北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

长白山园池湖岸湿地生态系统碳氮储量沿环境梯度空间分异规律

孙梓淇 牟长城 王婷 李美霖 王文婧

Spatial differentiation law of carbon and nitrogen storage along the environmental gradient of Yuanchi lakeshore wetland ecosystems in Changbai Mountain of northeastern China

Sun Ziqi, Mu Changcheng, Wang Ting, Li Meilin, Wang Wenjing

引用本文:
孙梓淇, 牟长城, 王婷, 李美霖, 王文婧. 长白山园池湖岸湿地生态系统碳氮储量沿环境梯度空间分异规律[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):34–46. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230185
Sun Ziqi, Mu Changcheng, Wang Ting, Li Meilin, Wang Wenjing. Spatial differentiation law of carbon and nitrogen storage along the environmental gradient of Yuanchi lakeshore wetland ecosystems in Changbai Mountain of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):34–46. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230185

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230185

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

泰湖国家湿地公园天然植物群落碳储量空间分异规律及主控因素研究

Spatial differentiation law and main control factors of carbon storage in natural plant communities of Taihu National Wetland Park of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 16–28. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220045

林型和林龄对嫩江沙地人工林生态系统碳储量影响规律研究

Effects of forest type and stand age on ecosystem carbon storage of plantations in Nenjiang Sandy Land of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(10): 16–27. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220294

江西九连山不同海拔梯度土壤有机碳的变异规律

Variations in soil organic carbon along an altitudinal gradient of Jiulian Mountain in Jiangxi Province of eastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 19–28. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180383

南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征

Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104–115. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180319

蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响

Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 114–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220507

透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林碳储量的影响

Effects of release cutting intensity on the carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broadleaved trees in Xiaoxing’an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(10): 54–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200361

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230185

长白山园池湖岸湿地生态系统碳氮储量沿环境梯度空间分异规律

孙梓淇　牟长城　王　婷　李美霖　王文婧
（东北林业大学生态研究中心，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】探究湖泊沿岸湿地生态系统碳氮储量沿湖岸至高地的空间分异规律及形成机制，将有助于减少湿地碳储量估算的不确定性。**【方法】**采用相对生长方程、碳/氮分析仪，同步测定长白山园池沿湖岸至高地环境梯度依次分布的 6 种沼泽类型（芦苇沼泽 L、草丛沼泽 C、杜香沼泽 D、落叶松泥炭藓沼泽 LN、落叶松藓类沼泽 LX、落叶松苔草沼泽 LT）的生态系统碳、氮储量（植被和土壤）及其相关环境因子（水位、水位波动幅度、土壤有机质、全氮和全磷等），揭示其空间分异规律及其形成机制。**【结果】**（1）植被碳、氮储量（2.17 ~ 69.98 t/hm^2 和 0.058 ~ 0.940 t/hm^2）沿湖岸至高地环境梯度均呈递增规律（LT ≈ LX > LN > D > C > L），且均以优势植被层占主体地位（73.72% ~ 93.37% 和 71.57% ~ 85.24%）；（2）土壤碳、氮储量（67.45 ~ 243.21 t/hm^2 和 2.44 ~ 13.53 t/hm^2）沿该环境梯度呈阶梯式递减规律（L > C > D ≈ LN > LX ≈ LT）且其碳储量垂直空间分异存在先恒定后递减（L）、先增后降（C、D 和 LN）和递减（LX 和 LT））3 种类型，其氮储量垂直空间分异与碳储量基本一致（仅 C 和 LX 略有不同）；（3）生态系统碳、氮储量（122.20 ~ 245.38 t/hm^2 和 3.31 ~ 13.58 t/hm^2）沿该环境梯度分别呈先降低后恒定型或阶梯式递减型变化规律，且其土壤碳、氮储量占比呈递减趋势（50.27% ~ 99.11% 和 73.48% ~ 99.57%），而植被碳、氮储量占比却呈递增趋势（0.89% ~ 49.73% 和 0.43% ~ 26.52%）；（4）生态系统碳储量在湖岸至高地水分环境梯度的下、中、上部生境地段依次受水位促进、水位抑制和水位波动幅度抑制，而氮储量在相应生境地段上依次受水位促进、水位波动幅度抑制和土壤全氮促进。**【结论】**园池沿岸湿地生态系统碳氮储量沿湖岸至高地水分环境梯度存在明显的空间分异规律，且其形成机制为微地形引起的水位梯度和植被类型分布决定着各沼泽类型的碳氮储存能力，故准确测定湖岸带各沼泽类型碳氮储量将有助于减少集水区尺度上碳氮储量估算的不确定性。

关键词：生态系统；湖泊湿地；碳氮储量；环境梯度；空间分异规律
中图分类号：S718.51；X143　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)08−0034−13
引文格式：孙梓淇，牟长城，王婷，等. 长白山园池湖岸湿地生态系统碳氮储量沿环境梯度空间分异规律［J］. 北京林业大学学报，2024，46(8)：34−46. Sun Ziqi, Mu Changcheng, Wang Ting, et al. Spatial differentiation law of carbon and nitrogen storage along the environmental gradient of Yuanchi lakeshore wetland ecosystems in Changbai Mountain of northeastern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 34−46.

Spatial differentiation law of carbon and nitrogen storage along the environmental gradient of Yuanchi lakeshore wetland ecosystems in Changbai Mountain of northeastern China

Sun Ziqi　Mu Changcheng　Wang Ting　Li Meilin　Wang Wenjing
(Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: ［**Objective**］ Exploring the spatial differentiation and formation mechanism of carbon and nitrogen storage in wetland ecosystem along the lakeshore to the highlands will help to reduce the uncertainty of wetland carbon storage estimation. ［**Method**］ The ecosystem carbon and nitrogen storage (vegetation and soil), and related environmental factors (water level, water level fluctuation amplitude, soil

收稿日期: 2023−07−24　**修回日期:** 2024−01−11
基金项目: 国家自然科学基金项目（31370461）。
第一作者: 孙梓淇。主要研究方向：湿地生态学。Email: 2290593435@qq.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学生态研究中心。
责任作者: 牟长城，教授，博士生导师。主要研究方向：湿地生态学。Email: muccjs@163.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

organic matter, total nitrogen and total phosphorus, etc.) of six plant communities (L-*Phragmites australis* swamp, C-tussock swamp, D-*Ledum palustre* swamp, LN-*Larix olgensis*-*Sphagnum magellanicum* swamp, LX-*Larix olgensis*-moss swamp and LT-*Larix olgensis*-*Carex schmidtii* swamp) distributing along the lakeshore to the highland environmental gradient were simultaneously determined by relative growth equation and carbon/nitrogen analyzer method, to reveal its spatial differentiation law and its formation mechanism. [**Result**] (1) The carbon and nitrogen storage (2.17−69.98 t/ha and 0.058−0.940 t/ha) of the vegetation increased progressively along the environmental gradient from lakeshore to upland (LT ≈ LX > LN > D > C > L), in which the dominant vegetation layer accounted for main position (73.72%−93.37% and 71.57%−85.24%). (2) The soil carbon and nitrogen storage (67.45−243.21 t/ha and 2.44−13.53 t/ha) decreased along the environmental gradient in a step-by-step manner (L > C > D ≈ LN > LX ≈ LT), there were three types of vertical spatial differentiation of carbon stock: first constant and then decreasing (L), first increasing and then decreasing (C, D and LN), and decreasing (LX and LT), and those of nitrogen storage were basically the same as that of carbon stock (only C and LX were slightly different). (3) The carbon and nitrogen storage (122.20−245.38 t/ha and 3.31−13.58 t/ha) of the ecosystem decreased first and then steadily or decreased in a step-by-step manner along the environmental gradient, respectively, the proportion of carbon and nitrogen in soil decreased (50.27%−99.11% and 73.48%−99.57%), but that of vegetation increased (0.89%−49.73% and 0.43%−26.52%). (4) The carbon storage of ecosystems at the lower, middle and upper habitats of the water environmental gradient from lakeshore to upland was promoted by water level, restrained by water level and restrained by water level fluctuation amplitude in turn, while the nitrogen storage was promoted by water level, restrained by water level fluctuation amplitude and promoted by soil total nitrogen in the corresponding habitat. [**Conclusion**] The carbon and nitrogen storage of wetland ecosystem in lakeshore of Yuanchi Lake has obvious spatial differentiation law along the water environmental gradient from lakeshore to upland, and its formation mechanism is that the water level gradient and distribution of vegetation types caused by microtopography determine the carbon and nitrogen storage capacity of each marsh type. Therefore, accurate determination of carbon and nitrogen storage of each marsh type in the lakeshore zone will help to reduce the uncertainty of carbon and nitrogen storage estimation at catchment scale.

