

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0017

ZHENG Zhichao, MAN Haoran, ZANG Shuying, et al. Distribution characteristics and influencing factors of forest soil organic carbon and available nitrogen in permafrost regions of Huma River basin, Greater Hinggan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1): 222-232. [郑智超, 满浩然, 臧淑英, 等. 大兴安岭呼玛河流域多年冻土区森林土壤有机碳和有效氮分布特征及影响因素[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 222-232.]

大兴安岭呼玛河流域多年冻土区森林土壤有机碳和有效氮分布特征及影响因素

郑智超^{1,2}, 满浩然^{1,2}, 臧淑英^{1,2}, 刘超^{1,2}, 董星丰^{1,2}

(1. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025;

2. 黑龙江省寒区生态安全协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: 多年冻土区土壤碳、氮的可变性及对深层土壤特性了解的缺乏限制了人们对气候变化响应的理解。为明确东北大兴安岭多年冻土区森林土壤有机碳、有效氮(铵态氮、硝态氮)含量分布特征,于2020年秋季(9月末)采集呼玛河流域三种类型多年冻土区(不连续多年冻土区、零星多年冻土区和岛状多年冻土区)16个1 m深的土壤剖面,基于结构方程模型探讨海拔、气候、冻土区类型和植被类型等环境变量对森林土壤有机碳和有效氮含量的影响。结果表明:土壤有机碳和硝态氮含量在不连续多年冻土区高于零星多年冻土区和岛状多年冻土区,土壤铵态氮含量在零星多年冻土区高于岛状多年冻土区和不连续多年冻土区;在垂直剖面上,随着土壤深度的增加,土壤有机碳和有效氮含量呈降低趋势,且土壤有机碳与有效氮之间呈显著的负相关关系($P < 0.05$)。结构方程模型表明,植被类型和年平均温度是土壤有机碳含量变化的主要控制因素,年均降水量对土壤有机碳含量变化的影响最弱;冻土区类型和植被类型是土壤铵态氮和硝态氮含量变化的主要控制因素。研究结果能够为未来准确模拟和估算呼玛河流域多年冻土区森林土壤碳氮储量提供一定的数据支撑。

关键词: 森林土壤; 多年冻土; 有机碳; 有效氮; 结构方程模型; 呼玛河流域

中图分类号: P642.14; S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0222-11

0 引言

土壤是陆地生态系统重要的碳库和氮库,在全球碳氮循环过程中扮演重要角色。据估计全球约有1 500 Gt碳和95 Gt氮是以有机质形态储存于土壤中^[1-2],其中多年冻土区碳储量约占全球土壤碳总储量的50%以上^[3]。多年冻土区土壤生态系统是陆地碳汇的主体,对气候变化响应敏感,全球气候变暖显著改变了多年冻土区土壤水热动态,进而影响植被生长与有机物分解速率,最终导致土壤碳氮循环过程发生改变。明确多年冻土区土壤有机碳和有效氮含量及其影响因素,对于深入了解寒区土壤生态环境及精准评估陆地碳汇功能具有重要意义。

森林土壤作为陆地生态系统的主体,在全球碳循环和氮循环中发挥着不可替代的作用^[4-5]。自然条件下,森林土壤有机碳和有效氮分布受气候和植被等因素控制^[6-8]。气候通常影响土壤水热条件及植被的分布模式,植被通过自身生长及凋落物分解影响土壤碳氮含量。Xiao等^[9]对大兴安岭多年冻土区不同类型落叶松森林生态系统的碳氮储量进行了研究;Wang等^[10]研究了全球气候变化背景下大小兴安岭不连续多年冻土带0~40 cm土壤碳氮含量的变化特征;Groffman等^[11]分析了北方多年冻土区气候变化与森林土壤碳氮循环之间的关系;Gao等^[12]研究了大兴安岭多年冻土区温室气体排放的

收稿日期: 2022-05-26; 修订日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U20A2082);国家自然科学基金项目(41971151);黑龙江省自然科学基金创新团队项目(TD2019D002)资助

作者简介: 郑智超, 硕士研究生, 主要从事地表过程与生态调控研究. E-mail: nmgzcc1995@163.com

通信作者: 臧淑英, 教授, 主要从事冻土碳、氮循环与气候变化研究. E-mail: hsdzsy6311@163.com

驱动因素。已有研究主要聚焦于多年冻土区浅层森林土壤碳氮储量及其变化趋势,以及全球变暖背景下温室气体排放的驱动因素。然而由于气候变暖的响应程度在不同区域间有显著差异^[13],有限的野外观测和巨大的空间异质性,对于不同类型多年冻土区深层土壤有机碳和有效氮含量及空间分布模式的了解在很大程度上仍然不确定^[14]。因此,在全球变暖背景下需进一步明确不同类型多年冻土区深层土壤有机碳和有效氮含量及空间分布规律。

呼玛河流域位于大兴安岭腹地,因其独特的植被类型和气候条件,是全球气候变化响应最敏感的区域之一。过去的一个世纪里,该地区气温经历了超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变暖^[15],冻土从连续多年冻土退化为不连续多年冻土、零星多年冻土或岛状多年冻土^[16]。然而,目前关于呼玛河流域不同类型冻土区土壤碳氮空间分布特征及其影响因素的研究尚缺乏,因此本文选取呼玛河流域三种类型多年冻土区(不连续多年冻土区、零星多年冻土区和岛状多年冻土区)^[17],基于时空转化法^[18-19],探讨多年冻土退化过程中森林土壤有机碳和有效氮含量的空间变化特征,揭示流域内森林土壤有机碳和有效氮含量的主控因素及其相对贡献。该研究有助于理解呼玛河流域不同类型多年冻土区森林土壤有机碳和有效氮分布格局及其主控因素,进而为认识高纬度多年冻土区碳氮循环及其对全球气候变化的响应和反馈作用具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

呼玛河发源于伊勒呼里山北侧,属黑龙江水系,自西向东流经呼中区、塔河县及呼玛县,并于呼玛境内注入黑龙江,全长约 542 km ,流域面积约 $3.1\times 10^4\text{ km}^2$ 。土壤类型以黑土、暗棕壤、泥炭及沼泽土为主。气候属寒温带大陆性季风气候,夏季较短,冬季寒冷漫长,年均气温为 $-2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 490 mm ,蒸发量为 685 mm ,其中约60%以上的降水量以降水的形式集中在6—8月。流域冻结期为10月中旬至次年4月中旬,流域内广泛地分布着三种类型冻土区,分别为不连续多年冻土区、零星多年冻土区和岛状多年冻土,植被覆盖情况良好,植被优势种为寒温带针叶林、寒温带阔叶林和寒温带混交林。

