

DOI: 10.20103/j.stxb.202503190628

薛璟, 杨静, 王宪伟, 尹紫良, 王文, 矫智慧, 杜宇, 李琪, 孙晓新. 大兴安岭多年冻土区树木心材甲烷浓度变化及细菌群落特征. 生态学报, 2025, 45 (19): - .

Xue J, Yang J, Wang X W, Yin Z L, Wang W, Jiao Z H, Du Y, Li Q, Sun X X. Methane concentration and bacterial community characteristics in the heartwood of trees in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (19): - .

大兴安岭多年冻土区树木心材甲烷浓度变化及细菌群落特征

薛 璟^{1,2,3}, 杨 静^{1,2}, 王宪伟³, 尹紫良^{1,2}, 王 文^{1,2}, 矫智慧^{1,2}, 杜 宇³, 李 琪³, 孙晓新^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

2 黑龙江三江平原湿地生态系统定位观测研究站, 抚远 156500

3 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

摘要: 树干可能是大气甲烷(CH₄)的重要来源之一, 心材中 CH₄ 浓度在一定程度上决定树干 CH₄ 的排放规模, 但对于量化心材 CH₄ 浓度和与之相关细菌群落构成的理解仍然有限。研究中调查了大兴安岭多年冻土区四个不同立地类型(森林高地、泥炭地、沼泽、河岸带)心材 CH₄ 浓度特征, 通过区分阔叶树和针叶树来比较心材 CH₄ 浓度的差异, 并检索文献收集了目前已有心材 CH₄ 浓度的相关数据集(共计 355 个样本)来验证我们的结果。此外, 还通过高通量测序确定了树皮和心材中细菌群落构成。结果表明: 不论是本研究还是基于文献统计的数据结果, 阔叶树心材 CH₄ 浓度始终高于针叶树。在本研究中, 心材 CH₄ 浓度普遍偏低, 范围在(1.54±0.15)–(2.17±0.22) μL/L 之间。通过对比心材和树皮细菌群落构成发现二者有相同或各自特有菌属, 其中共有菌属分别隶属于 Chloroplast 目、Mitochondria 科、Pectobacteriaceae 科和尚未得到鉴定的三个属, 特别的, 我们在树皮中发现了其特有的甲烷氧化菌属(*Methylocella*)。这些植物内生菌不仅能够促进植物养分吸收和维持植物健康的动态平衡, 还可能对树干 CH₄ 收支有潜在影响, 未来的研究需进一步开展实地观测来探究该区树干 CH₄ 通量的变化特征。明确了大兴安岭多年冻土区树木心材 CH₄ 浓度变化特征, 不仅为深入认知该区域树干 CH₄ 动态提供了科学依据和数据支持, 还可以为树木病害的防治提供参考依据。

关键词: 心材; 甲烷浓度; 树干; 甲烷氧化菌

Methane concentration and bacterial community characteristics in the heartwood of trees in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains

XUE Jing^{1,2,3}, YANG Jing^{1,2}, WANG Xianwei³, YIN Zilaing^{1,2}, WANG Wen^{1,2}, JIAO Zhihui^{1,2}, DU Yu³, LI Qi³, SUN Xiaoxin^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Heilongjiang Sanjiang Plain Wetland Ecosystem Observation and Research Station, Fuyuan 156500, China

3 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

Abstract: Tree stems may be a significant source of atmospheric methane (CH₄), and the heartwood CH₄ concentration

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2024C038); 国家自然科学基金项目(31870443); 东北林业大学碳中和专项基金项目“东北温带退化湿地固碳增汇技术研发与示范”

收稿日期: 2025-03-19; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunxiaoxin@nefu.edu.cn

determines the magnitude of CH₄ emissions from tree stems. However, our understanding of heartwood CH₄ concentrations and bacterial community composition remains limited. In this study, we investigated the heartwood CH₄ concentration characteristics at four sites (upland, peatland, swamp, and riparian zone) in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains and compared the differences between the two by distinguishing between broadleaf and coniferous trees. Relevant datasets (N=355) of global heartwood CH₄ concentrations were collected through literature search and screening to test our results. In addition, the bacterial community composition in bark and cores was determined by high-throughput sequencing. The results showed that heartwood CH₄ concentrations were consistently higher in broadleaf trees than in conifers, both in the present study and based on literature statistics. The heartwood CH₄ concentrations were lower in this study, ranging from (1.54±0.15) to (2.17±0.22) μL/L. Identical and respective endemic genera were found in the heartwood and bark bacterial communities, with common genera belonging to the order *Chloroplast*, family *Mitochondria*, *Pectobacteriaceae* and three genera that have not yet been identified. In particular, we found the endemic genus methane oxidising bacteria (*Methylocella*) in the bark. These plant endophytes not only promoted plant nutrient uptake and maintain the plant health dynamic, but may also had a potential impact on tree stems CH₄ balance, and future studies need to carry out further field observations to explore the characteristics of tree stems CH₄ flux changes in this region. This study clarified the heartwood CH₄ concentration characteristics changes and bacterial communities of the heartwood and bark in the permafrost zone of the Great Hing'an Mountains, which not only provided a scientific basis and data support for in-depth knowledge of the dynamics of tree stems CH₄ in this region, but also provided a reference basis for the prevention and control of tree diseases.