Key words: ecosystems; lake wetland; carbon and nitrogen storage; environmental gradient; spatial differentiation law

湿地因其高生产力和低温厌氧环境而使土壤积累大量有机碳，故被认为是重要的碳汇，对全球碳循环具有积极影响[1−2]。湿地仅占地球陆地表面的 5% ~ 8%，却储存了全球陆地碳的 20% ~ 30%，因此在减缓气候变化方面的作用备受关注[2−3]。然而，由于湿地碳储量存在较大的空间异质性[4−6]，其在局地、区域和全球尺度上均存在较大不确定性[7−8]。因此，揭示湿地碳储量的空间分异规律及其形成机制将有助于减少这些不确定性。

湿地碳储量依赖于植被碳输入和土壤碳分解两者的长期平衡，且受气候、水文、土壤、植被和微地形等多重因子的显著影响[9−12]。气候是决定湿地土壤碳库的关键因素，其中温度和降水直接或间接控制土壤有机碳分解速率[13]。同时，厌氧条件和较高植被生产力是促进土壤有机碳积累的关键因素[14−15]。水文状况作为湿地生态系统的主要驱动力，直接影响湿地的理化特性，特别是氧的可利用性，进而调控土壤有机碳分解速率[16−18]。此外，水文过程还直接影响植物群落的结构和分布[19−21]，以及沿水分环境梯度分布的各类湿地植物的生长、生物量积累和碳固定[22]。植被是湿地碳储量和固碳的主要影响因素[23−24]，群落优势种的变化能够改变土壤中有机物的质和量，进而影响湿地土壤碳库[23−25]。微地形通过影响湿地的小气候、水文、土壤理化特性，调控湿地碳累积过程，对湿地土壤有机碳空间分布起着至关重要作用[26−27]。湿地生态系统还存在着密切的碳氮耦合关系[28]，通常湿地生产力受到氮的限制[29]。氮的可利用性的增加能够提高湿地生产力和生物量积累，进而增加湿地的碳固存[30]。此外，氮含量及其迁移转化过程显著影响湿地生态系统的结构和功能[29]。因此，了解湿地氮储量的空间分布将有助于认识其固碳过程[31−33]。研究湿地碳氮储量沿水分环境梯度的空间变化，有助于揭示其空间异质性的形成机制，为湿地生态系统的管理和保护提供科学依据。

从景观尺度上看，北方温带地区的湖泊湿地储存了大量的碳[34]，其中 80% 的碳储存在湖岸泥炭湿地和沉积物中。这些泥炭湿地和沉积物仅占整个景观面积约 1/3（泥炭湿地和沉积物各占 20% 和 13%），却储存碳库总量的 80% 以上[35]。因此，量化湖泊湿地碳储量具有重要意义。湖岸湿地（湖滨带）是湖泊水域与陆地之间的过渡区域[36]，是湖泊湿地重要组成部分[37]。水文状况是湖滨带建立和维持的控制性因素。其中水位波动塑造了湖滨带时空范围和功能差异[38]，尤其是决定了植被沿水陆过渡性分布（湿生向中生和旱生过渡），引起局地碳氮储量沿水分环境梯度产生空间分异[32,39]。例如：我国北方温带干旱区高原湖泊湿地土壤有机碳储量沿水分环境梯度呈降低趋势，主要受水文过程和植被类型所影响[40–41]；而亚热带湿润区平原湖泊沿岸湿地土壤碳储量随水分梯度呈增加趋势，主要受人为施氮所影响[42]。目前国内有关湖滨带碳氮储量沿水分环境梯度空间分异方面的研究比较缺乏，已有的研究结果在不同气候区存在较大差异性，且多集中在土壤层和碳储量方面。因此，有必要从生态系统尺度上揭示各气候区湖滨带碳氮储量沿水分环境梯度空间分异规律及其形成机制。

长白山园池沿岸湿地具有湖滨带和高海拔区的气候敏感性特征[38]，了解这些地区的生态系统碳氮储量特征对全球气候变化的潜在反馈具有重要意义。本研究以长白山园池沿岸沿水分环境梯度分布的典型天然沼泽类型为对象，通过测定各沼泽类型的植被、土壤和凋落物的碳氮储量以及相关环境因子（温度、水位和土壤理化性质等），量化各沼泽类型的生态系统碳氮储量及其分配格局，揭示其沿过渡带水分环境梯度的空间分异规律及形成机制，以便为温带高海拔区湖泊湿地碳汇管理提供依据。

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园池国家级湿地自然保护区（42°01′54″N，128°26′02″E），海拔 1 250 m。该区受长白山地区特殊的大陆性山地气候的影响，冬季漫长寒冷，夏季短暂暖湿，年平均气温在−7 ~ 3 ℃ 之间，年平均降水量 700 ~ 1 400 mm。本研究调查的园池湖泊湿地是形成时间较短的雨养型泥炭沼泽湿地，位于长白山火山东坡，是火山喷发后所形成的火山口湖演变而来，距今已有 900 多年[43]。沿园池湖岸至高地水分环境梯度依次分布着芦苇沼泽、草丛沼泽、杜香沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽 6 种沼泽类型。研究区土壤类型主要为山地沼泽土、草甸土和棕色针叶林土，主要地带性植被为寒温带针叶林，其中长白落叶松（*Larix olgensis*）是主要的乔木树种，细叶杜香（*Ledum palustre*）是典型的灌木，芦苇（*Phragmites australis*）、修氏苔草（*Carex schmidti*）、泥炭藓（*Sphagnum palustre*）等草本植物构成了湿地的底层植被。试验地位于国家级自然保护区内部，海拔较高且无人为活动干扰，是研究生态系统碳、氮储量沿环境梯度空间分布格局及其形成机制的理想场所。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

于 2021 年 5 月进行样地设置，结合研究区的微地形环境特点及不同植被类型的空间分布状况，沿园池湖岸至高地环境梯度设置 3 条重复样带，每个样带均包括 6 种沼泽群落类型（芦苇沼泽 L、草丛沼泽 C、杜香沼泽 D、落叶松泥炭藓沼泽 LN、落叶松藓类沼泽 LX、落叶松苔草沼泽 LT），共设置了 18 个 20 m × 30 m 标准地。于 2021 年 5 月上旬（生长季初期）对标准样地进行了每木调查。于 2021 年 6 月上旬（土壤化冻后）至 10 月上旬（土壤冻结前），每月对样地进行 1 次水位观测，并记录水位变化情况。森林湿地类型的林分状况见表 1，各沼泽类型的土壤理化性质见表 2，各沼泽类型的水位变化情况见图 1。

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 ⩾ 4 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

表 1 长白山园池沿岸 3 种森林湿地类型林分特征

Tab. 1 Stand characteristics of three forest wetland types along lakeshore in Yuanchi, Changbai Mountain

湿地类型 Wetland type	树种 Tree species	胸高断面积/($m^2 \cdot hm^{-2}$) Basal area/($m^2 \cdot ha^{-1}$)	平均胸径 Mean DBH/cm	密度/(株·hm^{-2}) Density/(plant·ha^{-1})	胸径范围 DBH range/cm
LN	落叶松 *Larix olgensis*	14.90	9.25	1 933	4 ~ 18
LX	落叶松 *Larix olgensis*	26.28	11.08	2 094	4 ~ 26
LT	落叶松 *Larix olgensis*	22.75	12.59	1 522	4 ~ 26

注：LN.落叶松泥炭藓沼泽；LX.落叶松藓类沼泽；LT.落叶松苔草沼泽。下同。Notes: LN, *Larix olgensis-Sphagnum magellanicum* swamp; LX, *Larix olgensis*-moss swamp; LT, *Larix olgensis-Carex schmidtii* swamp. The same below.

表 2　长白山园池沿岸 6 种湿地土壤理化性质

Tab. 2　Soil physical and chemical properties of six wetland types along lakeshore in Yuanchi, Changbai Mountain

湿地类型 Wetland type	水位 Water level/cm	水位波动幅度 Water level fluctuation amplitude/cm	土壤温度 Soil temperature/℃	有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen/(g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus/(g·kg^{-1})
L	13.50 ± 1.94A	31.50± 1.00D	6.35± 0.25A	302.11 ± 22.13A	10.33 ± 0.49A	0.44 ± 0.01B
C	3.13 ± 1.82B	28.83± 0.57D	6.10 ± 0.14A	263.94 ± 8.68B	10.00 ± 0.37A	0.49 ± 0.06B
D	−18.67 ± 1.53C	45.33 ± 4.37BC	4.24 ± 0.11B	228.34 ± 14.46C	5.24 ± 0.26B	0.61 ± 0.10A
LN	−32.80 ± 2.73D	42.63 ± 2.97C	3.94 ± 0.26C	208.65 ± 14.42C	4.93 ± 0.97B	0.41 ± 0.03B
LX	−58.67 ± 1.52E	60.17 ± 5.11A	3.92 ± 0.06C	47.78 ± 5.89D	1.00 ± 0.08C	0.18 ± 0.04C
LT	−69.33 ± 1.39F	48.33 ± 5.61B	3.96 ± 0.09BC	55.81 ± 4.65D	1.17 ± 0.14C	0.21 ± 0.02C

注: 表中数据为平均值 ± 标准差; L.芦苇沼泽; C.草丛沼泽; D.杜香沼泽。不同大写字母表示不同湿地类型之间差异显著($P < 0.05$)。下同。Notes: data in the table are mean ± SD. L, *Phragmites australis* swamp; C, tussock swamp; D, *Ledum palustre* swamp. Different capital letters mean significant difference among different wetland types ($P < 0.05$). The same below.