1.2 样品采集

本研究选取森林土壤为研究对象,2020年9月在流域内不连续多年冻土区、零星多年冻土区和岛状多年冻土区选取16个0~100 cm深的土壤剖面进行样品采集(图1)。采取土壤时,去除地表植被及腐殖质,人工挖掘1 m深的土壤剖面,自地表垂直向下划分为5层,依次为0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm,土壤样品在剖面相同深度不同侧面采集3个重复样品,共采集240个土壤样品,装袋、编号,运送至实验室后用于后续实验。每个采样点记录海拔、经度、纬度、地上及地表植被优势种等基本信息。

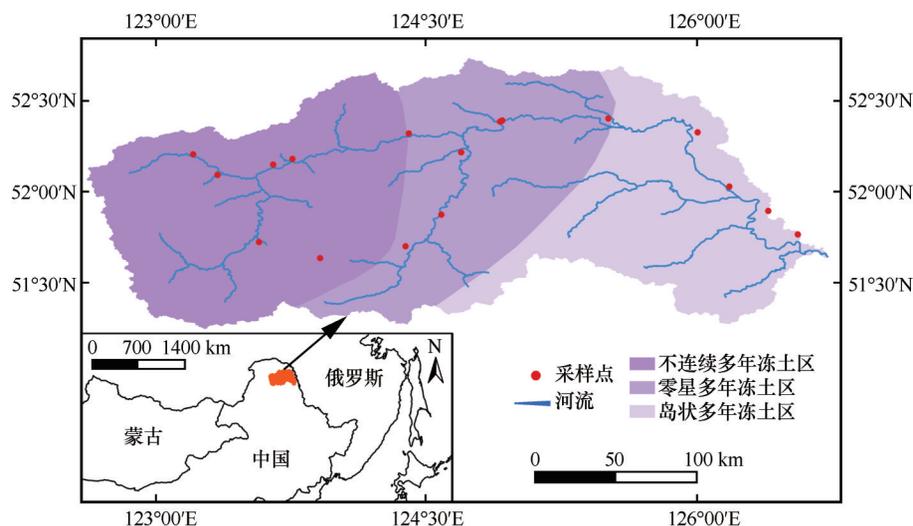


图1 研究区采样点位置[底图为《环北极多年冻土和地下冰状态图》的中国多年冻土分布图(第二版)]
Fig. 1 Location of sampling points in the study area (The base map is distribution map of permafrost in China taken from *Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions*, Version 2)

1.3 样品处理

挑除土壤样品中可见植物根茎及砾石后,将新鲜土壤分为两部分,一部分经过 4 mm 土筛后,用于测定土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量;另一部分经自然风干研磨过 2 mm 土筛后,用于测定土壤 pH 值及土壤有机碳(SOC)含量。土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量采用氯化钾溶液-分光光度法:称取 4.0 g 鲜土于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 氯化钾溶液($2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),振荡离心后用 0.45 μm 定性滤纸过滤,在 24 h 内利用 SAN++ 连续流动分析仪(荷兰 Skalar Analytical)上机测定。土壤有机碳含量采用高温燃烧法:称取土壤样品 100 mg 装入陶瓷舟中,随后逐滴加入 10% 的盐酸至无气泡产生,加酸完毕后把装有土壤样品的陶瓷舟置于 70 $^\circ\text{C}$ 烘箱烘干,确保样品完全烘干后,使用 N/C 3100 分析仪(德国 Analytik Jena)测定。土壤 pH 值测定:采用标准型 PHS-3E pH 计测定(水土比为 10:1)。

1.4 数据分析

利用目前对有机碳和有效氮影响因素的认识,确定以下独立环境变量:海拔(EL)、年均气温(MAT)、年均降水量(MAP)、植被类型(VT)、冻土区类型(PT)和土壤酸碱度(pH)。海拔、植被类型和冻土区类型为野外实地调查记录。年均气温和年均降水量来源于 2011—2020 年内的平均值。年均气温使用 MODIS 产品 MYD11A2 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 计算出 MAT 数据;年均降水量是由 ERA5 分析资料 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>),计算出 MAP 数据。使用 Origin Pro 2021,对土壤理化指标和环境因子进行相关性分析,使用 Person 相关系数用于确定有机碳、有效氮和环境变量,三者之间的关系强度。对于两个分类变量植被类型和冻土区类型,用数字代码划定不同类别,如表 1 所示。

表 1 冻土区类型和植被类型及其相应的数字代码
Table 1 Permafrost zone types and vegetation types and their corresponding numerical codes

数字代码	冻土区类型	植被类型
1	不连续多年冻土区	寒温带针叶林
2	零星多年冻土区	寒温带混交林
3	岛状多年冻土区	寒温带阔叶林

结构方程模型(SEM)使用最大似然参数估计方法,用来确定因子之间的相关关系。结构方程模

型代表了一套完整的多元技术,包括测量理论、因子分析、回归、路径分析和联立方程模型等,用于描述多个潜在变量之间的多重关系^[20]。SEM 的一个优点是,一个潜在变量在一组关系中可以是因变量,同时在另一组关系中可以是自变量。由于假设模型涉及这种多路径联系,因此 SEM 是适合这种分析的工具。本研究中的 SEM 是使用软件包 AMOS 24 进行的。基于科学文献中的因果关系理论,提前假设一个 SEM 模型,该模型包括了海拔、年均气温、年均降水量、冻土区类型、植被类型、土壤酸碱度、土壤有机碳和土壤有效氮之间所有合理的相互作用路径,并根据 SEM 技术进一步完善。采用了评估结构方程模型拟合的标准,如最大似然 χ^2 值、拟合指数(GFI)和近似均方根误差(RMSEA)。

2 结果与分析

2.1 多年冻土区土壤有机碳和有效氮含量空间分布特征

土壤有机碳、有效氮含量随土壤深度分布特征如表 2 所示,结果显示 0~100 cm 内土壤有机碳含量、铵态氮含量和硝态氮含量的变化范围分别为 24.53~118.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、4.75~17.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.12~4.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其平均值分别为 51.41 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、9.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随土层深度的增加,土壤有机碳含量、铵态氮含量和硝态氮含量呈下降趋势;且土壤有机碳、铵态氮和硝态氮在 0~20、20~40、80~100 cm 土层之间差异性显著($P<0.05$)。

2.2 土壤有机碳和有效氮与环境因子的关系

环境变量与土壤有机碳和有效氮含量存在显著相关关系(图 2)。结果显示,年均气温与冻土区类型呈显著正相关关系($P<0.05$)。年均降水量与冻土区类型和年均气温呈显著负相关关系($P<0.05$),与植被类型呈显著正相关关系($P<0.05$)。海拔与冻土区类型和年均气温呈显著负相关关系($P<0.05$),与年均降水量呈显著正相关关系($P<0.05$)。有机碳与土层、冻土区类型和年均气温呈显著负相关关系($P<0.05$),与海拔呈显著正相关关系($P<0.05$)。铵态氮与土层呈显著负相关关系($P<0.05$),与有机碳呈显著正相关关系($P<0.05$)。硝态氮与土层、冻土区类型和年均气温呈显著负相关关系($P<0.05$),与年均气温、海拔、有机碳和铵态氮呈显著正相关关系($P<0.05$)。土壤 pH 与土层、冻土区类型和年均气温呈显著正相关关系($P<0.05$),与海拔、有机