Key Words: heartwood; methane concentration; stem; methylocella

甲烷(CH₄)是一种重要的温室气体,其温室效应是二氧化碳(CO₂)的25倍。森林是重要的碳汇,全球森林每年碳汇约为1.1 Pg C^[1]。然而,最近的研究表明,树干介导的CH₄排放约占全球CH₄排放的10%,这很可能削弱了森林的碳汇能力^[2]。作为潜在的甲烷排放源,树干主要通过两种途径产生或排放CH₄,即对土壤中产生CH₄的纵向传输和树干内部微生物产生CH₄的横向扩散,前者多是潮湿土壤如湿地树干CH₄排放的主要途径,而后者主要与心材中微生物群落密切相关^[3]。由此可见,树干CH₄排放不仅受限于土壤水分条件,还可能受植物内生菌的驱动作用,是评估森林生态系统碳循环的重要指标。

全球近30%的森林分布在北方地区^[4],根据其生态系统特征,可划分为湿地森林和山地森林。湿地森林约占全球湿地总面积的60%^[5],是树干CH₄的主要来源之一^[6-7]。例如有研究表明,河岸带和泥炭地树干介导的CH₄排放可占到生态系统CH₄排放的20%以上^[8-9]。不同于湿地森林,山地森林由于其较为干燥通气的土壤条件通常被认为是CH₄的汇,但有证据表明生长在山地的树木同样会排放CH₄,树干介导的CH₄排放甚至能占其生态系统CH₄排放70%以上^[10],与之对应的,在其心材中可观测到高于大气1000倍的CH₄浓度^[11]。因此,鉴于树干CH₄排放与其心材CH₄浓度密切相关,量化树木心材CH₄浓度有助于我们理解和预测树干CH₄排放的不确定性。

尽管树干已被证明是潜在的CH₄排放源,但排放的CH₄是由于土壤运输还是木材环境本身产生的仍存在争议^[12]。湿地森林树干CH₄排放来源于树木对土壤产生CH₄的纵向运输^[13],树木可能通过蒸腾流将土壤深处产生的CH₄由根系直接输送至植物地上部分,通过皮孔释放到大气^[3]。而在山地森林,树干CH₄排放多由树干内栖息的微生物产生,心材内部缺氧潮湿的环境有利于腐生真菌和产甲烷菌生长^[14-15],这些微生物产生的CH₄在树干内积累,导致心材观测到高浓度CH₄^[16],并通过横向扩散从树干排放。然而,树干CH₄排放的规模和途径在不同树种、不同立地类型之间更为复杂,CH₄可能来源于两种途径的综合作用^[17-18]。因此,不论是生长在湿地还是山地的树木,均有向大气中释放CH₄的潜力,量化心材CH₄浓度有助于我们更好地区分树干CH₄排放的来源和途径。

大兴安岭地区不仅是我国森林的重要分布区域,也是我国地带性多年冻土主要分布区之一^[19]。由于受到气候变暖的影响,该区湿地已经出现了树木扩张的现象^[20],但目前对于大兴安岭地区树干 CH₄收支的相关研究仍非常有限。测定树木心材 CH₄浓度是预测树干 CH₄通量的前提,有必要对不同树种、不同立地类型的树木开展心材 CH₄浓度的研究。故本研究选择大兴安岭多年冻土区不同森林立地类型(山地、泥炭地、沼泽、河岸带)的不同树种(白桦、兴安落叶松、樟子松、水冬瓜赤杨)为研究对象,测定树木心材 CH₄浓度、含水率及植物内生菌等指标,并总结目前国内外能够检索到树干心材 CH₄浓度的文献,初步探究研究区域树干 CH₄排放的潜力,进一步为深入研究树干 CH₄收支提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国大兴安岭北部漠河市图强镇中国科学院东北地理与农业生态研究所大兴安岭湿地站(52°56′34″N,122°51′19″E),气候为寒温带大陆性季风气候,年平均气温为-3.9℃,平均年降水量 460.8 mm,是我国唯一的高纬度多年冻土分布区^[21],本研究选取研究区内具有代表性的四种立地类型的树木开展调查:

山地森林(52.94 N,122.85 E,523 m a.s.l.)坡度约为 40°,森林覆盖率约为 92%,树种主要以针叶树兴安落叶松(*Larix gmelinii*)和樟子松(*Pinus sylvestris*)为主,其次为阔叶树白桦(*Betula platyphylla*)。林下土壤为棕色针叶林土,0—20 cm 土壤有机碳(SOC)含量低于 10.00%^[22],土壤含水率为 35.23%。

泥炭地(52.94 N,122.85 E,475 m a.s.l.)分布的树木较少,主要的树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*),少见白桦(*Betula platyphylla*),偶见樟子松(*Pinus sylvestris*)。土壤类型主要是泥炭土,0—20 cm 土壤 SOC 含量均在 40.00%以上^[23],土壤含水率为 52.22%。

森林沼泽(53.81 N,122.86 E,474 m a.s.l.)分布的主要树种是阔叶树种白桦(*Betula platyphylla*)和水冬瓜赤杨(*Alnus sibirica*),0—20 cm 土壤 SOC 含量为 38.70%,土壤含水率为 62.45%。

河岸湿地(52.93 N,122.85 E,479 m a.s.l.)树种主要是阔叶树种白桦(*Betula platyphylla*)和水冬瓜赤杨(*Alnus sibirica*),0—20 cm 土壤 SOC 含量为 46.60%^[24],土壤含水率为 68.86%。