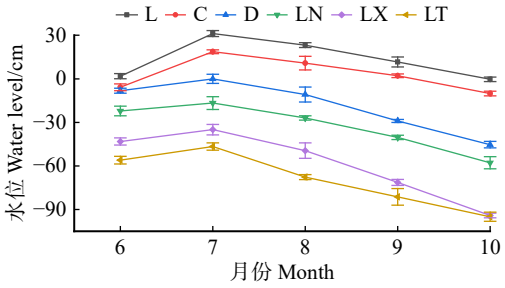


图 1　长白山园池沿岸 6 种湿地类型的水位变化情况

Fig. 1　Water level changes of six wetland types along lakeshore in Yuanchi, Changbai Mountain

白山区森林沼泽群落建群种落叶松相对生长方程[44], 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, 在每个标准地的中心和四角设置 5 个 2 m × 2 m 样方测定灌木层生物量, 并随机选择 10 个 1 m × 1 m 样方测定草本层生物量。在具体测定过程中, 分别对地上枝叶和地下根系进行生物量鲜质量测定, 并对枝叶和根系进行取样, 在 70 ℃ 下烘干至恒质量, 得到灌木层和草本层的生物量干质量。于秋季落叶前(10 月前), 在各样地中分别设置 5 个 50 cm × 50 cm 的样方, 收集其中全部凋落物装入封口袋, 带回实验室, 在 70 ℃ 下烘干至恒质量, 得到凋落物生物量的干质量。植被碳、氮储量的测定: 利用碳/氮分析仪 MultiN/C 3100 和 HT 1300 Soilds Module, 通过 1 300 ℃ 干烧法测定各层的有机碳含量, 采用间断分析仪 AQ400 测定各层全氮含量。最后, 将各组分的生物量分别乘以碳含量和氮含量, 可以得到乔木层、灌木层、草本层和凋落物层的碳储量和氮储量, 将 4 部分加和即可获得植被层的碳、氮储量。

1.2.3　土壤碳氮储量测定

在每个标准样地中心, 以“品”字形设置 3 个土壤剖面, 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^3)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 24 h 后, 测定其土壤密度; 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, 利用同上方法测定土壤有机碳含量和全氮含量, 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_i, kg/m^2)的计算公式[45]为

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i)/100$$

式中: C_i 为土壤有机碳含量(g/kg), D_i 为土壤密度(g/cm^3), E_i 为土层厚度(cm), G_i 为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%), i 为某一土层, t 为所有土层的总和。土壤剖面由 k 层组成, 那么该剖面的碳密度(SOC_t, kg/m²)如下, 并利用相同方法计算土壤全氮储量。

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

1.2.4　数据处理

数据使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用最小显著差异法(least significant difference, LSD)分析不同数据组间的差异性, 显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$。利用相关关系与多元逐步分析对生态系统组分碳氮储量与环境因子的关系进行分析, 并筛选主要因子, 使用 Origin 2023 进行制图。

2　结果和分析

2.1　园池沿岸沼泽湿地植被碳氮储量及其分配格局

园池湖岸至高地依次分布的 6 种沼泽类型的植被碳、氮储量存在显著差异(表 3)。植被碳储量分布在 2.17 ~ 69.98 t/hm^2 之间, 其中, 落叶松苔草沼泽和落叶松藓类沼泽(LT 和 LX)相对较高(显著高于其他 4

表 3 长白山园池沿湖岸至高地分布的 6 种湿地类型的植被碳氮储量

Tab. 3 Vegetation carbon and nitrogen storage of six wetland types along the environmental gradient from lakeshore to upland in Yuanchi, Changbai Mountain

指标 Index	层次 Layer	湿地类型 Wetland type					
		L	C	D	LN	LX	LT
生物量/(t·hm^{-2}) Biomass/(t·ha^{-1})	乔木层 Tree layer				71.49 ± 28.71B	135.28 ± 14.98A	141.72 ± 13.01A
	灌木层 Shrub layer			11.41 ± 2.00A	4.58 ± 1.61B	3.96 ± 1.17B	4.08 ± 1.46B
	草本层 Herb layer	4.14 ± 0.35A	5.57 ± 0.87A	2.35 ± 0.44B	3.46 ± 0.97B	3.40 ± 0.57B	3.28 ± 0.50B
	凋落物层 Litter layrt	1.09 ± 0.27C	1.62 ± 0.54B	1.71 ± 0.53B	2.89 ± 0.60A	2.61 ± 0.59A	2.98 ± 0.57A
	植被 Vegetation	5.24 ± 0.39E	7.18 ± 0.08D	15.47 ± 1.42C	82.42 ± 12.53B	145.24 ± 14.04A	152.05 ± 13.67A
碳含量 Carbon content/(g·kg^{-1})	乔木层 Tree layer				462.37 ± 4.16B	472.64 ± 7.78AB	479.51 ± 0.81A
	灌木层 Shrub layer			476.97 ± 5.59A	477.18 ± 6.10A	466.81 ± 6.65AB	463.56 ± 7.04B
	草本层 Herb layer	421.34 ± 3.00C	422.80 ± 5.84C	465.55 ± 15.65A	455.63 ± 6.48AB	457.46 ± 13.17A	445.52 ± 8.19B
	凋落物层 Litter layer	377.07 ± 6.32B	403.13 ± 8.41B	461.55 ± 11.49A	448.95 ± 16.30A	461.56 ± 34.09A	411.41 ± 37.01B
	植被 Vegetation	399.20 ± 1.83D	412.97 ± 6.92C	468.02 ± 0.19A	461.03 ± 3.31AB	464.62 ± 7.73A	450.00 ± 8.52B
碳储量/(t·hm^{-2}) Carbon storage/(t·ha^{-1})	乔木层 Tree layer				32.92 ± 7.73B	62.22 ± 6.75A	65.35 ± 5.95A
	灌木层 Shrubd layer			5.40 ± 0.87A	2.35 ± 1.01B	1.86 ± 0.55B	1.92 ± 0.70B
	草本层 Herb layer	1.75 ± 0.14B	2.36 ± 0.38A	1.11 ± 0.16C	1.74 ± 0.84B	1.56 ± 0.28BC	1.48 ± 0.24BC
	凋落物层 Litter layer	0.41 ± 0.06C	0.64 ± 0.19B	0.79 ± 0.22B	1.33 ± 0.09A	1.20 ± 0.31A	1.23 ± 0.30A
	植被 Vegetation	2.17 ± 0.16E	3.00 ± 0.04D	7.30 ± 0.62C	38.34 ± 5.92B	66.85 ± 2.37A	69.98 ± 7.63A
碳储量分配比 Carbon storage allocation/%	乔木层 Tree layer				85.10 ± 7.61	93.00 ± 1.27	93.37 ± 0.20
	灌木层 Shrub layer			73.72 ± 5.49	6.53 ± 3.91	2.83 ± 0.65	2.74 ± 0.27
	草本层 Herb layer	81.03 ± 1.08	78.51 ± 4.44	15.33 ± 3.42	4.85 ± 3.18	2.37 ± 0.60	2.10 ± 0.20
	凋落物层 Litter layer	18.97 ± 1.08	21.49 ± 4.44	10.95 ± 2.09	3.52 ± 0.59	1.80 ± 0.13	1.78 ± 0.45
氮含量 Nitrogen content/(g·kg^{-1})	乔木层 Tree layer				11.12 ± 0.47A	12.07 ± 0.26A	11.95 ± 0.76A
	灌木层 Shrub layer			12.63 ± 0.35B	14.33 ± 1.69B	17.60 ± 2.28A	15.55 ± 0.58AB
	草本层 Herb layer	9.71 ± 0.38BC	13.62 ± 0.09A	7.83 ± 0.28C	11.14 ± 2.55B	15.03 ± 1.37A	14.44 ± 0.46A
	凋落物层 Litter layer	12.62 ± 0.89B	15.78 ± 1.29A	17.52 ± 5.15A	10.84 ± 1.12B	10.73 ± 1.62B	13.72 ± 1.87AB
	植被 Vegetation	11.16 ± 0.26B	14.70 ± 0.67A	12.66 ± 1.57B	11.86 ± 0.83B	13.86 ± 1.23AB	13.91 ± 0.46AB
氮储量/(t·hm^{-2}) Nitrogen storage/(t·ha^{-1})	乔木层 Tree layer				0.340 ± 0.093B	0.735 ± 0.09A	0.802 ± 0.10A
	灌木层 Shrub layer			0.121 ± 0.02A	0.052 ± 0.02B	0.053 ± 0.02B	0.050 ± 0.02B
	草本层 Herb layer	0.044 ± 0.01B	0.081 ± 0.01A	0.018 ± 0.00C	0.044 ± 0.02B	0.049 ± 0.01B	0.047 ± 0.01B
	凋落物层 Litter layer	0.014 ± 0.01C	0.025 ± 0.01B	0.030 ± 0.01B	0.032 ± 0.00B	0.028 ± 0.01B	0.041 ± 0.01A
	植被 Vegetation	0.058 ± 0.01E	0.107 ± 0.00D	0.169 ± 0.01C	0.467 ± 0.06B	0.865 ± 0.08A	0.940 ± 0.11A
氮储量分配比 Nitrogen storage allocation/%	乔木层 Tree layer				71.75 ± 12.28	84.80 ± 2.51	85.24 ± 1.34
	灌木层 Shrub layer			71.57 ± 4.72	11.43 ± 5.30	6.19 ± 1.44	5.31 ± 0.28
	草本层 Herb layer	76.01 ± 0.86	76.26 ± 6.20	10.59 ± 2.00	9.95 ± 5.93	5.73 ± 1.40	5.05 ± 0.74
	凋落物层 Litter layer	23.99 ± 0.86	23.74 ± 6.20	17.84 ± 2.78	6.88 ± 1.06	3.27 ± 0.28	4.40 ± 1.10