表2 不同类型冻土区土壤有机碳和有效氮统计特征(平均值±标准差)

Table 2 Statistical characteristics of soil organic carbon and available nitrogen in different permafrost zone types (average ± standard deviation)

冻土区类型	变量	土层深度/cm				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
不连续多年冻土区	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	99.67±13.14Aa	73.47±9.28Ab	53.94±7.40Ac	42.03±4.01Ad	34.30±3.67Ad
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	11.16±1.91Aa	9.09±2.03Aab	8.16±1.64Abc	7.16±0.84Abc	6.45±1.31Ad
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	2.91±1.20Aa	2.09±0.66Aab	1.72±0.35Ab	1.28±0.46Abc	0.64±0.24Ad
零星多年冻土区	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	75.10±7.36Ba	56.89±11.01Bb	44.32±5.93Bc	36.97±5.06ABcd	32.23±2.82Ad
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	14.52±2.54Ba	10.22±1.64Ab	9.07±1.64Ab	8.87±1.83Ab	7.90±0.96Bb
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	1.54±0.57Ba	1.28±0.51Bab	1.10±0.35Bab	0.99±0.40Aab	0.63±0.44Ab
岛状多年冻土区	有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	67.98±3.01Ba	52.17±5.75Bb	44.94±6.07Bc	34.03±6.60Bd	28.85±4.84Ad
	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	10.51±2.79Aa	9.89±3.13Aab	7.88±2.24Aab	7.45±1.19Ab	7.32±0.71ABb
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	1.44±0.27Ba	1.38±0.40Ba	0.98±0.33Bb	0.81±0.20Abc	0.59±0.29Ac

注: 不同大写字母表示相同土层不同类型冻土区之间的差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示同一类型冻土区不同土层之间的差异显著($P<0.05$)。在研究区水平空间上, 土壤有机碳平均含量表现为不连续多年冻土区[(60.68±25.17) g·kg⁻¹] > 零星多年冻土区[(49.10±17.0) g·kg⁻¹] > 岛状多年冻土区[(45.59±14.95) g·kg⁻¹], 且不连续多年冻土区0~20、20~40、40~60 cm土层的有机碳含量显著高于零星多年冻土区和岛状冻土区0~60 cm的三个土层($P<0.05$); 土壤铵态氮平均含量表现为零星多年冻土区[(10.12±2.88) mg·kg⁻¹] > 岛状多年冻土区[(8.62±2.46) mg·kg⁻¹] > 不连续多年冻土区[(8.41±2.23) mg·kg⁻¹], 且零星多年冻土区0~20 cm土层的铵态氮含量显著高于不连续多年冻土区和岛状多年冻土区0~20 cm土层($P<0.05$); 土壤硝态氮平均含量表现为不连续多年冻土区[(1.73±0.99) mg·kg⁻¹] > 零星多年冻土区[(1.11±0.52) mg·kg⁻¹] > 岛状多年冻土区[(1.04±0.44) mg·kg⁻¹], 且不连续多年冻土区0~20、20~40、40~60 cm土层的硝态氮含量显著高于零星多年冻土区和岛状多年冻土区0~60 cm的三个土层($P<0.05$)。

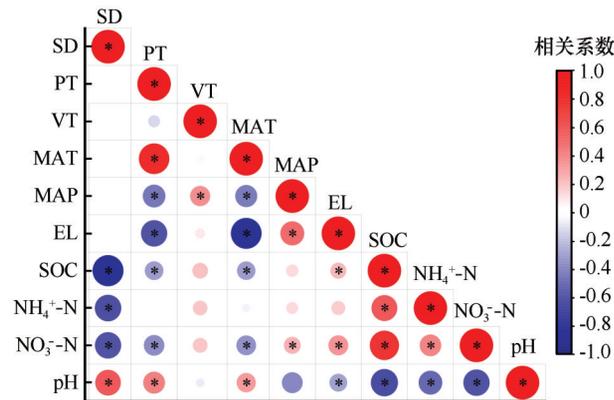


图2 土壤有机碳、有效氮与环境因子间的Person相关性分析[红色表示相关性为正相关,蓝色表示相关性为负相关;*表示通过显著性检验($P<0.05$),颜色深浅和圆圈大小反映相关系数的大小;缩写词包括土壤深度(SD)、海拔(EL)、年均气温(MAT)、年均降水量(MAP)、冻土区类型(PT)、植被类型(VT)、土壤有机碳(SOC)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和土壤酸碱度(pH)]

Fig. 2 Person correlation analysis between soil organic carbon, available nitrogen and environmental factors [Red represents a positive correlation, and blue represents a negative correlation; * represents passing the significance test ($P<0.05$); color depth and circle size reflect the correlation coefficient; abbreviations include soil depth (SD), elevation (EL), mean annual temperature (MAT), mean annual precipitation (MAP), permafrost zone type (PT), vegetation type (VT), soil organic carbon (SOC), ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), soil acidity or alkalinity (pH)]

碳、铵态氮和硝态氮呈显著负相关关系($P<0.05$)。

2.3 土壤有机碳和有效氮含量分布的影响因素

结构方程模型成功拟合了呼玛河流域多年冻土区0~100 cm土层的数据,并满足拟合的指标(图3)。结果表明,土壤深度和环境因子共同解释了0~100 cm土壤有机碳积累变化的90%,铵态氮积累变化的82%,以及硝态氮积累变化的71%。

研究区1 m以内土壤有机碳含量主要受土壤深度、年均气温、植被类型和冻土区类型的显著影响,且年均气温和冻土区类型为显著的负向影响,植被类型为显著的正向影响,年均降水量的影响不显著(图3和表3)。年均气温对有机碳的间接效应是通过冻土区类型的影响来介导的,年均降水量对有机碳的间接效应是通过植被类型的影响来介导的。总体来看土壤有机碳含量主要受植被类型和年均气温的影响,年均降水量对土壤有机碳的影响最小。

研究区1 m以内土壤铵态氮和硝态氮含量主要受土壤深度、植被类型和冻土区类型的显著影响,此外铵态氮含量还受年均降水量的显著影响(图3和表3)。土壤铵态氮含量受冻土区类型为显著的负向影响、植被类型为显著的正向影响、年均降水量为显著的负向影响、年均气温的影响不显著;土壤硝态氮含量受冻土区类型为显著的负向影响、植