1.2 样品采集与分析

野外采样和调查开展于 2024 年 5 月 20 日至 2024 年 5 月 25 日,此时研究区域正值树木生长初期,树木液流量达到最大。分别在四种不同类型的样地中随机选择 9—12 棵长势良好,没有死亡或树干表面明显被腐朽的树木,测定每棵树包括树木基径(距地面 0.3 m 处直径)、胸径(距地面 1.3 m 处直径)和树高在内的基本指标,同时使用土壤水分仪(TDR 150,美国)测量被测树木树下的土壤含水率。高精度木材水分检测仪(DLY-1702,中国)用于测定树芯含水率,仪器量程为 0%—70%。具体样地和树种选择信息见表 1:

表 1 样地与取样树种信息
Table 1 Sample plots and species information

样地名称 Site	平均树 木密度	平均树高	平均胸径	平均树龄	树芯采样树种与数量				
	Average tree density/ (株/hm ²)	Average height/m	Average diameter at breast height/cm	Average tree age/a	白桦	兴安 落叶松	樟子松	水冬 瓜赤杨	合计
山地森林 Upland	>1000	12.78	10.93	>10	3	3	3	ND	9
泥炭地 Peatland	<1000	5.96	7.53	<10	3	3	3	ND	9
森林沼泽 Swamp	>1000	14.41	9.07	>10	5	ND	ND	5	10
河岸带 Riparian	>1000	19.47	11.99	>10	6	ND	ND	6	12

ND 表示该样地中无此树种

树芯通过 HAGLOF 树木生长锥(长 200 mm,内径 5 mm,瑞典)获取,分别在所选树木距地面 0.3 m(基径)和 1.3 m(胸径)处使用生长锥获取树芯,共获取 80 个树芯样本。在获取树芯后,将生长锥从心材中反向钻

出,立即使用带有三通阀的 2 mL 注射器堵住形成的孔,为最小化 CH_4 被空气氧化或稀释的干扰,等待 5 分钟后再抽取孔洞中气体样品^[14,17,25]。提取到的气体使用预先抽真空的 2 mL 顶空瓶收集,为确保气密性,使用封口膜包裹顶空瓶的瓶口处,气体在一周内使用赛默飞 Trace-1300 气相色谱仪(Thermo fisher,美国)完成测定。

1.3 高通量测序与序列分析

树芯样本通过生长锥采集,若观察到取出的树芯存在腐烂或病虫害时(例如颜色变深,木材质地不均匀)则舍去该样本。为避免样品污染,在每个样本采集前使用乙醇消毒液擦拭生长锥,树皮样本同样使用乙醇消毒过的镊子采集。所有采集的样本分别装入无菌离心管,用冰袋保鲜带回实验室,并于 -80°C 下保存,用于微生物高通量测序分析。

使用 DNA 提取试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, 美国)进行 DNA 的提取。使用 NanoDrop 2000 系统对 DNA 浓度和质量进行了筛选。利用通用引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和反向引物 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 可变区扩增。由于心材和树皮微生物含量较少,约有一半的样本出现 PCR 产物目的条带弱或未检测到的情况,无法用于后续检测,因此,树皮和心材细菌群落为树皮和心材样本的平均值,并未区分不同树种。美吉公司提供的 Illumina Miseq PE 300 平台进行扩增序列的测序,对原始序列进行预处理,根据不同的相似度水平,对所有序列进行 OTU 划分,对 97% 相似水平下的 OTU 进行生物信息统计分析。利用 Silva 数据库对细菌测序 OTU 进行分类水平(门、纲、目、科、属和种)的注释。

1.4 文献数据检索与分类

通过在 Web of Science 和 CNKI 文献数据库搜集已发表的研究论文,搜索关键词包括:甲烷(methane)、树木(tree)。文献检索时间截止到 2024 年 10 月 1 日,共搜集来自 5 篇发表文献的 355 个独立观测数据^[14,17,25-27]。为了更清晰地分析数据,本研究中主要区分了阔叶和针叶两种类型。研究数据通过文章表格、文本或利用图形数字化软件 GetData Graph Digitizer 编译间接获得。

1.5 数据分析

使用单因素方差分析本研究中四个立地类型中心材 CH_4 浓度之间的差异,数据分析之前,首先对数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk 检验),发现数据不满足正态分布时采用对数转换(Log_{10}),当数据仍不满足正态分布时采用非参数检验方法(Mann-Whitney 检验)比较针叶和阔叶心材 CH_4 浓度的差异,使用主成分(PCA)分析心材 CH_4 浓度和各影响因素之间的关系。所有数据分析均采用 SPSS 19.0 统计分析软件包(SPSS, Inc. USA)。由于针阔叶的心材 CH_4 浓度原数据差异较大,故使用对数转换(Log_{10})后的 CH_4 浓度值进行绘图,作图采用 Origin 2021 软件,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同立地类型心材 CH_4 浓度变化趋势

总体而言,四种立地类型(河岸带、沼泽、泥炭地、山地)中基径处心材 CH_4 浓度均高于胸径处 CH_4 浓度(图 1)。此外,河岸带和沼泽区的心材 CH_4 浓度均高于泥炭地和高地区域,但四种立地类型之间心材 CH_4 浓度没有显著差异($P > 0.05$)(图 1)。在胸径处,不同立地类型观测到的心材 CH_4 浓度平均值大小排序为:河岸带(2.03 ± 0.22) $\mu\text{L/L}$ > 沼泽(1.75 ± 0.19) $\mu\text{L/L}$ > 山地(1.63 ± 0.11) $\mu\text{L/L}$ > 泥炭地(1.54 ± 0.15) $\mu\text{L/L}$;在基径处,不同立地类型观测到的心材 CH_4 浓度平均值大小排序为:河岸带(2.17 ± 0.23) $\mu\text{L/L}$ > 沼泽(2.09 ± 0.26) $\mu\text{L/L}$ > 泥炭地(1.75 ± 0.08) $\mu\text{L/L}$ > 山地(1.73 ± 0.06) $\mu\text{L/L}$ 。

