

引用格式: 蒋豪, 涂卫国, 王玉杰, 李玲, 付明霞, 张远彬. 疏伐抚育对大熊猫栖息地八月竹纯林土壤细菌群落多样性的影响[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 19-27. JIANG Hao, TU Weiguo, WANG Yujie, LI Ling, FU Mingxia, ZHANG Yuanbin. Thinning effect on the diversity of soil bacterial communities in dwarf bamboo (*Chimonobambusa szechuanensis*) pure stands in Chinese giant panda habitat [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 19-27.

## 疏伐抚育对大熊猫栖息地八月竹纯林 土壤细菌群落多样性的影响

蒋豪<sup>1</sup>, 涂卫国<sup>2</sup>, 王玉杰<sup>2</sup>, 李玲<sup>2</sup>, 付明霞<sup>3</sup>, 张远彬<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2. 四川省自然资源科学研究院, 成都 610015;  
3. 荣经县大相岭自然保护区管理局, 四川 雅安 625200)

**摘要:** 疏伐抚育可改善大熊猫栖息地土壤质量和森林生态系统功能、提升生物多样性。然而, 现有研究主要以提升人工用材林木材产量为主, 对以提升自然保护地栖息地功能属性为目的的森林疏伐抚育如何影响地下生态过程, 特别是土壤微生物群落变化研究相对较少。本文以大熊猫国家公园大相岭片区八月竹 (*Chimonobambusa szechuanensis*) 纯林为研究对象开展疏伐抚育, 分析两种处理对纯林土壤理化性质和细菌微生物组的影响, 重点研究疏伐抚育一年后土壤细菌群落多样性变化。结果表明: (1) 不同疏伐抚育模式对土壤细菌群落影响差异较大。以促进主食竹更新复壮为目的的疏伐抚育模式 (处理 A) 显著提高了土壤细菌群落 Sobs 指数 ( $P=0.024$ ) 和 Chao 指数 ( $P=0.027$ ), 表现出更高的群落丰富度。而以促进纯竹林向大熊猫更为喜爱的竹阔混交林转变的疏伐抚育模式 (处理 B) 对纯林保留带中地下生态系统的影响并不显著。(2) LEfSe 分析 (LDA score  $>3$ ,  $P<0.05$ ) 发现, 八月竹林土壤细菌群落核心菌门为酸杆菌门 (Acidobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria)。与八月竹纯林相比, 处理 A 显著提高了土壤 pH 值 ( $pH=5.05$ ,  $P<0.001$ ), 但有机碳 ( $50.2\text{ g/kg}$ ,  $P<0.001$ )、全氮 ( $5.04\text{ g/kg}$ ,  $P<0.05$ ) 和微生物生物量碳 ( $700.54\text{ mg/kg}$ ,  $P<0.01$ ) 含量均显著降低。(3) RDA 分析表明土壤细菌群落门丰度变化主要与 pH 值 ( $r^2=0.45$ ,  $P<0.05$ ) 和全氮含量 ( $r^2=0.39$ ,  $P<0.05$ ) 变化有关。上述研究结果可以为进一步研究与纯竹林疏伐抚育相关的土壤微生物功能菌群提供参考。

**关键词:** 大熊猫国家公园; 八月竹; 纯林; 疏伐; 土壤微生物组; 疏伐抚育

**中图分类号:** S75

**文献标志码:** A

疏伐抚育是保持森林生态系统及其服务功能长期健康稳定的重要措施。研究发现, 疏伐抚育不仅会影响地上部物种多样性<sup>[1-3]</sup>、水分和光照<sup>[4-6]</sup>, 同时还将直接或间接地作用于地下生态系统, 特别是土壤性质<sup>[7]</sup>、微生物群落结构和功能<sup>[8-9]</sup>, 最终影响植物的生长。这是一种典型的、受人为措施干预后主要环境因子改变引发的植物—土壤反馈过程, 土