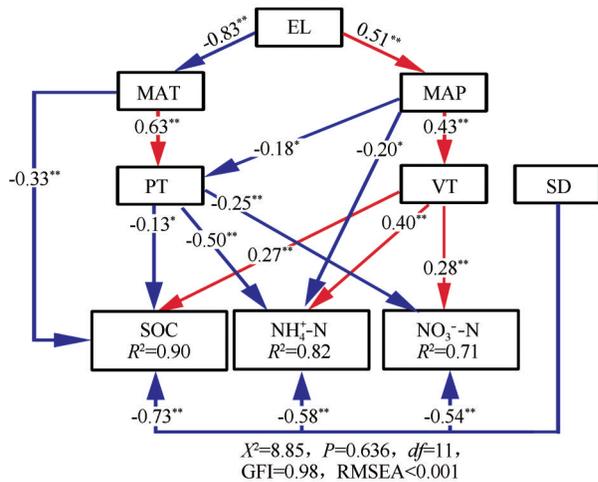


图3 基于结构方程模型的土壤有机碳、有效氮的影响因素分析[单个箭头表示一个变量被假定为原因,对另一个变量的直接影响;箭头上的数字为标准化路径系数,其中红色箭头为正向影响($P<0.05$),蓝色箭头为负向影响($P<0.05$);矩形内 R^2 为模型解释的方差;缩写词包括海拔(EL)、土壤深度(SD)、年均气温(MAT)、年均降水量(MAP)、冻土区类型(PT)、植被类型(VT)、土壤有机碳(SOC)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)]

Fig. 3 Analysis of influencing factors of soil organic carbon and available nitrogen based on structural equation model (SEM) [A single arrow indicates the direct effect of a variable assumed to be a cause on another variable assumed to be an effect; numbers on arrows are standardized path coefficients, red arrows are positive effects ($P<0.05$), blue arrows are negative effects ($P<0.05$); percentages in inside on rectangles indicate the variance explained by the model (R^2); abbreviations include elevation (EL), soil depth (SD), mean annual temperature (MAT), mean annual precipitation (MAP), permafrost zone type (PT), vegetation types (VT), soil organic carbon (SOC), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)]

被类型为显著的正向影响、年均气温和年均降水量的影响不显著。总的来看土壤有效氮含量主要受植被类型和冻土区类型的影响。

3 讨论

3.1 不同类型多年冻土区土壤有机碳和有效氮的分布特征

呼玛河流域森林土壤有机碳和有效氮(铵态氮、硝态氮)含量随着土壤深度的增加逐渐降低,且差异显著($P<0.05$),这与潘蕊蕊等^[21]对青海湖季节冻土区土壤有机碳含量和董星丰等^[22]对大兴安岭多年冻土区土壤有效氮含量随土壤深度的变化趋势基本一致。因为研究区表层土壤有机碳和有效氮含量主要是源于植被凋落物的分解和转化,且表

表3 基于结构方程模型的环境因子对土壤有机碳和有效氮的影响分析结果

Table 3 Analysis results of environmental factors' effect on soil organic carbon and available nitrogen based on structural equation model

效应	变量	MAP	MAT	PT	VT	SD
总效应	有机碳 SOC	0.02	-0.32	-0.19	0.26	-0.73
	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.12	-0.03	-0.59	0.38	-0.58
	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.09	-0.29	-0.33	0.26	-0.54
直接效应	有机碳 SOC	-0.17	-0.33	-0.13	0.27	-0.73
	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.20	0.15	-0.50	0.40	-0.58
	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.13	-0.22	-0.25	0.28	-0.54
间接效应	有机碳 SOC	0.19	0.01	-0.06	-0.01	0
	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.32	-0.18	-0.09	-0.02	0
	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.22	-0.07	-0.08	-0.02	0

注: MAP 为年均降水量; MAT 为年均气温; PT 为冻土区类型; VT 为植被类型; SD 为土层深度。

层土壤适宜的通气状况和水热条件,为微生物活动创造了有利的环境条件,加快了土壤有机碳和有效氮的周转率,从而利于表层土壤有机碳和有效氮含量的积累^[23]。而深层土壤有机碳和有效氮含量较低,可能是因为深层土壤温度较低以及微生物基础呼吸强度减弱,抑制了土壤生物的生物化学过程,致使土壤有机碳和有效氮的周转率降低,从而表现为下层土壤有机碳和有效氮含量较上层的含量低^[24]。本文中土壤有机碳和有效氮含量之间呈显著的正相关性($P<0.05$),也进一步说明了土壤有机碳和有效氮含量在深度上变化规律的相似性。

研究发现,土壤有机碳和硝态氮含量在不连续多年冻土区高于零星多年冻土区和岛状多年冻土区。Liu 等^[25]在大兴安岭多年冻土区土壤有机碳和有效氮的研究中指出,多年冻土区退化会影响土壤有机碳和有效氮含量。这可能是因为不同类型多年冻土区受年均气温和年降水量的影响显著,这种水热差异导致多年冻土发生退化,进而影响土壤碳氮分解程度^[26]。吴明辉等^[19]的研究也表明,冻土退化对土壤碳氮含量的分布特征有显著的影响。而土壤铵态氮含量在零星连续多年冻土区最高,这可能是因为植被类型影响土壤铵态氮含量。根据实地调查结果显示零星多年冻土区植被类型主要以寒温带阔叶林为主,同时研究结果也显示植被类型(0.40, SEM 的标准化路径系数,下同)对土壤铵态氮含量有显著的正向影响。这与鲁博权等^[27]对大兴安岭典型森林土壤碳氮的研究结果相似,即多年

冻土区阔叶林土壤铵态氮含量比针叶林土壤高。这是因为不同冻土区植被类型分布状况不同,导致不同地区土壤有机质含量之间产生较大的差异性,从而影响土壤铵态氮含量的分布,因此土壤铵态氮含量受植被类型影响在零星连续多年冻土区内最高。此外,由于不同类型冻土区活动层深度的不同,使得其土壤持水能力、土壤入渗能力和土壤导水率存在差异^[28],导致不同类型冻土区土壤水文状况不同^[29],而这些变化都可能影响植被覆盖及土壤基质分布的变化^[30],进而使得土壤碳氮的空间异质性增强。