种沼泽 0.8 ~ 31.2 倍，$P < 0.05$)；落叶松泥炭藓沼泽和杜香沼泽(LN 和 D)居于中等(显著高于其他 2 种沼泽 1.4 ~ 16.7 倍，且 LN 显著高于 D 4.3 倍)；芦苇沼泽和草丛沼泽(L 和 C)相对较低(且 C 显著高于 L 0.4 倍)。植被氮储量分布在 0.058 ~ 0.940 t/hm^2，也是 LT 和 LX 相对较高(显著高于其他 4 种沼泽 0.8 ~ 15.2 倍)；LN 和 D 居中(显著高于其他 2 种沼泽 0.6 ~ 7.0 倍，且 LN 显著高于 D 1.8 倍)；L 和 C 相对较低(且 C 显著高于 L 0.8 倍)。因此，长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地的植被碳储量和氮储量沿湖岸至高地水分环境梯度均呈递增规律性(LT ≈ LX > LN > D > C > L)，仅是碳储量递增幅度大于氮储量。

各沼泽类型植被碳、氮储量在垂直空间上的分配规律也不同，芦苇沼泽和草丛沼泽的碳、氮储量以草本层占优势地位(78.51% ~ 81.03% 和 76.01% ~ 76.26%)，而凋落物层占次要地位(18.97% ~ 21.49% 和 23.74% ~ 23.99%)；杜香沼泽的碳、氮储量以灌木层占优势地位(73.72% 和 71.57%)，草本层和凋落物层占比较低(26.28% 和 28.43%)；而 3 种森林沼泽(LN、LX 和 LT)碳、氮储量均以乔木层占优势(85.10% ~ 93.37% 和 71.75% ~ 85.24%)，灌木层、草本层和凋落物层占比较低(6.63% ~ 14.90% 和 14.76% ~ 28.25%)。因此，园池沿岸沼泽湿地的植被碳、氮储量存在明显的垂直空间分异规律性(即沿水分环境梯度依次分布的草类沼泽(L 和 C)、灌丛沼泽(D)和森林沼泽(LN、LX 和 LT)的碳、氮储量均

以优势植被层占主体地位)。

2.2　园池沿岸沼泽湿地土壤碳氮储量及其分配格局

园池沿湖岸至高地水分环境梯度依次分布的 6 种沼泽类型的土壤碳、氮储量存在显著差异(表 4)。土壤碳储总量分布在 67.45 ~ 243.21 t/hm^2 之间, 其中, 芦苇沼泽(L)和草丛沼泽(C)相对较高(显著高于其他 4 种沼泽 0.5 ~ 2.6 倍, 且 L 显著高于 C 0.4 倍, $P < 0.05$); 杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽居于中等(两者相近且显著高于其他 2 种沼泽 0.5 ~ 0.7 倍); 而落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽相对较低且相近。其土壤氮储量分布在 2.26 ~ 13.53 t/hm^2, 也是 L 和 C 相对较高(显著高于其他 4 种沼泽 2.0 ~ 4.5 倍, 且 L 显著高于 C 0.2 倍); D 和 LN 居中等(两者相近且显著高于其他 2 种沼泽 0.5 ~ 0.8 倍); 而 LX 和

表 4　长白山园池沿湖岸至高地分布的 6 种湿地类型的土壤碳氮储量

Tab. 4　Soil carbon and nitrogen storage of six wetland types along the environmental gradient from lakeshore to upland in Yuanchi, Changbai Mountain

指标 Index	土层深度 Soil depth/cm	湿地类型 Wetland type					
		L	C	D	LN	LX	LT
土壤密度 Bulk density/(g·cm^{-3})	0 ~ 10	0.14 ± 0.01Bd	0.14 ± 0.01Bd	0.10 ± 0.01Cd	0.14 ± 0.02Bc	0.74 ± 0.07Aa	0.66 ± 0.08Aa
	10 ~ 20	0.14 ± 0.01Dde	0.15 ± 0.01Dd	0.33 ± 0.03Cc	0.40 ± 0.06Bb	0.75 ± 0.08Aa	0.78 ± 0.06Aa
	20 ~ 30	0.14 ± 0.04De	0.32 ± 0.05Cc	0.66 ± 0.06Ba	0.60 ± 0.03Ba	0.72 ± 0.03ABa	0.78 ± 0.07Aa
	30 ~ 40	0.49 ± 0.04Bc	0.55 ± 0.10ABb	0.52 ± 0.04Bb	0.47 ± 0.12Bab	0.69 ± 0.05Aa	0.67 ± 0.11Aa
	40 ~ 50	0.91 ± 0.04Aa	0.78 ± 0.03Ba				
	50 ~ 60	0.58 ± 0.03Ab	0.60 ± 0.03Ab				
	60 ~ 70	0.49 ± 0.02c					
	平均值 Mean	0.41 ± 0.01B	0.42 ± 0.01B	0.40 ± 0.01B	0.40 ± 0.01B	0.72 ± 0.01A	0.72 ± 0.01A
碳含量 Carbon content/(g·kg^{-1})	0 ~ 10	344.50 ± 47.70ABa	350.70 ± 11.42Ab	319.80 ± 14.35ABa	310.15 ± 23.15Ba	60.86 ± 6.39Ca	78.09 ± 7.42Ca
	10 ~ 20	346.38 ± 21.23Ba	386.70 ± 4.94Aa	158.94 ± 20.96Cb	143.29 ± 23.10Cb	25.24 ± 4.15Db	23.03 ± 4.37Db
	20 ~ 30	349.60 ± 11.96Aa	125.43 ± 19.16Bc	41.73 ± 9.89Cc	22.15 ± 2.24Cc	14.34 ± 4.80Cc	18.42 ± 2.21Cb
	30 ~ 40	112.59 ± 13.90Ab	25.47 ± 4.33Bd	9.33 ± 1.61Cd	8.52 ± 1.83Cc	10.43 ± 1.69Cc	9.95 ± 1.36Cc
	40 ~ 50	38.55 ± 12.56Ac	17.45 ± 5.46Bde				
	50 ~ 60	21.07 ± 2.68Ad	12.86 ± 1.48Be				
	60 ~ 70	13.97 ± 2.92e					
	平均值 Mean	175.24 ± 12.84A	153.10 ± 5.04A	132.45 ± 8.38B	121.03 ± 8.36C	27.72 ± 3.41D	32.37 ± 2.69D
碳储量/(t·hm^{-2}) Carbon storage/(t·ha^{-1})	0 ~ 10	46.07 ± 3.09ABa	46.89 ± 0.37ABb	32.92 ± 3.67Cb	40.71 ± 4.55Bb	37.15 ± 2.54BCa	48.10 ± 2.85Aa
	10 ~ 20	46.97 ± 7.27Ba	54.75 ± 2.62Aa	53.75 ± 7.95Aa	53.92 ± 1.03Aa	16.52 ± 5.22Cb	11.53 ± 0.93Cb
	20 ~ 30	49.09 ± 2.95Aa	39.44 ± 6.36Ac	25.25 ± 8.05Bc	10.80 ± 1.46Cc	8.13 ± 2.37Dc	9.62 ± 1.01Cb
	30 ~ 40	54.39 ± 7.67Aa	13.40 ± 1.57Bd	2.98 ± 0.80Dd	2.61 ± 0.35Dd	5.64 ± 1.69Cd	4.84 ± 1.38Cc
	40 ~ 50	31.97 ± 9.48Ab	11.80 ± 3.41Bd				
	50 ~ 60	10.59 ± 0.82Ac	5.11 ± 0.75Be				
	60 ~ 70	4.14 ± 0.81Ad					
	总计 Total	243.21 ± 24.43A	171.39 ± 9.93B	114.90 ± 4.60C	108.03 ± 3.71C	67.45 ± 5.28D	74.08 ± 2.62D
氮含量 Nitrogen content/(g·kg^{-1})	0 ~ 10	22.92 ± 0.64Aa	23.45 ± 1.37Aa	12.78 ± 0.69Ba	12.73 ± 1.47Ba	2.59 ± 0.06Ca	3.30 ± 0.67Ca
	10 ~ 20	19.82 ± 1.17Ba	25.12 ± 1.37Aa	5.82 ± 1.42Cb	5.11 ± 0.78Cb	0.59 ± 0.12Eb	0.70 ± 0.07Db
	20 ~ 30	20.92 ± 0.79Aa	6.79 ± 0.77Bb	1.09 ± 0.03Cc	1.32 ± 0.19Cc	0.41 ± 0.10Db	0.36 ± 0.05Dc
	30 ~ 40	5.75 ± 0.54Ab	2.50 ± 1.94Bc	0.93 ± 0.26Cc	0.55 ± 0.14Dc	0.38 ± 0.09Db	0.33 ± 0.03Dc
	40 ~ 50	1.52 ± 0.01Ac	1.33 ± 0.53Ac				
	50 ~ 60	1.05 ± 0.14Ad	0.85 ± 0.21Bc				
	60 ~ 70	0.88 ± 0.16e					
	平均值 Mean	10.41 ± 0.31A	10.01 ± 0.37A	5.16 ± 0.49B	4.93 ± 0.49B	1.00 ± 0.02C	1.17 ± 0.14C
氮储量/(t·hm^{-2}) Nitrogen storage/(t·ha^{-1})	0 ~ 10	3.07 ± 0.05Aa	3.13 ± 0.12Aa	1.31 ± 0.22Cb	1.66 ± 0.11Cb	1.60 ± 0.28Ca	2.04 ± 0.41Ba
	10 ~ 20	2.69 ± 0.29Ba	3.56 ± 0.30Aa	1.94 ± 0.34Ca	1.93 ± 0.22Ca	0.39 ± 0.13Db	0.35 ± 0.03Db
	20 ~ 30	2.94 ± 0.16Aa	2.14 ± 0.27Bb	0.65 ± 0.06Cc	0.64 ± 0.11Cc	0.24 ± 0.06Db	0.19 ± 0.02Dc
	30 ~ 40	2.77 ± 0.07Aa	1.27 ± 0.82Bc	0.29 ± 0.08Cd	0.18 ± 0.09Cd	0.20 ± 0.20Cb	0.16 ± 0.04Cc
	40 ~ 50	1.27 ± 0.07Ab	0.90 ± 0.34Acd				
	50 ~ 60	0.53 ± 0.05Ac	0.34 ± 0.08Bd				
	60 ~ 70	0.26 ± 0.06d					
	总计 Total	13.53 ± 0.28A	11.33 ± 1.17B	4.20 ± 0.34C	4.42 ± 0.08C	2.44 ± 0.20D	2.74 ± 0.46D