壤微生物群落如何应答是该过程研究的重要内容<sup>[10]</sup>。有研究表明, 低强度疏伐能迅速提高高密度云杉林内光照、水分和养分的可用性, 增强 O 层土壤微生物活性, 促进土壤养分释放<sup>[11]</sup>。但也有研究指出, 低强度疏伐对土壤微生物群落多样性影响较小<sup>[12]</sup>。由此可见, 疏伐抚育对土壤微生物群落的影响受多种因素调控 (例如: 疏伐方式、疏伐强度、森

收稿日期 (Received date): 2022-10-11; 改回日期 (Accepted date): 2023-02-24

基金项目 (Foundation item): 四川省科技计划 (2021YFS0280, 2020YFS0023, 2022114, 2018SZDX0035)。[Science and Technology Projects in Sichuan Province (2021YFS0280, 2020YFS0023, 2022114, 2018SZDX0035)]

作者简介 (Biography): 蒋豪 (1983-), 男, 四川汶川人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 植物生态学。[JIANG Hao (1983-), male, born in Wenchuan, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on plant ecology] E-mail: jianghao@imde.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 张远彬 (1973-), 男, 四川宜宾人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 植物生态学。[ZHANG Yuanbin (1973-), male, born in Yibin, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on plant ecology] E-mail: zhangyb@imde.ac.cn

林类型、环境改变等),其调控方向存在较大的不确定性<sup>[13]</sup>。

荥经县是大熊猫国家公园大相岭山系野生大熊猫分布最多的区域,数量为 17 只<sup>[14]</sup>。受前期森林滥采滥伐影响,该山系部分区域小径竹类通过克隆生长,迅速占据生态位,形成了众多面积不等的小径竹纯林,妨碍了大熊猫的正常活动,同时也带来了一定的生态风险。调查发现,作为当地自然分布面积较大的一类小径竹——八月竹(*Chimonobambusa szechuanensis*),大熊猫很少进入密度较大的八月竹纯林活动,仅在纯林周围采食竹叶或茎秆<sup>[15-16]</sup>。因此,及时开展小径竹纯林疏伐抚育研究,优化纯竹林结构和功能,对快速恢复和提升栖息地质量十分重要。目前,以提升自然保护地栖息地功能属性为目的的疏伐抚育措施如何影响地下生态过程研究相对较少,土壤微生物对小径竹类的生长反馈机制作用仍不清楚。

本研究参考《森林抚育规程》(GB/T 15781—2015),结合大熊猫国家公园大相岭片区八月竹纯林实际情况开展疏伐抚育作业。通过比较土壤理化性质、细菌微生物组结构功能差异,探讨疏伐抚育对纯竹林土壤微生物群落多样性的影响。重点阐释以下两个基本问题:(1)疏伐抚育如何重塑小径竹类纯林土壤微生物群落结构和功能;(2)疏伐抚育后,环境因子改变与微生物多样性变化的潜在联系。以期从土壤微生物角度,为筛选和集成适于大熊猫栖

息地纯竹林结构优化模式提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

在四川省雅安市荥经县大熊猫国家公园大相岭片区选择八月竹(*C. szechuanensis*)纯林(29°34'N, 102°53'E,海拔 2126 m)开展疏伐抚育(图 1)。该片区位于大相岭山系大熊猫种群分布核心地带,海拔 199~2500 m,年平均气温 12.4℃,最冷月 1 月均温 -7℃,最热月 7 月均温 22℃,年降雨量 2300 mm,属亚热带高山山地气候。植被类型为常绿-落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、寒温性针叶林和灌丛。八月竹林为该山系林下重要灌木层片,或森林破坏后形成八月竹林丛,成竹株高最高 6 m,平均 2.3 m,平均基径 1.1 cm,每平方米分布 22 秆。

### 1.2 试验设计与样本采集

试验共设置对照(自然分布纯林)、处理 A 和处理 B 共 3 种处理。每种处理包括 6 个重复,共 18 块样地。其中,处理 A 和处理 B 系当地生态廊道建设中纯竹林结构优化的两种重要尝试。处理 A 旨在促进生态廊道内主食竹健康生长,缓和当前较强的种内竞争关系,促进其更新复壮。处理 B 旨在提高疏伐带中生物多样性,根据实际情况适当补植阔叶树种桦木,促进纯竹林向大熊猫更为喜爱的竹阔混交林转变。本研究主要比较两种处理与对照的差