3.2 环境因子对土壤有机碳积累的影响

年均气温和植被类型是影响呼玛河流域土壤有机碳分布的重要因素,较低的环境温度对多年冻土区土壤有机质输入量以及土壤有机质矿化和凋落物的分解速率具有重要影响^[31],而植被类型由于其生长特征和根系分泌物不同,直接或间接影响土壤微生物活性,从而使得土壤有机碳产生较大差异^[32]。本研究结果表明,年均气温对土壤有机碳含量有显著的负向影响,且年均气温与有机碳含量之间呈显著负相关性($P < 0.05$)。Mishra 等^[33]在北半球多年冻土区土壤有机碳储量的空间异质性及环境预测的研究中指出,多年冻土区环境温度是控制有机碳含量的重要因素。因为多年冻土区环境温度会控制微生物活性及数量^[34],进而对有机物的分解产生影响,从而导致温度对土壤有机碳含量产生负向影响,这也进一步解释了有机碳含量随年均气温变化的规律^[22]。此外,年均气温通过对不同类型多年冻土区的影响,进而间接地对土壤有机碳含量产生负向影响(图3)。在全球气候变暖背景下,多年冻土区在过去的十几年中发生了不同程度的退化^[19],导致了多年冻土区土壤碳的分解在增加^[35],因此多年冻土区土壤有机碳含量对年均气温变化的响应十分敏感。

植被类型对土壤有机碳含量有显著的正向影响,其中寒温带针叶林土壤有机碳含量高于寒温带混交林和寒温带阔叶林。已有研究表明,我国东北寒温带地区针叶林土壤有机碳含量最高^[36]。呼玛河流域森林资源丰富,土壤枯枝落叶和根系分泌物较多,促进了植物凋落物转化为土壤有机质,从而有利于提高土壤有机碳含量的积累^[37]。王园博等^[38]在黑河中游对不同植物群落土壤有机碳的研究中也发现,不同植物群落土壤有机碳存在显著差

异,且植物群落(0.22)对土壤有机碳含量有显著的正向影响,但其相关系数低于本研究结果的值(0.27)。这主要是因为本研究区森林植被生长比黑河中游茂盛,同时凋落物和土壤有机质分解缓慢,有利于土壤有机碳的积累。此外,森林根系的分布状态会直接影响到土壤有机碳含量,由于森林根系的密度会随着土壤深度的增加而逐渐降低,导致深层土壤植物的根系相对较少,进而表现为土壤有机碳含量随土壤深度呈减少的趋势^[39]。同时随着土壤深度的增加,深层土壤环境变得相对封闭^[40],有机质的输入量以及微生物的活动减弱,导致有机碳的主要源为植物的深层根系^[41]。因此,研究区 0~20、20~40 cm 土层的有机碳含量显著高于 40~100 cm 的三个土层($P < 0.05$),这与植被根系数量和土壤剖面中分布形态密切相关。

冻土区类型对土壤有机碳含量有显著的负向影响。程国栋等^[35]在青藏高原多年冻土特征、变化及影响和吴明辉等^[19]在祁连山疏勒河源区冻土退化对土壤碳氮影响的研究中指出,不同类型多年冻土区土壤有机碳含量会随冻土退化发生显著的变化。这一方面是因为研究区土壤有机质会以枯枝落叶的形式参与土壤碳库的周转过程^[42],加上地表植被受到冻融收缩膨胀物理作用的影响^[43],加快了枯枝落叶的粉碎化程度,使得细小物质更快地进入土壤中,从而增加土壤碳库的活性所导致的^[44]。另一方面可能是由于多年冻土区的冻融循环,破坏了微生物的细胞^[45],促使可溶性有机物释放,从而增加土壤有机碳含量^[46]。

年均降水量对土壤有机碳含量的负向影响不显著,这与 Zhao 等^[47]在黄土高原土壤有机碳和无机碳积累研究结果不同,这种差异可能是由于研究区域的差异所导致。本研究区采样点距离呼玛河较近,降水对多年冻土区土壤水分的补给可能低于河流的补给;另外随着土壤深度增加,雨水的入渗过程和通气状况逐渐减弱^[48],导致降水对土壤有机碳含量的影响不显著。丁亚鹏等^[49]的研究也指出,地表堆积的大量枯枝落叶,会对降水产生缓冲截留的作用。此外,在气候变暖背景下,多年冻土区地下冰的融化也会释放一定的水分,参与到土壤水循环^[50]。因此土壤有机碳含量对年均降水量的响应程度较弱。

3.3 环境因子对土壤有效氮积累的影响

土壤有效氮积累受土壤水分、温度、植被、冻土

等各种因素的影响^[51]。本研究结果显示,年均气温对土壤有效氮含量的影响不显著(图3)。这是由于研究区年均气温常年低于0℃,可能引起土壤微生物种群之间对温度的耐受力产生差异,而土壤微生物是影响土壤有效氮含量的关键因素^[52],从而使有效氮含量变得相对复杂。此外,年均气温通过对多年冻土区的影响,间接地影响土壤有机质和植物可利用的养分含量^[53],而土壤有机质和植物可利用的养分含量又与土壤有效氮含量具有密切的联系。谭波等^[54]对川西亚高山-高山森林土壤养分的研究中指出土壤有机质会促进冻土区土壤铵态氮和硝态氮含量。因此研究结果显示土壤有效氮受年均气温的直接影响不显著。

冻土区类型对土壤铵态氮和硝态氮的负向影响程度不尽相同,这是由于冻土区生态环境稳定性对环境温度的变化十分敏感^[55],年均气温上升会加速多年冻土的退化,进而改变土壤中氮的矿化速率^[56]。此外,研究区冻土区活动层常年处于冷湿状态,在厌氧条件下增强反硝化作用,不利于硝态氮的积累;同时多年冻土区的冻融作用提高了土壤中亚硝酸和硝酸还原酶的活性,进而促进了硝酸离子还原,导致土壤中硝态氮含量降低^[57]。因此,冻土区类型对土壤硝态氮呈现出负向影响。土壤铵态氮受冻土区类型影响更为强烈。这可能是冻土冻融过程中土壤粒径发生了变化,引起了土壤孔隙度的变化,从而增强了土壤对氮素的固持能力^[58]。已有学者也证实了土壤粒径是控制土壤铵态氮吸附的重要因素,尤其是对深层土壤^[59]。同时冻融作用会导致部分微生物死亡,在土壤融化期间死亡微生物会成为存活微生物的基质,从而提高存活的微生物活性,促进土壤冻融过程中矿化氮的增加,而矿化氮中主要成分是铵态氮^[60]。因此,冻土区类型对土壤铵态氮(-0.50)的影响要强于硝态氮(-0.25)。

年均降水量对土壤有效氮的影响存在差异,对土壤铵态氮为显著的负向影响,对土壤硝态氮的影响不显著,这与马秀艳等^[55]的研究结果不同。造成上述差异的原因可能有以下几点:第一,野外环境与室内模拟实验相比较,野外环境变得更加复杂,不可控因素较多,造成了有效氮与年均降水量关系的差异性;第二,采样点位于多年冻土区河流较近的地方,加上土壤冻结期冻土的保水性^[61],使得土壤水分不受限制,在这种条件下微生物的活性增强了氨化作用抑制了硝化作用;第三,由于硝态氮携