2.2 心材 CH_4 浓度与各影响因子之间的关系

对不同部位心材 CH_4 浓度与其影响因子进行主成分分析(图 2),结果显示,PCA 轴 PC1、轴 PC2 共同解释变量的 57.80%。主成分分析显示,心材 CH_4 浓度与各影响因子之间存在显著差异($P < 0.05$),其中胸径 CH_4 浓度与胸径和基径之间显著正相关($P < 0.05$),基径 CH_4 浓度与土壤含水率、土壤温度之间显著正相关($P < 0.05$)(图 2)。

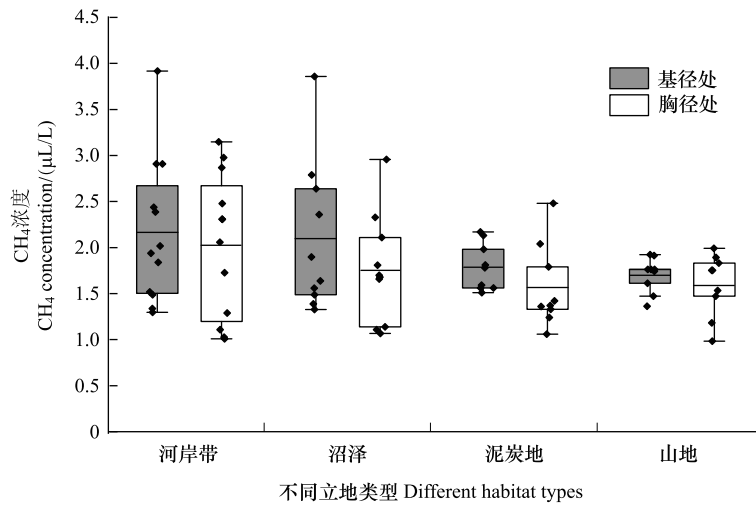


图1 不同立地类型心材甲烷浓度变化特征

Fig.1 Characteristics of variation in methane concentration in tree heartwood across different habitat types

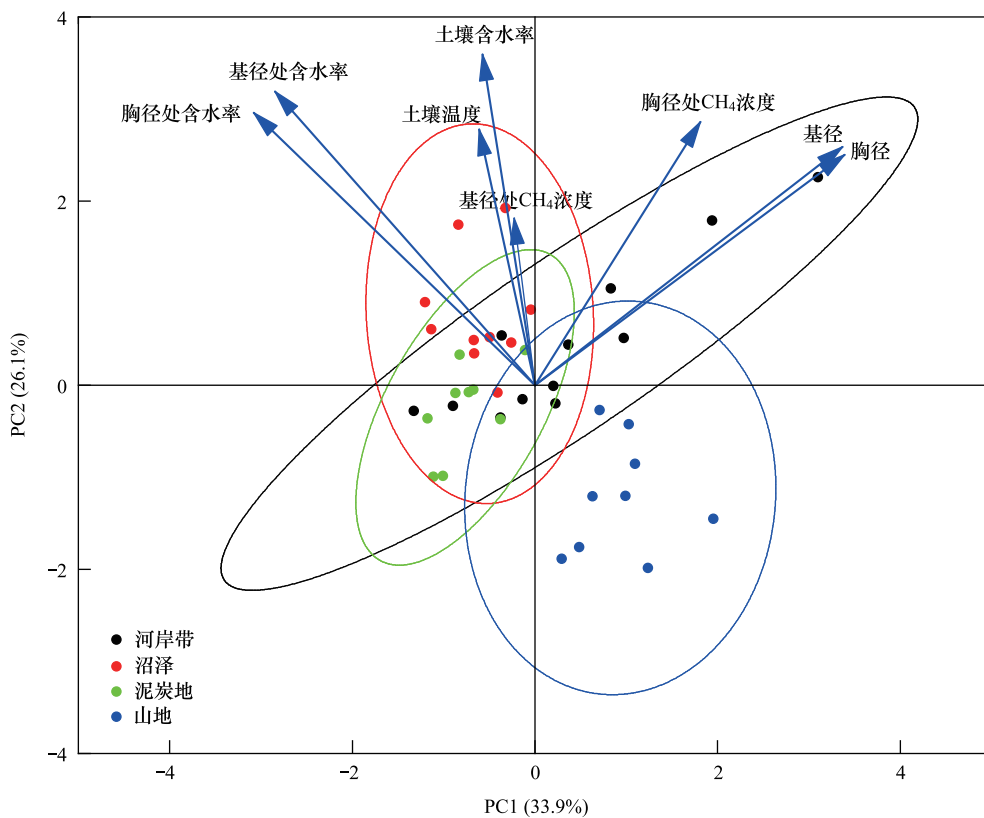


图2 各环境因素和心材甲烷浓度的主成分分析

Fig.2 Principal Component Analysis of various environmental factors and methane concentration in the tree heartwood

2.3 基于文献汇总的心材 CH_4 浓度特征

在本研究中,通过区分阔叶树和针叶树比较了二者之间的差异,阔叶树和针叶树心材 CH_4 浓度之间不存在显著差异 ($P>0.05$, 表2),具体表现为阔叶树心材 CH_4 浓度高于针叶树心材 CH_4 浓度(图3)。基于文献汇总的比较结果进一步验证了本研究的结果,即阔叶树种心材 CH_4 含量显著高于针叶心材 CH_4 含量 ($P<0.05$, 表2)。但总体而言,不论是阔叶树还是针叶树,本研究中心材 CH_4 浓度含量远低于基于文献汇总的数据(表2)。