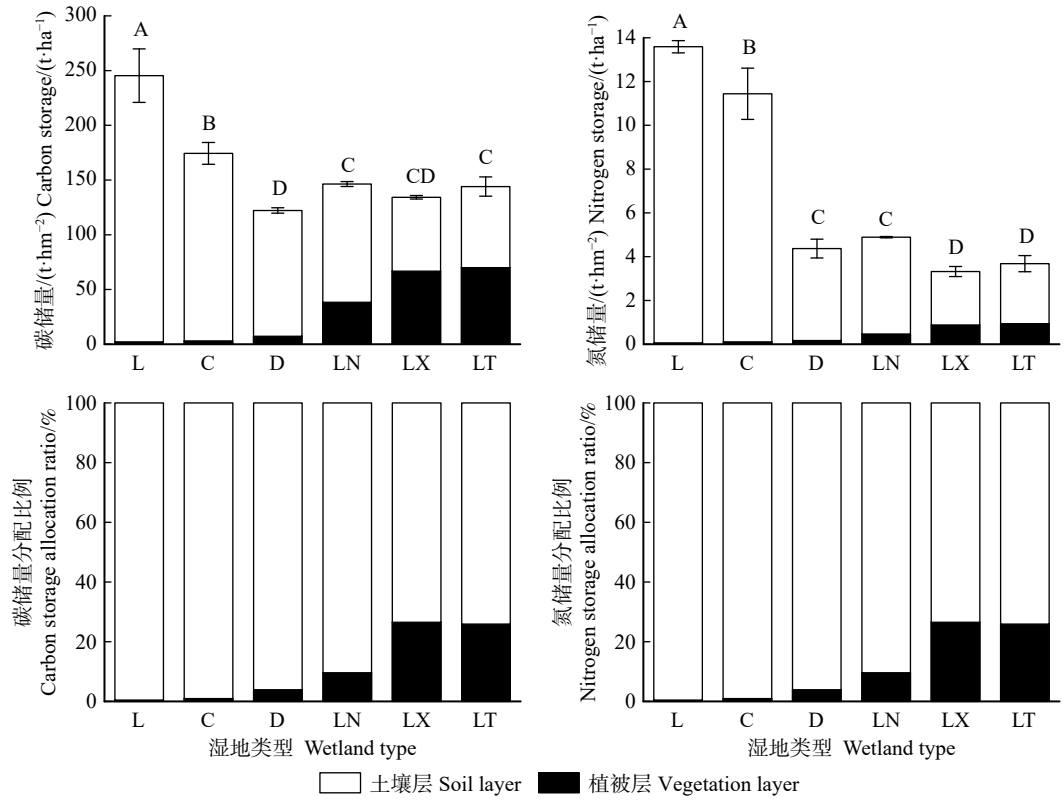
注: 不同小写字母表示相同湿地类型内各土层间差异显著($P < 0.05$)。Note: different lowercase letters indicate significant differences among soil layers within the same wetland types ($P < 0.05$).

LT 相对较低且相近。因此，园池沿岸沼泽湿地的土壤碳、氮储量沿湖岸至高地水分环境梯度总体上均呈阶梯式递减规律性（L > C > D ≈ LN > LX ≈ LT），且氮储量降低幅度要大于碳储量。

各沼泽类型土壤碳、氮储量的垂直分布格局也不同。芦苇沼泽可分为 7 个土壤层（按 10 cm 划分），草丛沼泽可分为 6 层，而其他沼泽可分为 4 层。并且土壤碳储量随土壤深度增加的变化趋势也不同。芦苇沼泽土壤碳储量在 0 ~ 40 cm 土壤层较高，而后各层依次递减，呈先恒定后递减的变化趋势；草丛沼泽土壤碳储量在 0 ~ 30 cm 较高（10 ~ 20 cm 层最高），而后各层依次递减，呈先增后降趋势；杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽则在 0 ~ 20 cm 土壤层碳储量较高（10 ~ 20 cm 层最高），而后各层依次递减，两者也呈先增后降趋势；而落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽仅在 0 ~ 10 cm 土壤层碳储量较高，而后各层依次递减，呈递减趋势。同时，这 6 种沼泽中有 4 种（L、D、LN 和 LT）土壤氮储量的垂直分布格局与其土壤碳储量相一致，仅草丛沼泽和落叶松藓类沼泽土壤氮储量的垂直分布格局与其碳储量略有不同，草丛沼泽土壤氮储量呈先恒定后递减型，落叶松藓类沼泽呈上层高其他层低且恒定型。因此，园池沿岸 6 种沼泽类型土壤碳、氮储量垂直分布格局分别存在 3 种类型（先恒定后递减型（L）、先增后降型（C、D 和 LN）和递减型（LX 和 LT））和 4 种类型（先恒定后递减型（L 和 C）、先增后降型（D 和 LN）、先高后降且恒定型（LX）和递减型（LT））。

2.3 园池沿岸沼泽湿地生态系统碳氮储量及其分配格局

园池沿岸 6 种沼泽类型的生态系统碳、氮储量同样存在显著差异性（图 2）。生态系统碳储量分布在 122.20 ~ 245.38 t/hm^2 之间，其中，芦苇沼泽最高（显著高于其他 5 种沼泽 0.4 ~ 1.0 倍，$P < 0.05$）；草丛沼泽较高（显著高于其他 4 种沼泽 0.2 ~ 0.4 倍）；3 种森林沼泽（LN、LX 和 LT）居中等（LN 和 LT 显著高于 D 17.9% ~ 19.7%，$P < 0.05$；LX 略高于 D 9.8%，$P > 0.05$）；而杜香沼泽则最低。其生态系统氮储量分布在 3.31 ~ 13.58 t/hm^2，其中，芦苇沼泽和草丛沼泽相对较高（两者显著高于其他 4 种沼泽 1.3 ~ 3.1 倍，且 L 显著高于 C 0.2 倍）；杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽居于中等（两者显著高于其他 2 种沼泽 0.2 ~ 0.5 倍）；而落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽则最低。因此，长白山园池沿岸沼泽湿地的生态系统碳储量沿湖岸至高地水分环境梯度呈先降低后升高且恒定的变化规律性，而其生态系统氮储量却呈阶梯式递减规律性。



不同大写字母表示不同湿地生态系统碳氮储量差异显著（$P < 0.05$）。Different capital letters mean significant difference between wetland types of environmental carbon and nitrogen storage ($P < 0.05$).

图 2 长白山园池沿湖岸至高地环境梯度生态系统碳、氮储量及其分配

Fig. 2 Carbon and nitrogen storage and distribution along the environmental gradient from lakeshore to upland inYuanchi, Changbai Mountain

同时，各沼泽类型的生态系统碳、氮储量分配格局也不同。芦苇沼泽和草丛沼泽的生态系统碳、氮储量均以土壤占绝对优势地位（98.3% ~ 99.1% 和 99.1% ~ 99.6%），植被仅占极次要地位；杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽仍以土壤占优势（73.9% ~ 94.0% 和 90.4% ~ 96.1%），但植被碳、氮储量占比却有所增大；而落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽的生态系统碳储量和氮储量分配格局明显不同，两者的生态系统碳储量为土壤和植被占比相近（50.3% ~ 51.5% 和 48.5% ~ 49.7%），生态系统氮储量却以土壤占优势（73.5% ~ 74.1%），植被氮储量占比约为 1/4（25.9% ~ 26.5%）。因此，园池沿岸 6 种沼泽类型的生态系统碳、氮储量分配格局沿湖岸至高地水分环境梯度呈现出土壤碳、氮储量占比呈递减规律性，而植被碳、氮储量占比却呈递增规律性。

2.4　园池沿岸沼泽湿地生态系统碳氮储量的主控因子

园池沿岸 6 种沼泽类型的生态系统碳、氮储量主控因子不同（表 5）。处于湖岸至高地环境梯度下部生境地段上的芦苇沼泽和草丛沼泽的生态系统碳储量主要受水位促进（可解释其变差的 91.7%）；中部生境地段上杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽的生态系统碳储量主要受水位抑制（88.2%）；处于上部生境地段上落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽的生态系统碳储量主要受水位波动幅度抑制（65.1%）。因此，