带土壤胶体排斥的负电荷,而铵态氮携带的正电荷对土壤具有吸附作用,在降雨的同时会有淋溶作用将硝态氮带入深层土壤并进入地下水流失。这些原因的综合影响造成了年均降水量对土壤有效氮的差异性。因此土壤铵态氮受年均降水量的影响显著。

森林土壤氮素的有效性与氮素矿化、固定、硝化和反硝化等过程密切相关。本研究结果表明植被类型对土壤有效氮含量有显著的正向影响,但不同植被分布土壤有效氮表现出明显的差异性。已有前人研究表明,寒温带阔叶林土壤铵态氮比寒温带针叶林高^[27]。研究区森林凋落物是土壤有效氮的重要来源,凋落物通过分解逐渐向土壤中输入养分^[62],因此植被是土壤有效氮的主要来源。Duan等^[63]对大兴安岭北方森林的研究也发现植物类型对土壤有效氮含量有显著的影响。此外,研究区森林生态系统中,不同植被类型土壤有效氮的差异性,可能是因为不同树种对铵态氮和硝态氮吸收速率的差异而导致^[36]。土壤有效氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形式存在,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是植物从土壤中吸收和利用N的主要形式^[64],有利于土壤有效氮的积累,这与Elisabeth等^[65]的研究一致。由此可见,植被的类型、生长和养分利用对土壤有效氮含量有着重要的作用。

4 结论

本研究通过分析呼玛河流域不同类型冻土区森林土壤有机碳和有效氮的空间分布格局以及环境因子对土壤垂直剖面有机碳和有效氮含量的潜在影响,得到以下结论:

(1)土壤有机碳和硝态氮含量在不连续多年冻土区高于零星多年冻土区和岛状多年冻土区,土壤铵态氮含量在零星多年冻土区高于岛状多年冻土区和不连续多年冻土区;在垂直剖面上,随着土壤深度的增加土壤有机碳和有效氮含量呈降低的趋势,且土壤有机碳与有效氮之间呈显著的负相关关系($P<0.05$)。

(2)结构方程模型表明植被类型和年均气温是土壤有机碳含量变化的主要控制因素,年均降水量对土壤有机碳含量变化的影响最弱;冻土区类型和植被类型是土壤铵态氮和硝态氮含量变化的主要控制因素。

参考文献(References):

- [1] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 192-194.
- [2] Post E, Forchhammer M C, Bret-Harte M S, et al. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change[J]. Science, 2009, 325(5946): 1355-1358.
- [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): 2008GB003327.
- [4] Zhang Chaofei, Ma Suping, He Xiaobo, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Buqu catchment in the source region of the Yangtze River, China [J/OL]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022 [2022-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20220401.0924.010.html>. [张超飞, 马素萍, 何晓波, 等. 长江源区布曲流域土壤有机碳分布特征及其影响因素[J/OL]. 冰川冻土, 2022 [2022-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20220401.0924.010.html>.]
- [5] Wang Fei, Man Xiuling, Duan Beixing. Characteristics of soil nitrogen mineralization in the main forest types in cold temperate zone during the spring freezing-thawing period[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 14-23. [王飞, 满秀玲, 段北星. 春季冻融期寒温带主要森林类型土壤氮矿化特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 14-23.]
- [6] Reinmann A B, Susser J R, Demaria E M C, et al. Declines in northern forest tree growth following snowpack decline and soil freezing[J]. Global Change Biology, 2019, 25(2): 420-430.
- [7] Sanders-DeMott R, Sorensen P O, Reinmann A B, et al. Growing season warming and winter freeze-thaw cycles reduce root nitrogen uptake capacity and increase soil solution nitrogen in a northern forest ecosystem[J]. Biogeochemistry, 2018, 137(3): 337-349.
- [8] Moonis M, Lee Jong-Kyu, Jin Hyojin, et al. Effects of warming, wetting and nitrogen addition on substrate-induced respiration and temperature sensitivity of heterotrophic respiration in a temperate forest soil[J]. Pedosphere, 2021, 31(2): 363-372.
- [9] Xiao Ruihan, Man Xiuling, Duan Beixing. Carbon and nitrogen stocks in three types of *Larix gmelinii* forests in Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. Forests, 2020, 11(3): 305.
- [10] Wang Xianwei, Song Changchun, Sun Xiaoxin, 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.
- [11] Groffman P M, Hardy J P, Fisk M C, et al. Climate variation and soil carbon and nitrogen cycling processes in a northern hardwood forest[J]. Ecosystems, 2009, 12(6): 927-943.
- [12] Gao Weifeng, Gao Dawen, Cai Tiju, et al. Driving factors on greenhouse gas emissions in permafrost region of Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(3): e2021JG006581.
- [13] Ren Guoyue, Ren Yuyu, Li Qingxiang, et al. An overview on global land surface air temperature change [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 934-946. [任国玉, 任玉玉, 李庆祥, 等. 全球陆地表面气温变化研究现状、问题和展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 934-946.]
- [14] Hu Guanglu, Fang Hongbing, Liu Guimin, et al. Soil carbon and nitrogen in the active layers of the permafrost regions in the Three Rivers' Headstream[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(12): 5113-5122.
- [15] Jin Huijun, Jin Xiaoying, He Ruixia, et al. Evolution of permafrost in China during the last 20 ka [J]. Science China: Earth Sciences, 2019, 62(8): 1207-1223.
- [16] Zhang Zhongqiong, Wu Qingbai, Hou Meiting, et al. Permafrost change in Northeast China in the 1950s—2010s [J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(1): 18-28.
- [17] Heginbottom J A, Brown J, Melnikov E S, et al. Circumarctic map of permafrost and ground-ice conditions: version 2 [DB]. Boulder, CO, USA: National Snow and Ice Data Center, 1993.
- [18] Chen Shengyun, Liu Wenjie, Qin Xiang, et al. Response characteristics of vegetation and soil environment to permafrost degradation in the upstream regions of the Shule River basin [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): 045406.
- [19] Wu Minghui, Qu Deye, Li Ting, et al. Effects of permafrost degradation on soil microbial biomass carbon and nitrogen in the Shule River headwaters, the Qilian Mountains [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(1): 177-186. [吴明辉, 瞿德业, 李婷, 等. 祁连山疏勒河源区冻土退化对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 地理科学, 2021, 41(1): 177-186.]
- [20] Prober S M, Wiehl G. Relationships among soil fertility, native plant diversity and exotic plant abundance inform restoration of forb-rich eucalypt woodlands [J]. Diversity and Distributions, 2012, 18(8): 795-807.
- [21] Pan Ruirui, Li Xiaoyan, Hu Guangrong, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution and its controlling factors on hillslope in seasonal frozen area of Qinghai Lake basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6374-6384. [潘蕊蕊, 李小雁, 胡广荣, 等. 青海湖流域季节性冻土区坡面土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6374-6384.]
- [22] Dong Xingfeng, Zhao Guangying, Li Miao, et al. Carbon and nitrogen properties and the characteristics of soil organic carbon mineralization in permafrost regions in the northern Great Hing'an Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6728-6737. [董星丰, 赵光影, 李苗, 等. 大兴安岭北部多年冻土区土壤碳氮含量及有机碳矿化特征[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6728-6737.]
- [23] Zhao Yunfei, Hong Miaomiao, Ou Yansheng, et al. The stoichiometric characteristics of soil C, N, P in mountain steppe of eastern Tibetan Plateau [J]. Ecological Science, 2018, 37(5): 25-32. [赵云飞, 洪苗苗, 欧延升, 等. 青藏高原东部山地草地土壤碳、氮、磷元素计量特征[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 25-32.]
- [24] Yang Jiajia. The effects of vegetation types on soil enzyme activities and soil carbon and nitrogen forms in Yanhe River basin [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014. [杨佳佳. 延河流域植被类型对土壤酶活性和土壤碳氮形态的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.]
- [25] Liu Chao, Song Yanyu, Dong Xingfeng, et al. Soil enzyme activities and their relationships with soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 670769.
- [26] Liu Guimin, Wu Tonghua, Hu Guojie, et al. Permafrost existence is closely associated with soil organic matter preservation: evidence from relationships among environmental factors and soil carbon in a permafrost boundary area [J]. Catena, 2021, 196: 104894.
- [27] Lu Boquan, Zang Shuying, Sun Li. The effects of freezing-thawing process on soil active organic carbon and nitrogen mineralization in Daxing'anling Mountain forests [J]. Acta Scienti-

