan Mountains as examples[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22 (4): 309—316. [孙广友. 试论沼泽与冻土的共生机理——以中国大小兴安岭地区为例[J]. *冰川冻土*, 2000, 22 (4): 309—316.]
- [ 21 ] Guo D X, Wang S L, Lu G W, et al. Division of

- permafrost regions in Daxiao Hinggan Ling northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(3): 1—9. [郭东信, 王绍令, 鲁国威, 等. 东北大小兴安岭多年冻土分区[J]. *冰川冻土*, 1981, 3(3): 1—9.]
- [ 22 ] Jin H J, Yu Q H, Lü L, et al. Degradation of permafrost in the Xing'anling Mountains, northeastern China[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, 18(3): 245—258.
- [ 23 ] 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[J]. *Catena*, 2013, 101: 31—37.
- [ 24 ] Li W H, Zhou X F, Liu X T. Forest and wetland restoration and stratagem of forest development in northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2007. [李文华, 周晓峰, 刘兴土. 东北森林湿地保育与可持续发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [ 25 ] Sun X X, Mu C C, Song C C, et al. Effects of cutting on methane flux from forested swamps in Xiaoxing'an Mountains, northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 190—194. [孙晓新, 牟长城, 宋长春, 等. 采伐对小兴安岭森林沼泽甲烷通量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 190—194.]
- [ 26 ] Mu C C, Cheng W, Sun X X, et al. Seasonal variation of emission fluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from *Larix gmelinii* swamps soils in Xiaoxing'an Mountains of China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(7): 7—15. [牟长城, 程伟, 孙晓新, 等. 小兴安岭落叶松沼泽林土壤 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 的排放规律[J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 7—15.]
- [ 27 ] Guo J T, Han F L, Hu Y M, et al. Ecological characteristics of vegetation and their responses to permafrost degradation in the north slope of Great Khingan Mountain valley of northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6552—6561. [郭金婷, 韩风林, 胡远满, 等. 大兴安岭北坡多年冻土区植物生态特征及其对冻土退化的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6552—6561.]
- [ 28 ] Guo J T, Han F L, Bu R C, et al. Classification of plant communities and species diversity responses to changes in the permafrost depths of the north slope of the Great Khingan Mountain valley of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6834—6841. [郭金婷, 韩风林, 布仁仓, 等. 大兴安岭北坡多年冻土区植物群落分类及其物种多样性对冻土融深变化的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6834—6841.]
- [ 29 ] Sun J, Li X Z, Wang X W, et al. Analysis of structures of permafrost wetland plant communities along environmental gradients in the Da Hinggan Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1165—1173. [孙菊, 李秀珍, 王宪伟, 等. 大兴安岭冻土湿地植物群落结构的环境梯度分析[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1165—1173.]
- [ 30 ] Jiang L, Song Y Y, Song C C, et al. Indoor simulation study on carbon and nitrogen contents and enzyme activities of soils in permafrost region in greater khingan mountains[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(3): 294—302. [蒋磊, 宋艳宇, 宋长春, 等. 大兴安岭冻土区泥炭地土壤碳、氮含量和酶活性室内模拟研究[J]. *湿地科学*, 2018, 16(3): 294—302.]
- [ 31 ] Han B X, Zhao G Y, Zang S Y, et al. Soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in forest wetlands in permafrost regions of daxing'an mountains[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(13): 136—140. [韩冰雪, 赵光影, 臧淑英, 等. 大兴安岭多年冻土区森林湿地土壤碳氮含量及酶活性研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(13): 136—140.]
- [ 32 ] Mu C C, Wang B, Lu H C, et al. Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4956—4965. [牟长城, 王彪, 卢慧翠, 等. 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4956—4965.]
- [ 33 ] Yan S, Mu C C, Wang B W, et al. Carbon storage of natural broadleaved forested marsh wetland ecosystem in temperate Changbai Mountain of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(8): 1—11. [闫苏, 牟长城, 王伯炜, 等. 温带长白山天然阔叶林沼泽湿地生态系统碳储量[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(8): 1—11.]
- [ 34 ] Hu P. Estimation of carbon reserve of wetlands in western Songnen Plain[D]. Yanji, China: Yanbian University, 2017. [胡畔. 松嫩平原西部沼泽湿地碳储量估算[D]. 延吉: 延边大学, 2017.]
- [ 35 ] Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2875—2882. [杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875—2882.]
- [ 36 ] Giese L A B, Aust W M, Kolka R K, et al. Biomass and carbon pools of disturbed riparian forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1/3): 493—508.
- [ 37 ] 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[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 293: 140—148.
- [ 38 ] Liu S R, Wang H, Luan J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437—5448. [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[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437—5448.]
- [ 39 ] Blais A M, Lorrain S, Plourde Y, et al. Organic carbon

- densities of soils and vegetation of tropical, temperate and boreal forests[M]//Greenhouse gas emissions — Fluxes and processes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 155—185.
- [ 40 ] Zhou G S, Zhang X S. Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20 ( 1 ) : 11—19. [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[J]. 植物生态学报, 1996, 20( 1 ): 11—19.]
- [ 41 ] Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Dynamic changes of vegetation net primary productivity in permafrost zone of northeast China in 1982-2009 in response to global change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 ( 6 ) : 1511—1519. [毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2012, 23 ( 6 ) : 1511—1519.]
- [ 42 ] Trettin C C, Jurgensen M F, Gale M R, et al. Soil carbon in northern forested wetlands: Impacts of silvicultural practices[M]//Carbon forms and functions in forest soils. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2006: 437—461.
- [ 43 ] Campbell C, Vitt D H, Halsey L A, et al. Net primary production and standing biomass in northern continental wetlands[EB/OL]. Information Report NOR-X-369. Edmonton, Alberta: Nature Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2000.
- [ 44 ] Wu G, Feng Z W. Study on the biomass of *Larix* spp. forest community in the frigid-temperate zone and the temperate zone of China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23 ( 1 ) : 95—101. [吴刚, 冯宗炜. 中国寒温带、温带落叶松林群落生物量的研究概述[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23 ( 1 ) : 95—101.]
- [ 45 ] Li Y P, Ji J J. Simulations of carbon exchange between global terrestrial ecosystem and the atmosphere[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56 ( 4 ) : 379—389. [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[J]. 地理学报, 2001, 56 ( 4 ) : 379—389.]

( 责任编辑: 卢 萍 )