表 5　不同生境下湿地碳氮储量与环境因子的逐步多元线性回归分析

Tab. 5　Stepwise multiple linear regression analysis of carbon and nitrogen storage and environment factors of wetlands in different habitats

生境类型 Habitat type	指标 Index	水位 Water level	水位波动幅度 Water level fluctuation amplitude	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	截距 Intercept	R^2	P	F
下部生境（长期水淹生境，L和C） Lower habitat (permanently flooded habitat, L and C)	植被碳储量 Vegetation carbon storage	−0.075**					3.205***	0.869	< 0.01	34.033
	土壤碳储量 Soil carbon storage	6.975**					149.304***	0.920	< 0.01	58.127
	生态系统碳储量 Ecosystem carbon storage	6.900**					152.509***	0.917	< 0.01	56.017
中部生境（季节性水淹生境，D和LN） Intermediate habitat (seasonally flooded habitat, D and LN)	植被碳储量 Vegetation carbon storage	−2.010**					−28.899 +	0.813	< 0.01	22.743
	土壤碳储量 Soil carbon storage					38.798**	91.644***	0.847	< 0.01	28.616
	生态系统碳储量 Ecosystem carbon storage	−1.616**					92.705***	0.882	< 0.01	38.400
上部生境（无积水生境，LX和LT） Upper habitat (no standing water habitat, LX and LT)	植被碳储量 Vegetation carbon storage					135.469*	41.533*	0.804	< 0.05	21.459
	土壤碳储量 Soil carbon storage			0.734*			32.768*	0.894	< 0.05	19.600
	生态系统碳储量 Ecosystem carbon storage		−0.848*				185.136***	0.651	< 0.05	10.336
下部生境（长期水淹生境，L和C） Lower habitat (permanently flooded habitat, L and C)	植被氮储量 Vegetation nitrogen storage	−0.04**					0.118***	0.869	< 0.01	34.286
	土壤氮储量 Soil nitrogen storage	0.221*					10.592***	0.809	< 0.05	22.216
	生态系统氮储量 Ecosystem nitrogen storage	0.217*					10.710***	0.800	< 0.05	21.047
中部生境（季节性水淹生境，D和LN） Intermediate habitat (seasonally flooded habitat, D and LN)	植被氮储量 Vegetation nitrogen storage	−0.20**					−0.186 +	0.837	< 0.05	26.586
	土壤氮储量 Soil nitrogen storage		−0.078**	0.007*			6.050**	0.963	< 0.05	65.463
	生态系统氮储量 Ecosystem nitrogen storage		−0.088*				8.418**	0.760	< 0.05	16.820
上部生境（无积水生境，LX和LT） Upper habitat (no standing water habitat, LX and LT)	植被氮储量 Vegetation nitrogen storage					1.802*	0.551**	0.721	< 0.01	13.894
	土壤氮储量 Soil nitrogen storage				2.335*		0.056	0.680	< 0.05	11.646
	生态系统氮储量 Ecosystem nitrogen storage				2.239*		1.068	0.697	< 0.05	12.506

注：+表示在$P < 0.1$水平上显著；*表示在$P < 0.05$水平上显著；**表示在$P < 0.01$水平上显著；***表示在$P < 0.001$水平上显著。Notes: + indicates significance at $P < 0.1$ level; * indicates significance at $P < 0.05$ level; ** indicates significance at $P < 0.01$ level; *** indicates significance at $P < 0.001$ level.

园池沿岸沼泽湿地生态系统碳储量的主控因子沿湖岸至高地水分环境梯度发生了有规律性的变化(下部生境地段的水位促进、中部的水位抑制和上部的水位波动幅度抑制)。

同时，下部生境地段上的芦苇沼泽和草丛沼泽的生态系统氮储量主要受水位所促进(80.0%)；中部生境地段上杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽的生态系统氮储量主要受水位波动幅度所抑制(76.0%)；上部生境地段上落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽的生态系统氮储量主要受土壤全氮所促进(69.7%)。因此，园池沿岸沼泽湿地生态系统氮储量的主控因子沿湖岸至高地水分环境梯度同样发生了有规律性的变化(下部的水位促进、中部的水位波动幅度抑制和上部的土壤全氮促进)。

3 结论与讨论

3.1 湖泊沿岸沼泽湿地的植被碳氮储量

温带长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地的植被碳、氮储量沿湖岸至高地水分环境梯度呈递增规律，这与寒温带大兴安岭森林沼泽[46]和温带长白山低海拔区森林沼泽[47]的植被碳储量沿过渡带呈递增规律一致。

由于微地形改变了湿地水文状况，引起植物群落类型沿环境梯度过渡性分布，进而影响湿地植物生长、生物量积累和碳固定[20−22]。园池湖岸至高地同样存在着微地形引起的水分环境梯度(生长季平均水位由 13.5 cm(−0.3 ~ 31.2 cm)逐渐降低至−69.3 cm (−95.0 ~ −46.7 cm))(表 2 和图 1)，植物长期适应该水分环境，形成了沿水分环境梯度依次出现的芦苇沼泽、草丛沼泽、杜香沼泽、落叶松泥炭藓沼泽、落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽的植被分布格局。其中，L 和 C 长期处于水淹状态，限制了乔木和灌木的生存，群落结构不完整，故导致两者的生物量及碳氮储量较低；随着微地形升高，水位逐渐下降，灌木成为群落优势种，使其生物量和碳氮储量得到提高；随着微地形进一步升高，水位降低，3 种森林沼泽的群落结构趋于完整(乔、灌和草)，生物量积累更高，但因 LN 积水程度较重，落叶松生长缓慢(平均胸径仅 9.25 cm)(表 1)，其植被碳氮储量显著低于 LX 和 LT。故园池湖岸沼泽湿地的植被碳、氮储量呈递增趋势。此外，由于植被各器官在生长过程中对氮的需求和利用不同[48−49]，使其乔木层氮储量在植被层的占比低于其碳储量占比，故导致植被碳储量沿环境梯度递增幅度大于其氮储量。

长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地植被碳储量(2.17 ~ 66.98 t/hm^2)要低于同区低海拔森林沼泽(3.18 ~ 112.16 t/hm^2)[47]，但与寒温带森林沼泽(3.60 ~ 62.18 t/hm^2)[50]相近，且 3 种森林沼泽的植被碳储量(38.34 ~ 66.98 t/hm^2)与北方森林(40.0 ~ 64.0 t/hm^2)[51]相近，而其他 3 种沼泽类型(2.17 ~ 7.30 t/hm^2)则远低于其下限值；植被氮储量(0.06 ~ 0.94 t/hm^2)沿水分环境梯度呈递增趋势，处于环境梯度中下部生境的草类沼泽和灌丛沼泽(0.06 ~ 0.17 t/hm^2)远低于全球植被平均氮储量估计值(0.50 t/hm^2)[52]，而处于中上部生境的 3 种森林沼泽(0.47 ~ 0.94 t/hm^2)一般要高于全球植被平均氮储量估计值[52](LX 和 LT 高出 73.0% ~ 88.0%，仅 LN 与其相近)，也是 3 种森林沼泽氮储量相对较高。故园池沿岸各沼泽类型中森林沼泽的植被固碳、氮能力相对较强。

3.2 湖泊沿岸沼泽湿地土壤碳氮储量

长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地的土壤碳、氮储量沿湖岸至高地环境梯度呈阶梯式递减规律。这与长白山森林沼泽[47]、大兴安岭森林沼泽[46]、青藏高原湿地[53]以及温带干旱区湖泊湿地[40]沿低地至高地水分环境梯度总体上呈递减趋势不同。

这主要源于微地形改变了土壤水文状况和植被优势种分布[26]，控制了湿地土壤有机物的输入和输出，进而影响湿地土壤碳积累[30]。芦苇沼泽(L)和草丛沼泽(C)长期处于水淹状态(生长季平均水位 13.5 cm 和 3.1 cm)(表 2)，土壤以厌氧反应空间占绝对优势，抑制了微生物对土壤的分解和矿化作用，有利于泥炭形成，进而增加了土壤有机碳、氮的积累[54−56]；杜香沼泽(D)和落叶松泥炭藓沼泽(LN)因所处生境地势升高，生长季水位降低(−18.7 cm 和 −32.8 cm)，有氧反应空间和时间增加，有机碳和氮的分解速率加快[57]，形成的泥炭层较薄(20 cm)且相近，故两者的土壤碳、氮储量居中等水平；而落叶松藓类沼泽(LX)和落叶松苔草沼泽(LT)所处地势最高，生长季水位较低(−58.7 cm 和−69.3 cm)，土壤中有氧反应空间占绝对优势，加速了土壤有机碳和氮分解[57]，仅在土壤上部形成泥炭层(10 cm)，使两者土壤碳、氮储量较低且相近。因此，园池沿岸沼泽湿地土壤碳、氮储量沿湖岸至高地环境梯度呈阶梯式递减趋势。

至于湖岸沼泽湿地土壤碳氮储量垂直空间分布格局存在多种类型的原因，也源于各沼泽类型在水分环境梯度上所处的位置不同，芦苇沼泽(L)积水较深，且水淹时间长，上部泥炭几乎不受有氧环境干扰，使其上部土壤的碳、氮储量较高且恒定，而下部土壤层随着深度增加，有机物输入逐渐减少，土壤碳氮储量也逐层递减，故呈先恒定后递减型分布；草丛沼泽(C)、杜香沼泽(D)和落叶松泥炭藓沼泽(LN)