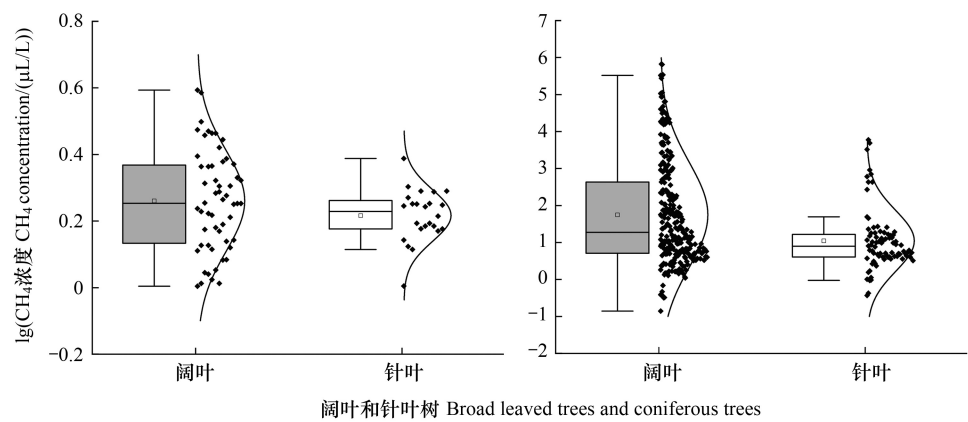


图 3 针叶和阔叶树心材甲烷浓度差异
Fig.3 Differences in methane concentrations in the heartwood of trees of coniferous and broadleaved species

表 2 心材甲烷浓度在针叶和阔叶树之间的差异

Table 2 Differences in heartwood methane concentrations between broadleaf and conifer trees					
心材 CH ₄ 浓度对比 Heartwood CH ₄ concentration comparison	阔叶树心材 CH ₄ 浓度 Broadleaf heartwood CH ₄ concentration/ (μL/L)		针叶树心材 CH ₄ 浓度 Coniferous heartwood CH ₄ concentration/ (μL/L)		P
	样本数量(N) Sample size		样本数量(N) Sample size		
本研究 This study	56	1.93±0.69	24	1.67±0.29	> 0.05
文献汇总 Reference summary	273	12103.35±4008.2	82	222.04±101.69	< 0.05

P>0.05 表示心材 CH₄ 浓度在针叶和阔叶树之间没有显著差异

2.4 心材和树皮细菌群落组成

在门水平上,树皮和心材共鉴定出 13 个菌门(图 4)。其中蓝菌门(Cyanobacteria)和变形菌门(Proteobacteria)是树皮和心材主要的细菌门,丰度占比合计超过 80%。酸杆菌门(Acidobacteria)是树皮特有的菌门,丰度占比为 3%,而厚壁菌门(Firmicutes)是心材中特有菌门,丰度占比为 3%。

在属水平上,树皮和心材共鉴定出丰度高于 0.1% 的 30 个菌属(图 5),树皮优势菌属主要为:norank_o__Chloroplast (72.50%)、norank_f__Mitochondria (12.27%)、norank_f__Pectobacteriaceae (3%)、Bryocella (2.3%)、未命名菌属:1174-901-12 (1.6%)、unclassified_f__Beijerinckiaceae (0.4%)、Granulicella (0.5%)、甲烷氧化菌属(Methylocella,0.4%)等。心材优势菌属主要为:norank_o__Chloroplast (35.7%)、Rahnella1 (19.7%)、norank_f__Mitochondria (6.2%)、norank_f__Pectobacteriaceae (8.5%)、Serratia (5.6%)、Paenibacillus (3.5%)、Cellulomonas (1.1%)等。

树皮和心材共有菌属为 norank_o__Chloroplast、norank_f__Mitochondria、norank_f__Pectobacteriaceae,甲烷氧化菌属(Methylocella)是树皮特有菌属,而 Rahnella1 属是心材中广泛分布的菌属。

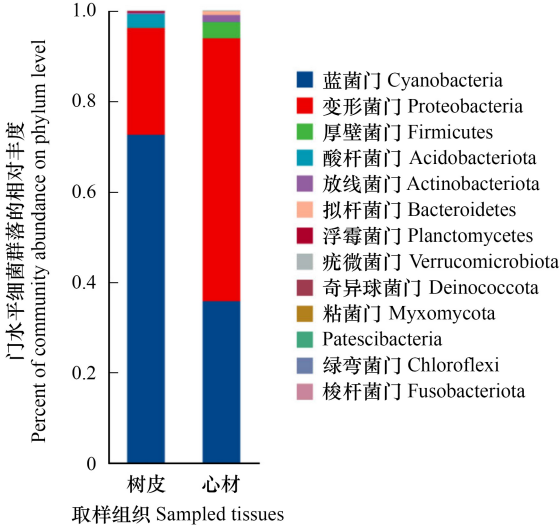


图 4 树皮和心材细菌群落组成(门水平),n=6
Fig.4 Bacterial community composition of bark and tree heartwood (phylum), n=6

图5 树皮和心材细菌群落组成(属水平), $n=6$ Fig.5 Bacterial community composition of bark and tree heartwood (genus), $n=6$