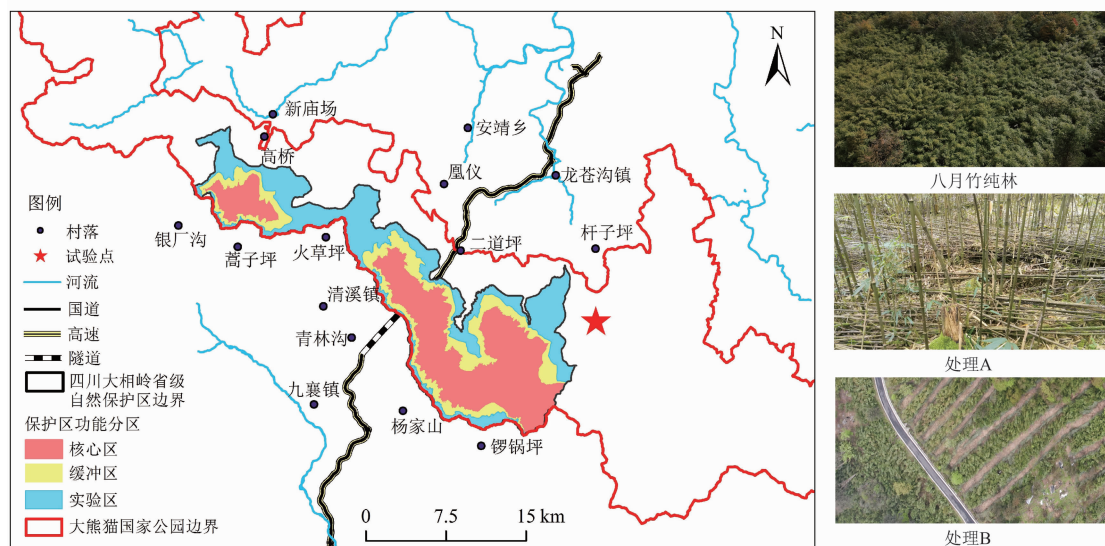


图 1 研究区域

Fig. 1 Location of the study sites

异,处理 A 和处理 B 之间的差异不作为本研究重点。具体设置如下:对照 22 秆/ $\text{m}^2$ 。调查发现,自然分布的八月竹林在 10 ~ 12 秆/ $\text{m}^2$  时生长良好,发笋量适中。因此,处理 A 参考生长伐特点,单个样地大小设置为 10 m  $\times$  10 m,疏伐强度约为 45%,即疏伐后每平米保留八月竹 12 竿。依据自然分布中桦木冠幅,处理 B 参考机械抚育,单个样地 8 m  $\times$  10 m,包括 3 m 宽的疏伐带和 5 m 宽的保留带,其中保留带中竹竿密度约为 22 秆/ $\text{m}^2$ 。疏伐抚育时间为 2018 年 9 月。

2020 年 5 月,使用取土环刀(直径 70 mm,深度 52 mm)五点法采集不同处理 0 ~ 20 cm 土壤样本,每个样地 5 份并均匀混合为 1 份,18 块样地共 18 份。其中,处理 B 所取土样为与疏伐带相邻处保留带中的土壤(水平距离小于 1 m,主要考虑林缘效应)。取样时去除表面浮土,去除土壤中植物残体和石砾,经 2 mm 筛网过筛处理后,装入无菌离心管并置于冰盒中迅速带回实验室 - 80℃ 冰箱中保存备用。

### 1.3 土壤理化性质测定

土壤 pH 值采用玻璃电极法测定,水土比为 2.5:1,土壤有机碳和全氮含量采用元素分析仪测定(Elementar Vario EL)测定。土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[17]</sup>。