- ae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1664-1672. [鲁博权, 臧淑英, 孙丽. 冻融作用对大兴安岭典型森林土壤活性有机碳和氮矿化的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1664-1672.]
- [28] Wang Genxu, Hu Hongchang, Li Taibin. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4): 438-449.
- [29] Zhang Xiangdong, He Juanxiong, Zhang Jing, et al. Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 47-51.
- [30] Yamazaki Y, Kubota J, Ohata T, et al. Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2006, 20(3): 453-467.
- [31] Yuan Zhen, Zhou Zhiyong, Zhao Hongtao, et al. Variability in soil organic carbon mineralization due to different temperatures, moisture contents, and incubation periods in three Taiyue Mountain forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(5): 1021-1029. [袁瑱, 周志勇, 赵洪涛, 等. 太岳山森林土壤有机碳矿化随温度、湿度和培养时间的变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1021-1029.]
- [32] Ma Suhui, Mu Cuicui, Guo Hong, et al. Distribution features of permafrost organic carbon density on different vegetation types in the upper reaches of Heihe River, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 426-433. [马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 426-433.]
- [33] Mishra U, Hugelius G, Shelef E, et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks[J]. *Science Advances*, 2021, 7(9): eaaz5236.
- [34] Hu Ping, Wu Xiukun, Li Shiweng, et al. Progress of studies on permafrost microbial ecology in the past 10 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 732-739. [胡平, 伍修焜, 李师翁, 等. 近10 a来冻土微生物生态学研究进展[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 732-739.]
- [35] Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795. [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.]
- [36] Zhang Di, Man Xiuling, Liu Siqi, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(3): 65-74. [张焜, 满秀玲, 刘思琪, 等. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65-74.]
- [37] Zhu Jiaqi, Man Xiuling, Wang Fei. Organic carbon and nitrogen characteristics of soil aggregates in four forest types in frigid temperate zone[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 45(5): 71-83. [朱家琪, 满秀玲, 王飞. 寒温带4种森林类型土壤团聚体有机碳氮特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 71-83.]
- [38] Wang Yuanbo, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(5): 833-844. [王园博, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 833-844.]
- [39] Wang Li, Zeng Hui, Zhang Yangjian, et al. A review of research on soil carbon storage and its influencing factors in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3506-3515. [王荔, 曾辉, 张扬建, 等. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3506-3515.]
- [40] Li Long, Qin Fucang, Jiang Lina, et al. Vertical distribution of soil organic carbon content and its influencing factors in Aaohan, Chifeng[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 345-354. [李龙, 秦富仓, 姜丽娜, 等. 赤峰市敖汉旗土壤有机碳含量的垂直分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 345-354.]
- [41] Zhang Zhiyong, Wang Yu, Ai Ning, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in different vegetation types in loess region of northern Shaanxi Province, northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(11): 56-63. [张智勇, 王瑜, 艾宁, 等. 陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 56-63.]
- [42] Zhao Qing, Liu Shuang, Chen Kai, et al. Change characteristics and influencing factors of soil organic carbon in *Castanopsis eyrei* natural forests at different altitudes in Wuyishan Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5328-5339. [赵青, 刘爽, 陈凯, 等. 武夷山自然保护区不同海拔甜槠天然林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5328-5339.]
- [43] Guo Weichao, Liu Hongyan, Anenkhonov O A, et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 10-17.
- [44] Wang Jiaoyue, Song Changchun, Wang Xianwei, et al. Progress in the study of effect of freeze-thaw processes on the organic carbon pool and microorganisms in soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 442-452. [王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 442-452.]
- [45] Wang Jiaoyue, Han Yaopeng, Song Changchun, et al. Effects of freezing-thawing cycles on soil organic carbon mineralization in the peatland ecosystems from continuous permafrost zone, Great Hinggan Mountains[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(1): 59-66. [王娇月, 韩耀鹏, 宋长春, 等. 冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 59-66.]
- [46] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8): 1061-1066.
- [47] Zhao Wei, Zhang Junhua, Liu Yuhuan, et al. Factor contribution to soil organic and inorganic carbon accumulation in the Loess Plateau: structural equation modeling[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 116-125.
- [48] Tuo Dengfeng, Gao Guangyao, Chang Ruiying, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 399-411.
- [49] Ding Yapeng, Zhang Junhua, Liu Yuhuan, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Yihe River Basin based on GWR model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4876-4885. [丁亚鹏, 张俊华, 刘玉寒, 等. 基于GWR模型的伊河流域土壤有机碳空间分