3 讨论

3.1 心材 CH_4 浓度变化及其影响因素

对不同立地类型树木心材 CH_4 的观测结果表明,生长在湿地中的树木倾向于更高的心材 CH_4 浓度。反之,在排水良好、土壤和木材含水率较低的山地森林, CH_4 浓度偏低,但不同样地之间心材 CH_4 浓度差异不显著 ($P<0.05$, 图 1)。产 CH_4 微生物需要厌氧并且依赖于足够的水分才能产生 CH_4 , 因此,湿地潮湿厌氧的土壤环境不仅可以促进土壤微生物产生 CH_4 , 还可以通过增加木材含水率为 CH_4 纵向传输提供适宜条件,这可能是湿地中心材 CH_4 浓度较高的原因之一^[25,28-29], 而山地森林土壤含水率偏低,不利于微生物产生 CH_4 , 因此心材 CH_4 浓度不及湿地中的树木。此外,在三种类型的湿地中,河岸带和沼泽区心材 CH_4 浓度偏高,这两个区域受水淹的频率较高,水淹时间较长,而泥炭地积水条件不如河岸带和沼泽区,故其生境中的树木对 CH_4 的运输潜力低于其他两种类型的湿地。

对基径和胸径处心材 CH_4 浓度的观测表明,湿地(河岸带、沼泽、泥炭地)基径处心材 CH_4 浓度均高于胸径处,这表明 CH_4 可能来自土壤深处。尽管大部分乔木没有数量众多的通气组织,但在特定生境例如湿地环境中,通气组织普遍存在并可以介导气体从根部向上的纵向运输^[30], 纵向运输通常表现为树木基部观测到高 CH_4 排放,且随高度增加,树干 CH_4 排放量逐渐降低^[13,31]。在本研究中,心材 CH_4 浓度与胸径正相关,表明胸径越大,树木越高,其根系可以进入更深的土壤厌氧层,从而导致更高的水势将土壤深处的 CH_4 传输至树干。此外,基径处心材 CH_4 浓度与土壤温度和土壤含水率正相关,作为最接近土壤界面的取样点,基径处心材 CH_4 浓度和影响土壤 CH_4 生成的环境因子之间的关系可能更为密切,温度和含水率升高促进了土壤产甲烷微生物的活动,在基径处更容易观测到心材 CH_4 浓度对土壤环境的响应。

3.2 阔叶树和针叶树心材 CH_4 浓度变化

本研究通过对比针阔叶树心材 CH_4 浓度变化,发现阔叶树心材 CH_4 浓度高于针叶树,为进一步验证我们的结果,通过文献汇总的数据进行分析,同样发现阔叶树心材 CH_4 浓度显著高于针叶树 ($P<0.05$),这可能与二者不同的生长策略有关。相比于针叶树,阔叶树通常采取资源获取策略,较强的光合作用和较多的叶片气孔导致其蒸腾作用强烈^[32],而针叶树叶面积小,叶片气体交换率与茎木质部的运输效率较低^[33],因此对于气体(如 O_2 或 CH_4) 和水分的纵向运输能力不如阔叶树。在本研究的四种不同立地类型中,针叶树在土壤含水

率高的生境中(沼泽和沿岸带)难以生存,而阔叶树却可以在这些积水条件良好的生境中生长,也表明阔叶树比针叶树在心材中有更大潜力积累或传输土壤生成 CH_4 的能力。此外,由于阔叶树的树干液流速率高于针叶树^[15],也会引起其心材 CH_4 浓度增加。然而,尽管本研究中心材 CH_4 浓度范围均在目前已报道的文献数据范围中,但总体数值远低于大部分研究的平均值,甚至其 CH_4 浓度未达大气中 CH_4 浓度的平均水平($1.66 \mu\text{L/L}$),可能表明大兴安岭多年冻土区树木不是潜在的 CH_4 排放源。

3.3 树皮与心材细菌群落特征

在本研究中,树皮和心材栖息有相同或各自特有的菌属。这些植物内生菌可以影响植物生长发育与养分获取^[34]。例如心材中特有的 *Rahnella* 菌属,具有预防和控制植物病害或促进植物生长的有益特性,许多 *Rahnella* 菌株会以不同的方式保护植物免受各种植物致病生物的影响^[35]。栖息在树皮中的细菌属包括 *Bryocella* 属和未命名菌属:1174-901-12,前者有利于抑制松枯梢病^[36],而后者是叶枯病中最主要的优势细菌^[37],表明树皮不同类型的细菌相互作用以保持植物体健康的动态平衡。树皮和心材共有的优势菌属 *norank_f_Mitochondria* 在一些植物茎部被观测到,它们是特有的优势植物内生菌属^[38]。植物不同部位为细菌栖息提供了特定的生态位,因此在特定的植物器官内可能观测到同样的细菌群落。

栖息在树皮与心材中的微生物不仅能够帮助植物维持健康与获取养分,还与 CH_4 产生和消耗息息相关。在之前对于植物内生菌的研究中,通气不良的植物组织往往会观测到产甲烷菌,例如根际、心材等^[12,39]。但这通常与特定的树种有关,例如对水分要求较高的杨属(*Populus*)^[12]。而甲烷氧化菌可以在树皮、植物叶片表面被发现^[40-41],这些植物组织通常有良好的通气条件。本研究并未在心材中发现产甲烷菌,但却在树皮中发现了甲烷氧化菌属(*Methylocella*),这与之前的研究一致,表明树皮有潜力通过这些微生物来减少树干 CH_4 的排放,加之本研究心材中观测到低浓度的 CH_4 ,这些证据初步表明大兴安岭多年冻土区树干并不是主要的 CH_4 排放源,即树干有望在一定程度上作为生态系统中 CH_4 的“汇”^[42]。