### 1.4 土壤细菌 DNA 提取及测序

使用 E. Z. N. A. ® Soil DNA Kit (Omega Bio-Tek, Norcross, 美国)提取土壤样本微生物 DNA,通过 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性,并用 NanoDrop 2000 微量紫外分光光度计检测 DNA 溶液的浓度和纯度。

使用 16S rRNA 基因引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对细菌的 V3 ~ V4 区进行扩增<sup>[18]</sup>。PCR 产物经 AxyPrep 凝胶回收试剂盒 (Axygen, 美国)回收后,采用 Illumina MiSeq 平台测序,测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

### 1.5 数据处理和统计分析

使用 Trimmomatic<sup>[19]</sup> 和 FLASH<sup>[20]</sup> 软件对测序得到的双端序列数据进行拼接和质控过滤。使用 UPARSE 软件按照 97% 相似性对非重复序列(不含单序列)进行操作分类单元(Operational taxonomic units, OTUs)聚类<sup>[21]</sup>。使用 RDP classifier 贝叶斯算

法(<http://rdp.cme.msu.edu/>)参考 Silva 数据库<sup>[22]</sup>对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析(置信度阈值设置为 70%),该部分在 QIIME 中完成<sup>[23]</sup>。按最小样本序列数进行序列抽平处理。使用 QIIME 分析土壤细菌群落的  $\alpha$ -多样性,包括反映群落丰富度的 Sobs 指数和 Chao 指数,反映群落多样性的 Shannon 指数以及反映群落覆盖度的 Coverage 指数,并通过 Welch's t-test 检测样本间差异。通过线性判别分析(LDA, linear discriminant analysis)效应大小(LEfSe)对判别分类群进行显著检索<sup>[24]</sup>。采用 SPSS 17.0 软件对本研究中土壤理化因子进行一元方差分析(one-way ANOVA),平均数间的多重比较采用 Tukey 检验( $P < 0.05$ )。通过 VIF 方差膨胀因子分析后,采用 RDA 分析判断土壤理化因子与微生物菌群的关系,并基于 Spearman 等级相关系数绘制门水平丰度前 50 的门与变化因子的相关性 Heatmap 图。

## 2 结果与分析

### 2.1 疏伐抚育对八月竹纯林土壤细菌群落结构的影响

为解析两种疏伐抚育模式对八月竹纯林土壤细菌群落结构的影响,对 3 种处理共 18 个土壤样本进行细菌多样性测序分析。测序共产生 836 818 个原始序列,每个样本序列数从 35 865 到 69 611 不等。在 97% 相似水平下注释共得到 5987 个 OTUs,涉及 35 个门、98 个纲、251 个目、417 个科和 693 个属的细菌分类。 $\alpha$  多样性分析发现(表 1),与对照相比,处理 A 改变了土壤细菌群落丰富度和覆盖度,但对群落多样性影响并不显著。处理 A 中土壤细菌群落丰富度较高,表现为更高的 Sobs 指数值和 Chao 指数值,但群落覆盖度降低, Coverage 指数值显著低于对照。处理 B 对土壤细菌群落  $\alpha$  多样性影响较小,与对照相比差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

分类学比较分析显示,门水平上八月竹土壤细菌群落主要由变形杆菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteria)和浮霉菌门(Planctomycetes)组成,平均相对丰度之和达 80% 以上(图 2a)。对平均丰度大于 5% 的分类学纲水平进行统计分析发现

表 1 疏伐抚育对土壤细菌群落 α-多样性的影响

Tab. 1 Effects of thinning on α-diversity of soil bacteria community

样品	Sobs 指数	Chao 指数	Shannon 指数	Coverage 指数
纯林	2152.80 ± 108.60 b	3062.10 ± 169.91 b	6.10 ± 0.16 a	0.974 ± 0.002 a
处理 A	2486.20 ± 220.70 a	3429.20 ± 237.90 a	6.33 ± 0.22 a	0.971 ± 0.002 b
处理 B	2196.20 ± 138.00 b	3069.50 ± 246.79 b	6.18 ± 0.07 a	0.974 ± 0.002 a