因所处生境积水逐渐变浅，水淹时间变短，且水位波动比较明显，表层泥炭经常处于有氧/厌氧环境之间的转换，使得表层泥炭分解加快，碳氮储量降低，故三者土壤碳氮储量呈先增后递减型分布；而落叶松藓类沼泽（LX）和落叶松苔草沼泽（LT）因地表已无积水环境，且水位波动主要发生在土壤深层，故两者土壤碳、氮储量随土壤深度呈递减型分布。

本研究发现长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地土壤碳储量（67.45 ~ 243.21 t/hm^2）低于该区低海拔区森林沼泽（296.3 ~ 824.5 t/hm^2）[47]，但与我国东北地区平均土壤碳储量（105 t/hm^2）[58]相比，芦苇沼泽和草丛沼泽提高了 63.2% ~ 131.6%，杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽略高 2.9% ~ 9.4%，而两种森林沼泽（LX 和 LT）则降低了 41.7% ~ 55.7%；土壤氮储量（2.44 ~ 13.53 t/hm^2）与全球土壤平均氮储量（9.41 t/hm^2）[52]相比，芦苇沼泽和草丛沼泽提高了 20.4% ~ 43.8%，而其他 4 种沼泽类型则降低了 53.0% ~ 74.1%。这是因为相比于大部分地区的土层深度（0 ~ 100 cm），中、上生境地段的 4 种沼泽的土壤发育时间周期短，土层深度明显更低（0 ~ 40 cm），导致其土壤碳氮储存能力相对较弱。而芦苇沼泽和草丛沼泽土层深度尽管也较低（0 ~ 70 cm），但由于其厌氧环境充足，有利于泥炭形成，因此它们的土壤碳氮储存能力相对较强。

3.3　湖泊沿岸沼泽湿地生态系统碳氮储量

长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地生态系统碳储量沿水分环境梯度呈先降再升后恒定型分布，这明显不同于寒温带大兴安岭森林沼泽[46]和同区低海拔森林沼泽[47]生态系统碳储量沿过渡带环境梯度呈恒定型或递减型分布；而生态系统氮储量沿水分环境梯度呈阶梯式递减型分布。

生态系统碳储量沿水分环境梯度的变化主要归因于微地形对湿地水文状况的调控，进而影响了植物群落建立和分布。这种影响不仅体现在湿地植被的生物量积累和碳固定[20−22]，还显著作用于湿地土壤有机物的输入和输出及土壤的碳积累[30−31]。此外，生态系统碳储量沿过渡带的变化趋势取决于植被碳储量和土壤碳储量两者沿环境梯度递变趋势的权衡，同时受到微地形坡度大小的影响[46−47]。大兴安岭森林沼泽，地势坡度相对平缓（4° ~ 5°），土壤碳储量递减趋势与植被碳储量递增趋势相近，使得生态系统碳储量呈恒定型分布[46−47]。而在长白山森林沼泽，地势坡度相对较大（8° ~ 10°），土壤碳储量递减趋势大于植被碳储量递增趋势，加之生态系统碳储量以土壤占优势，因此生态系统碳储量沿过渡带呈递减趋势[46−47]。尽管本研究中的长白山高海拔园池沿岸沼泽湿地地势坡度也相对较缓（3° ~ 4°），但其生态系统碳储量沿湖岸至高地水分环境梯度变化趋势却兼有上述两种特征（下半段递减及上半段恒定）。这主要因为下半段的 3 种沼泽（芦苇沼泽、草丛沼泽和杜香沼泽）受湖泊水位波动影响强烈，厌氧反应空间不断减少且持续时间逐渐变短，导致泥炭层明显变薄，土壤碳储量的递减趋势明显大于植被碳储量的递增趋势，从而使得下半段的生态系统碳储量呈递减趋势。而处于上半段的 3 种森林沼泽因地势相对较高，受水位波动影响较小，土壤碳储量递减趋势与植被碳储量递增趋势相近，因此 3 种森林沼泽的生态系统碳储量保持相对恒定。此外，本研究还发现，长白山高海拔园池沿岸沼泽湿地生态系统氮储量沿环境梯度变化规律与其碳储量不同。这是因为氮在植被生物量中的占比远低于碳[48−49]，植被的氮存储能力相对较弱，导致土壤碳储量在生态系统氮储量中占主导地位。因此，生态系统氮储量沿环境梯度呈阶梯式递减特征。综上所述，园池沿岸湿地生态系统碳、氮储量沿湖岸至高地的水分环境梯度空间分异，主要由微地形引起的水位梯度和植被类型分布共同控制，进而影响各生境地段的碳氮积累过程。

长白山高海拔区园池沿岸沼泽湿地生态系统碳储量（122.20 ~ 245.38 t/hm^2）与北方森林生态系统碳储量（125 ~ 149 t/hm^2）相近[51]，其中芦苇沼泽和草丛沼泽较大幅度高于其上限值（15.0% ~ 64.7%）。此外，与全球陆地生态系统的平均氮储量（9.91 t/hm^2）[52]相比，芦苇沼泽和草丛沼泽（11.44 ~ 13.58 t/hm^2）提高了 15.4% ~ 37.0%，而其他沼泽类型则有较大幅度降低（53.3% ~ 64.9%）。相比于其他地区的湿地类型，园池沿岸各沼泽类型的土壤层深度更低。因此，园池沿岸这 6 种沼泽类型中仅有芦苇沼泽和草丛沼泽在生态系统尺度上的碳、氮存储能力相对较强，在湖泊湿地碳汇管理中应重点加以保护。

3.4　湖泊沿岸沼泽湿地生态系统各组分碳氮储量的主控因子

园池沿岸沼泽湿地生态系统碳、氮储量的主控因子沿湖岸至高地水分环境梯度发生转换。在环境梯度下部生境地段，芦苇沼泽和草丛沼泽长期处于水淹环境，生态系统碳储量以土壤碳储量占绝对优势，且水位越深土壤有机质分解越缓慢，有利于土壤碳的积累[53−55]，故其生态系统碳储量受水位所促进；在中部生境地段，杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽处于季节性水淹环境，土壤碳储量相近，生态系统碳储量的差异性主要来自于植被碳储量，而后者受水位所抑制（群落结构完整性不同），故其生态系统碳储

量受水位抑制；在上部生境地段，由于落叶松苔草沼泽和落叶松藓类沼泽处于非水淹环境（水位波动发生在地下），且两者生态系统碳储量中土壤和植被占比相近，又因为植被碳储量受土壤全磷含量促进（磷为植物生长限制性营养元素可促进植物生长[59−60]），土壤碳储量受土壤有机质促进（既是土壤碳储量主要来源，也能提高植物生产力及增加土壤碳输入[61]），当水位波动幅度增大，一方面增加了有氧反应空间，促进有机质分解[62]，导致土壤有机质含量降低。另一方面，土壤淋溶作用增强，也会导致土壤磷的损失（表 2），故水位波动幅度抑制了其生态系统碳储量。

此外，园池沿岸沼泽生态系统氮储量的主控因子与碳储量不同。处于下部生境地段上芦苇沼泽和草丛沼泽的生态系统氮储量受水位促进，且影响机制与其碳储量相同。在中部生境地段上杜香沼泽和落叶松泥炭藓沼泽，生态系统氮储量受水位波动幅度的抑制，这可能是因为水位波动幅度增大，导致上部土壤颗粒物质随淋溶损失较大，土壤密度降低（表 4），从而导致土壤氮储量降低，进而降低生态系统氮储量。在上部生境地段上落叶松藓类沼泽和落叶松苔草沼泽，生态系统氮储量受土壤全氮促进，源于其生态系统氮储量以土壤氮储量占优势，且土壤全氮又是土壤氮储量的主要来源，故两者的生态系统氮储量取决于土壤氮含量。因此，园池沿岸沼泽湿地生态系统碳、氮储量沿湖岸至高地水分环境梯度的空间分异主控因子略有不同，其生态系统碳储量主要受水文状况（水位或水位波动幅度）控制，而氮储量则同时受水文状况（水位或水位波动幅度）和土壤特性的控制。

参 考 文 献

[1] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock[J]. Current Science, 2005, 88(1): 25−35.

[2] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, et al. Wetlands, carbon, and climate change[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 583−597.

[3] Koehler A N N K, Sottocornola M, Kiely G. How strong is the current carbon sequestration of an Atlantic blanket bog?[J]. Global Change Biology, 2011, 17(1): 309−319.

[4] Dayathilake D, Lokupitiya E, Wijeratne V. Estimation of soil carbon stocks of urban freshwater wetlands in the Colombo Ramsar Wetland City and their potential role in climate change mitigation[J]. Wetlands, 2021, 41: 1−10.

[5] Abegaz A, Winowiecki L A, Vågen T G, et al. Spatial and temporal dynamics of soil organic carbon in landscapes of the upper Blue Nile Basin of the Ethiopian Highlands[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 218: 190−208.

[6] Xie E, Zhang Y, Huang B, et al. Spatiotemporal variations in soil organic carbon and their drivers in southeastern China during 1981−2011[J/OL]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104763. [2020−08−22]. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104763.

[7] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. Ecological Applications, 1991, 1(2): 182−195.

[8] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: prospects and significance for Canada[J]. Wetlands, 2000, 20(4): 605−615.

[9] Anderson N J, D'andrea W, Fritz S C. Holocene carbon burial by lakes in SW greenland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(11): 2590−2598.