4 结论

本研究观测了大兴安岭多年冻土区四种立地类型树木心材 CH_4 浓度,以及树皮和心材中的细菌群落构成,并结合已有关于树木心材 CH_4 浓度的相关文献数据集分析了针阔叶树木心材 CH_4 浓度的差异。我们发现生长在湿地中的树木心材 CH_4 浓度高于山地树木,且湿地树木基径处心材 CH_4 浓度高于胸径处观测到的数值,表明湿地树干 CH_4 可能源自根部对深层土壤中 CH_4 的纵向运输。通过实地调查和目前已有文献的数据分析得知,阔叶树心材 CH_4 浓度高于针叶树,这可能是由于阔叶树蒸腾作用较强所致。此外,我们在树皮和心材中发现了相同的和各自特有的菌属,其中心材中特有优势菌属主要为有益于树木生长的菌属为主,而树皮中则包括了对树木有益或有害的菌属。特殊的,甲烷氧化菌属(*Methylocella*)是树皮中特有的菌属,说明树皮可能在很大程度上削弱了树干 CH_4 排放的规模。总之,本研究初步探究了大兴安岭多年冻土区树木心材 CH_4 浓度特征,为今后深入研究树干 CH_4 通量动态提供数据基础,后续需进一步开展对树干 CH_4 通量的实地观测以精确量化该区域树干 CH_4 收支。

参考文献(References):

- [1] 杨元合,石岳,孙文娟,常锦峰,朱剑霄,陈蕾伊,王欣,郭焱培,张宏图,于凌飞,赵淑清,徐亢,朱江玲,沈海花,王媛媛,彭云峰,赵霞,王襄平,胡会峰,陈世革,黄玫,温学发,王少鹏,朱彪,牛书丽,唐志尧,刘玲莉,方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [2] Rice A L, Butenhoff C L, Shearer M J, Teama D, Rosenstiel T N, Khalil M A K. Emissions of anaerobically produced methane by trees. Geophysical Research Letters, 2010, 37(3): L03807.
- [3] 郭亮,丁九敏,徐侠. 树干甲烷的研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(5): 235-241.
- [4] FAO and UNEP, 2020. The State of the World's Forests 2020-Forests, Biodiversity and People. FAO and UNEP, Rome.
- [5] Matthews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. Global

- Biogeochemical Cycles, 1987, 1(1): 61-86.
- [6] Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, Zhuang Q L. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1325-1346.
- [7] Klaus M, Öquist M, Macháčková K. Tree stem-atmosphere greenhouse gas fluxes in a boreal riparian forest. *Science of The Total Environment*, 2024, 954: 176243.
- [8] Pangala S R, Enrich-Prast A, Basso L S, Peixoto R B, Bastviken D, Hornibrook E R C, Gatti L V, Marotta H, Calazans L S B, Sakuragui C M, Bastos W R, Malm O, Gloor E, Miller J B, Gaudi V. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 2017, 552(7684): 230-234.
- [9] Ranniku R, Mander Ü, Escuer-Gatius J, Schindler T, Kupper P, Sellin A, Soosaar K. Dry and wet periods determine stem and soil greenhouse gas fluxes in a northern drained peatland forest. *Science of The Total Environment*, 2024, 928: 172452.
- [10] Jeffrey L C, Moras C A, Tait D R, Johnston S G, Call M, Sipso J Z, Jeffrey N C, Laicher-Edwards D, Maher D T. Large methane emissions from tree stems complicate the wetland methane budget. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, 128(12): e2023JG007679.
- [11] Wang Z P, Li H L, Wu H H, Han S J, Huang J H, Zhang X M, Han X G. Methane concentration in the heartwood of living trees and estimated methane emission on stems in upland forests. *Ecosystems*, 2021, 24(6): 1485-1499.
- [12] Yip D Z, Veach A M, Yang Z K, Cregger M A, Schadt C W. Methanogenic Archaea dominate mature heartwood habitats of Eastern Cottonwood (*Populus deltoides*). *New Phytologist*, 2019, 222(1): 115-121.
- [13] Zhang C W, Zhang Y X, Luo M, Tan J, Chen X, Tan F F, Huang J F. Massive methane emission from tree stems and pneumatophores in a subtropical mangrove wetland. *Plant and Soil*, 2022, 473(1): 489-505.
- [14] Wang Z P, Han S J, Li H L, Deng F D, Zheng Y H, Liu H F, Han X G. Methane production explained largely by water content in the heartwood of living trees in upland forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(10): 2479-2489.
- [15] Barba J, Bradford M A, Brewer P E, Bruhn D, Covey K, van Haren J, Megonigal J P, Mikkelsen T N, Pangala S R, Pihlatie M, Poulter B, Rivas-Ubach A, Schadt C W, Terazawa K, Warner D L, Zhang Z, Vargas R. Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 18-28.
- [16] Wang Z P, Gu Q, Deng F D, Huang J H, Megonigal J P, Yu Q, Lü X T, Li L H, Chang S, Zhang Y H, Feng J C, Han X G. Methane emissions from the trunks of living trees on upland soils. *The New Phytologist*, 2016, 211(2): 429-439.
- [17] Flanagan L B, Nikkel D J, Scherloski L M, Tkach R E, Smits K M, Selinger L B, Rood S B. Multiple processes contribute to methane emission in a riparian cottonwood forest ecosystem. *New Phytologist*, 2021, 229(4): 1970-1982.
- [18] Epron D, Mochidome T, Tanabe T, Dannoura M, Sakabe A. Variability in stem methane emissions and wood methane production of different tree species in a cold temperate mountain forest. *Ecosystems*, 2023, 26(4): 784-799.
- [19] 程国栋. 中国冻土研究近今进展. *地理学报*, 1990, 45(2): 220-224.
- [20] Wan S Z, Lin G G, Liu B, Ding Y D, Li S L, Mao R. Contrasting responses of soil phosphorus pool and bioavailability to alder expansion in a boreal peatland, Northeast China. *Catena*, 2022, 212: 106128.
- [21] 薛璟, 陈辛安, 王宪伟, 孙晓新. 大兴安岭多年冻土区两种水体温室气体浓度动态与冬季储存特征. *生态学报*, 2024, 44(5): 1918-1927.
- [22] Ramm E, Liu C Y, Mueller C W, Gschwendtner S, Yue H Y, Wang X W, Bachmann J, Bohnhoff J A, Ostler U, Schlöter M, Rennenberg H, Dannenmann M. Alder-induced stimulation of soil gross nitrogen turnover in a permafrost-affected peatland of Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 172: 108757.
- [23] 王宪伟, 孙丽, 杜宇, 谭稳稳, 宋长春, 宋艳宇, 郭跃东, 陈宁, 张豪. 大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤性质与微生物呼吸活性研究. *湿地科学*, 2021, 19(6): 682-690.
- [24] 陈辛安, 薛璟, 王宪伟, 孙晓新. 大兴安岭多年冻土区河流湿地生长季温室气体排放特征. *环境科学学报*, 2023, 43(11): 384-397.
- [25] Covey K R, Wood S A, Warren II R J, Lee X H, Bradford M A. Elevated methane concentrations in trees of an upland forest. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(15): L15705.
- [26] Ward N D, Indivero J, Gunn C, Wang W, Bailey V, McDowell N G. Longitudinal gradients in tree stem greenhouse gas concentrations across six Pacific northwest coastal forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(6): 1401-1412.
- [27] Mochidome T, Epron D. Drivers of intra-individual spatial variability in methane emissions from tree trunks in upland forest. *Trees*, 2024, 38(3): 625-636.
- [28] Gaudi V, Gowing D J G, Hornibrook E R C, Davis J M, Dise N B. Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(17): 2157-2160.
- [29] Li H L, Zhang X M, Deng F D, Han X G, Xiao C W, Han S J, Wang Z P. Microbial methane production is affected by secondary metabolites in the heartwood of living trees in upland forests. *Trees*, 2020, 34(1): 243-254.