- 布特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4876-4885.]
- [50] Li Yan, Jin Huijun, Wen Zhi, et al. Stability of permafrost slopes: a review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 203-216. [李艳, 金会军, 温智, 等. 多年冻土区斜坡稳定性研究综述[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 203-216.]
- [51] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.
- [52] Wang Lulu, Ma Dalong, Li Sensen, et al. Seasonal variation characteristics of soil microbial community structure in Zhalong wetland[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(1): 166-171. [王璐璐, 马大龙, 李森森, 等. 扎龙湿地土壤微生物群落结构的季节变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(1): 166-171.]
- [53] Yang Kai, Wang Genxu, Zhang Tao, et al. Responses of root functional traits to experimental warming in the alpine meadow with different soil moisture in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6362-6373. [杨凯, 王根绪, 张涛, 等. 青藏高原多年冻土区不同水分条件的高寒草甸根系功能性状对增温的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6362-6373.]
- [54] Tan Bo, Wu Qinggui, Wu Fuzhong, et al. Dynamics of soil nutrients and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine-alpine forests of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5175-5182. [谭波, 吴庆贵, 吴福忠, 等. 川西亚高山-高山森林土壤养分动态及其对季节性冻融的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5175-5182.]
- [55] Ma Xiuyan, Jiang Lei, Song Yanyu, et al. Effects of temperature and moisture changes on functional gene abundance of soil nitrogen cycle in permafrost peatland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6707-6717. [马秀艳, 蒋磊, 宋艳宇, 等. 温度和水分变化对冻土区泥炭地土壤氮循环功能基因丰度的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6707-6717.]
- [56] Wu Dandan, Jing Xin, Lin Li, et al. Responses of soil inorganic nitrogen to warming and altered precipitation in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, 52(5): 959-966. [武丹丹, 井新, 林笠, 等. 青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 959-966.]
- [57] Wei Lihong. The effect of alternation freezing and thawing on soil organic matter and nitrogen potassium nutrients of black soil [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004. [魏丽红. 冻融交替对黑土土壤有机质及氮钾养分的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2004.]
- [58] Zhang Wei, Zhang Xudong, He Hongbo, et al. Research advances in soil nitrogen transformation as related to drying/wetting cycles[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 783-789. [张威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783-789.]
- [59] Zhou Wenxiang, Han Guilin, Liu Man, et al. Effects of soil pH and texture on soil carbon and nitrogen in soil profiles under different land uses in Mun River Basin, Northeast Thailand[J]. *PeerJ*, 2019, 7: e7880.
- [60] Nielsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1723-1730.
- [61] Hou Renjie, Li Tianxiao, Fu Qiang, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104486.
- [62] Wang Jianqing, Shi Xiuzhen, Zheng Chengyang, et al. Different responses of soil bacterial and fungal communities to nitrogen deposition in a subtropical forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142449.
- [63] Duan Beixing, Cai Tiji, Man Xiuling, et al. Different variations in soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes and their responses to edaphic factors along a boreal secondary forest successional trajectory [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155983.
- [64] Jiao Yaqing, Song Liquan, Zang Shuying, et al. Response of inorganic nitrogen dynamics to autumn freeze-thaw in permafrost peatlands of the Greater Hinggan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(2): 387-401. [焦亚青, 宋立全, 臧淑英, 等. 大兴安岭多年冻土泥炭地无机氮动态对秋季冻融的响应[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 387-401.]
- [65] Elisabeth R, Liu Chunyan, Mueller C W, et al. Alder-induced stimulation of soil gross nitrogen turnover in a permafrost-affected peatland of Northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 172: 108757.

Distribution characteristics and influencing factors of forest soil organic carbon and available nitrogen in permafrost regions of Huma River basin, Greater Hinggan Mountains

ZHENG Zhichao^{1,2}, MAN Haoran^{1,2}, ZANG Shuying^{1,2}, LIU Chao^{1,2}, DONG Xingfeng^{1,2}

(1. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. Heilongjiang Province Collaborative Innovation Center of Cold Region Ecological Safety, Harbin 150025, China)

Abstract: As the main body of the terrestrial ecosystem, forest soil plays an irreplaceable role in the global carbon and nitrogen cycles. Under natural conditions, the distribution of forest soil organic carbon and available ni-

trogen is controlled by factors such as climate and vegetation. Climate usually affects soil water and heat conditions and the distribution patterns of vegetation. Vegetation affects soil carbon and nitrogen content through its own growth and litter decomposition. However, due to the significant regional variation in response to climate warming, limited field observations and large spatial heterogeneity, the understanding of soil organic carbon and available nitrogen content and spatial distribution patterns in the deep soil of different types of permafrost zones remains largely uncertain. At the same time, in the past century, the temperature in the Greater Hinggan Mountains has experienced a warming of more than 1 °C, and the frozen soil has degraded from continuous permafrost zone to discontinuous permafrost zone, sporadic permafrost zone or island permafrost zone. At present, there is still a lack of research on the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon and available nitrogen in different types of permafrost zones in the Huma River basin. Therefore, this paper selects three types of permafrost zones in the Huma River basin (discontinuous permafrost zones, sporadic permafrost zones and island permafrost zones). Based on the spatio-temporal transformation method, we explored the spatial variation characteristics of forest soil organic carbon and available nitrogen in the process of permafrost degradation and revealed the main controlling factors and relative contributions of forest soil organic carbon and available nitrogen in the watershed. In this study, forest soil was selected as the research object. In September 2020, 16 soil profiles with a depth of 0~100 cm were selected for sample collection in discontinuous permafrost zones, sporadic permafrost zones and island permafrost zones in the Huma River basin. The soil samples were collected vertically downward from the surface into 5 layers, 0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm and 80~100 cm in sequence. Three replicates of soil samples were collected at different sides of the same depth of the profile, and a total of 240 soil samples were collected. Each sampling point records basic information such as elevation, longitude, latitude, and dominant species of above-ground and surface vegetation. The effects of environmental variables such as elevation, climate, permafrost zone type and vegetation type on forest soil organic carbon and available nitrogen content were discussed based on the structural equation model (SEM). The results showed that the contents of soil organic carbon and nitrate nitrogen in the discontinuous permafrost zone were higher than those in sporadic permafrost zone and island permafrost zone, while soil ammonium nitrogen content in the sporadic permafrost zone was higher than that in island permafrost zone and discontinuous permafrost zone. In the vertical profile, the contents of soil organic carbon and available nitrogen contents tended to decrease with increasing soil depth, and there was a significant negative correlation between soil organic carbon and available nitrogen ($P < 0.05$). The structural equation model clarified that vegetation type and mean annual temperature were the main controlling factor for soil nitrate nitrogen content, and mean annual precipitation had the weakest effect on soil organic carbon content; permafrost zone type and vegetation type were the main controlling factors for soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content. This study is helpful to understand the distribution patterns and main controlling factors of forest soil organic carbon and available nitrogen in different types of permafrost zones in the Huma River basin, and can provide certain data support for the accurate simulation and estimation of forest soil carbon and nitrogen storage in the watershed in the future.

Key words: forest soil; permafrost; organic carbon; available nitrogen; structural equation model (SEM); Huma River basin

(责任编辑: 牟翠翠)