[10] Bills J S, Jacinthe P A, Tedesco L P. Soil organic carbon pools and composition in a wetland complex invaded by reed canary grass[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46: 697−706.

[11] Cotrufo M F, Lavallee J M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: a synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration[J]. Advances in Agronomy, 2022, 172: 1−66.

[12] Wang M L, Lai J P, Hu K T, et al. Compositions and sources of stable organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2014, 34(4): 1019−1025.

[13] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, et al. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments[J]. Nature, 2010, 466: 478−481.

[14] Keiliweit M, Wanzek T, Kleber M, et al. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization[J/OL]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1771 [2023−01−19]. https://www.nature.com/articles/s41467-017-01406-6.

[15] Li J, Wen Y, Zhou Q, et al. Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4990−4996.

[16] Dai E F, Zhai R X, Ge Q S, et al. Detecting the storage and change on topsoil organic carbon in grasslands of Inner Mongolia from 1980s to 2010s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(6): 1035−1046.

[17] Chen X, Yang X, Dong X, et al. Nutrient dynamics linked to hydrological condition and anthropogenic nutrient loading in Chaohu Lake (southeast China)[J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1): 223−234.

[18] Iacob O, Rowan J S, Brown I, et al. Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective[J]. Hydrology Research, 2014, 45(6): 774−787.

[19] Carlson M M L, Wilcox D A, Wiley M J. Hydrogeology and landform morphology affect plant communities in a Great Lakes ridge-and-swale wetland complex[J]. Wetlands, 2020, 40(6): 2209−2224.

[20] Shipley B, Keddy P A, Lefkovitch L P. Mechanisms producing plant zonation along a water depth gradient: a comparison with the exposure gradient[J]. Canadian Journal of Botany, 1991,

69(7): 1420−1424.

[21] Qi Q, Zhang D, Zhang M, et al. Hydrological and microtopographic effects on community ecological characteristics of *Carex schmidtii* tussock wetland[J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: 146630.

[22] Liu Y, Wang L, Liu H, et al. Comparison of carbon sequestration ability and effect of elevation in fenced wetland plant communities of the Xilin River floodplains: a model case study[J]. River Research Applications, 2015, 31(7): 858−866.

[23] 梅雪英, 张修峰. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 933−936.
Mei X Y, Zhang X F. Carbon storage and carbon fixation during the succession of natural vegetation in wetland ecosystem on east beach of Chongming Island[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 933−936.

[24] Joabsson A, Christensen T R. Methane emissions from wetlands and their relationship with vascular plants: an arctic example[J]. Global Change Biology, 2001, 7(8): 919−932.

[25] Gan X J, Cai Y T, Choi C Y, et al. Potential impacts of invasive Spartina alterniflora on spring bird communities at Chongming Dongtan, a Chinese wetland of international importance[J]. Estuarine, Coastal Shelf Science, 2009, 83(2): 211−218.

[26] Reddy K R, Delaune R D. Biogeochemistry of wetlands: science and applications[M]. New York: CRC Press, 2008.

[27] Diamond J S, Epstein J M, Cohen M J, et al. A little relief: ecological functions and autogenesis of wetland microtopography [J/OL]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2021, 8(1): e1493 [2023−02−25]. https://doi.org/10.1002/wat2.1493.

[28] Yimer F, Ledin S, Abdeikadit A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia[J]. Geoderma, 2006, 135: 335−344.

[29] Zhao Q, Bai J, Liu Q, et al. Spatial and seasonal variations of soil carbon and nitrogen content and stock in a tidal salt marsh with Tamarix chinensis, China[J]. Wetlands, 2016, 36(1): 145−152.

[30] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO_2[J]. Nature, 2006, 440: 922−925.

[31] Bai J H, Ouyang H, Xiao R, et al. Spatial variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorus content and storage in an alpine wetland in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(8): 730−736.

[32] Liu W, Chen S, Qin X, et al. Storage, patterns, and control of soil organic carbon and nitrogen in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(3): 1−12.

[33] 刘顺, 罗达, 刘千里, 等. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局 [J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1074−1083.
Liu S, Luo D, Liu Q L, et al. Carbon and nitrogen storage and distribution in different forest ecosystems in the subalpine of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1074−1083.

[34] Downing J A, Prairie Y, Cole J, et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments[J]. Limnology Oceanography, 2006, 51(5): 2388−2397.

[35] Buffam I, Turner M G, Desai A R, et al. Integrating aquatic and terrestrial components to construct a complete carbon budget for a north temperate lake district[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1193−1211.

[36] 叶春, 李春华, 邓婷婷. 论湖滨带的结构与生态功能 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 171−181.
Ye C, Li C H, Deng T T. Structures and ecological functions of lake littoral zones[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(2): 171−181.

[37] Zheng P R, Li C H, Ye C, et al. Characteristic and affecting factors of wetland herbs' distribution in the radiant belt toward land of lake-terrestrial ecotone in Tibet, China[J]. Environmental Sciences Europe, 2022, 34(1): 1−16.

[38] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.

[39] Coops H, Beklioglu M, Crisman T L. The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions[J]. Hydrobiologia, 2003, 506(1): 23−27.

[40] 黄昕琦, 李琳, 吕烨, 等. 内蒙古乌梁素海湿地土壤有机碳组成与碳储量 [J]. 湿地科学, 2015, 13(2): 252−257.
Huang X Q, Li L, Lü Y, et al. Composition and storage of organic carbon in soils of in Ulansuhai Wetlands in Inner Mongolia Autonous Region[J]. Wetland Science, 2015, 13(2): 252−257.

[41] 刘旭, 李畅游, 贾克力, 等. 北方干旱区湖泊湿地沉积物有机碳分布及碳储量特征研究: 以乌梁素海为例 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 319−324.
Liu X, Li C Y, Jia K L, et al. Spatial distribution and storage characteristic of organic carbon in sediments of lake wetland in northern arid areas: a case study of Wuliangsuhai Lake[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(2): 319−324.

[42] Dian L, Jiang L J, Wu X F, et al. Soil organic carbon and its controlling factors in the lakeside of west Mauri Lake along the wetland vegetation types[J/OL]. Processes, 2022, 10(4): 765 [2023−04−13]. https://doi.org/10.3390/pr10040765.

[43] Bao K, Wang G, Jia L, et al. Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: geochemical records of peat and altitude effects[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 7512−7524.

[44] Mu C C, Han S J, Luo J C, et al. Biomass distribution patterns of ecotones between forest and swamp in Changbai Mountain[J]. Journal of Forestry Research, 2000, 11: 198−202.

[45] 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.
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.

[46] 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.
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.

[47] 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 [J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3344−3354.
Wang B W, Mu C C, Wang B. Carbon storage of a primary coniferous forested wetland ecosystem in the temperate Changbai Mountain of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3344−3354.

[48] 梅莉, 张卓文, 谷加存, 等. 水曲柳和落叶松人工林乔木层碳、氮储量及分配 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1791−1796.
Mei L, Zhang Z W, Gu J C, et al. Carbon and nitrogen storages and allocation in tree layers of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* plantations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1791−1796.

[49] 施家月, 王希华, 闫恩荣, 等. 浙江天童常见植物幼树器官的氮磷养分特征 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2006(2): 121−129.
Shi J Y, Wang X H, Yan E R, et al. Saplings nutrient characteristics of common plants in Tiantong National Forest Park[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2006(2): 121−129.

[50] 彭文宏, 牟长城, 常怡慧, 等. 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 W H, Mu C C, Chang Y H, et al. Carbon storage of forested wetland ecosystems in the cold temperate permafrost region, Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1526−1538.

[51] Blais A M, Lorrain S, Plourde Y, et al. Organic carbon densities of soils and vegetation of tropical, temperate and boreal forests [M]. Berlin: Springer, 2005: 155−185.

[52] Xu L, He N P, Yu G R. Nitrogen storage in China's terrestrial ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136201.

[53] 高俊琴, 雷光春, 李丽, 等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征 [J]. 湿地科学, 2010, 8(4): 327−330.
Gao J Q, Lei G C, Li L, et al. The distribution characteristics of soil organic carbon in three kinds of wetland soils in Zoige Plateau[J]. Wetland Science, 2010, 8(4): 327−330.

[54] Fenner N, Freeman C. Drought-induced carbon loss in peatlands[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(12): 895−900.

[55] Guo X L, Lu X G, Tong S Z, et al. Influence of environment and substrate quality on the decomposition of wetland plant root in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(12): 1445−1452.

[56] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104−115.
Ren Y L, Lu M, Cao Q B, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 104−115.

[57] Blodau C, Moore T R. Experimental response of peatland carbon dynamics to a water table fluctuation[J]. Aquatic Sciences, 2003, 65(1): 47−62.

[58] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素 [J]. 地理科学, 2001, 21(4): 301−307.
Li Z, Sun B, Lin X X. Density of soil organic carbon and the factors controlling its turnover in east China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 301−307.

[59] Shen J, Yuan L, Zhang J, et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 997−1005.

[60] Malhotra H, Vandana, Sharma S, et al. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess[J]. Plant Nutrients Abiotic Stress Tolerance, 2018: 171−190.

[61] 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.

[62] Zhong Y, Jiang M, Middleton B A H, et al. Effects of water level alteration on carbon cycling in peatlands[J/OL]. Ecosystem Health Sustainability, 2020, 6(1): 1806113 [2022−09−08]. https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1806113.

(责任编辑 范 娟
责任编委 雷光春)