- [30] Jackson M B, Armstrong W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. *Plant Biology*, 1999, 1(3): 274-287.
- [31] Moldaschl E, Kitzler B, Machacova K, Schindler T, Schindlbacher A. Stem CH₄ and N₂O fluxes of *Fraxinus excelsior* and *Populus alba* trees along a flooding gradient. *Plant and Soil*, 2021, 461(1): 407-420.
- [32] Garnet K N, Megonigal J P, Litchfield C, Taylor G E. Physiological control of leaf methane emission from wetland plants. *Aquatic Botany*, 2005, 81(2): 141-155.
- [33] Zhang L, Chen Y J, Hao G Y, Ma K P, Bongers F, Sterck F J. Conifer and broadleaved trees differ in branch allometry but maintain similar functional balances. *Tree Physiology*, 2020, 40(4): 511-519.
- [34] Golinska P, Wypij M, Agarkar G, Rathod D, Dahm H, Rai M. Endophytic Actinobacteria of medicinal plants: diversity and bioactivity. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2015, 108(2): 267-289.
- [35] Xu S, Zhao Y R, Peng Y, Shi Y X, Xie X W, Chai A L, Li B J, Li L. Comparative genomics assisted functional characterization of *Rahnella aceris* ZF458 as a novel plant growth promoting rhizobacterium. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 850084.
- [36] 谢宪. 赤松针叶内生微生物群落结构对松枯梢病的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [37] 王俊凯, 刘峥, 申东晨, 董爱荣. 红豆杉健康与感叶枯病针叶内生微生物多样性. *森林工程*, 2023, 39(4): 10-18.
- [38] 陈思宇, 孙妍, 肖健, 赵天义, 杨尚东. 果实红色与黄色番茄品种植株茎部内生细菌群落结构及代谢功能特征. *微生物学报*, 2022, 62(2): 602-616.
- [39] Praeg N, Illmer P. Microbial community composition in the rhizosphere of *Larix decidua* under different light regimes with additional focus on methane cycling microorganisms. *Scientific Reports*, 2020, 10: 22324.
- [40] Doronina N V, Ivanova E G, Suzina N E, Trotsenko Y A. Methanotrophs and methylobacteria are found in woody plant tissues within the winter period. *Microbiology*, 2004, 73(6): 702-709.
- [41] Jeffrey L C, Maher D T, Chiri E, Leung P M, Nauer P A, Arndt S K, Tait D R, Greening C, Johnston S G. Bark-dwelling methanotrophic bacteria decrease methane emissions from trees. *Nature Communications*, 2021, 12: 2127.
- [42] Gauci V, Pangala S R, Shenkin A, Barba J, Bastviken D, Figueiredo V, Gomez C, Enrich-Prast A, Sayer E, Stauffer T, Welch B, Elias D, McNamara N, Allen M, Malhi Y. Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces. *Nature*, 2024, 631(8022): 796-800.