注:同一列不同字母代表组间差异经 Welch's t-test 检测具有统计学意义(平均值 ± 标准差,  $n=6$ ,  $P<0.05$ )。

(图 2b), 3 种处理下土壤细菌群落中甲型( $\alpha$ )变形杆菌纲(Alpha proteobacteria)、酸杆菌纲(Acidobacteriia)、放线菌纲(Actinobacteria)、纤维杆菌纲(Ktedonobacteria)、 $\gamma$ -变形菌纲(Gamma proteobacteria)和 $\delta$ -变形菌纲(Delta proteobacteria)占主导。

2.2 疏伐抚育对八月竹纯林土壤细菌群落物种组成的影响

三种处理下,土壤细菌分类水平从门到属存在较大差异。LEfSe 分析发现(LDA 值  $> 3$ ,  $P < 0.05$ ),八月竹纯林土壤细菌群落丰度较高的物种主要集中在酸杆菌门、放线菌门和变形菌门。处理 A 中除放线菌门和变形菌门被检测到具有较高丰度外,还存在大量不同于对照的土壤细菌的特殊类群(表 2),包括绿弯菌门、厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidetes),而处理 B 中丰度较高的物种

主要集中在酸杆菌门和绿弯菌门。

表 2 处理 A 中土壤细菌物种 LEfSe 分析

Tab. 2 Distinct soil bacterial species under treatment

A by LEfSe analysis

物种	绝对丰度平均值	LDA 值	P
纲:AD3	4.34	3.78	0.018
纲:Latescibacteria	3.76	3.24	0.009
目:Gaiellales	3.99	3.39	0.025
目:IMCC26256	4.34	3.53	0.044
目:Microtrichales	3.50	3.13	0.022
目:MBNT15	3.70	3.16	0.034
目:S085	3.62	3.09	0.006
目:Clostridiales	3.74	3.22	0.032
科:Xanthobacteraceae	4.03	3.41	0.008
科:Desulfarculaceae	3.71	3.23	0.010
科:bacteriap25	3.36	3.08	0.018
科:SC_I_84	3.51	3.10	0.014
属:Rhodomicrobium	3.82	3.32	0.004
属:Pedomicrobium	3.69	3.22	0.014
属:MND14	3.62	3.07	0.044
属:Haliangium	3.93	3.34	0.021

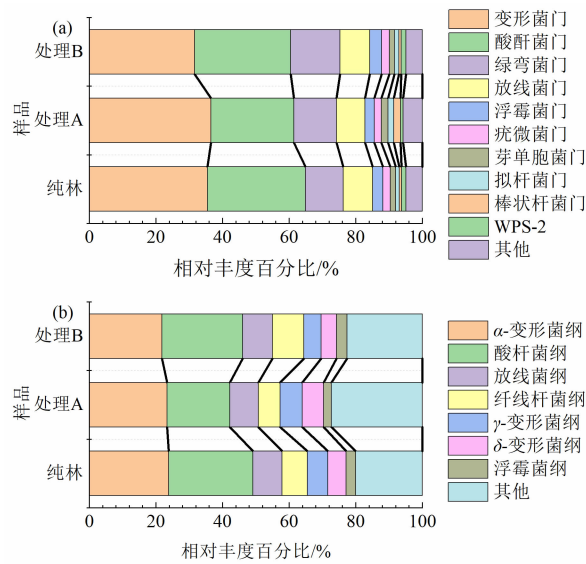


图 2 疏伐抚育对土壤细菌群落分类学 (a) 门水平和 (b) 纲水平组成的影响

Fig. 2 Effects of thinning on taxonomy of bacterial diversity on (a) phylum and (b) class level

2.3 疏伐抚育对土壤理化因子和微生物生物量碳氮含量的影响

与对照相比,处理 A 中土壤 pH 值显著提高,土壤有机碳、全氮和微生物生物量碳含量显著降低,但碳氮比和微生物生物量氮变化未达显著水平(表 3)。处理 B 中除有机碳含量增加达到显著水平外,其他土壤理化性质变化与对照差异并不显著。RDA 分析显示门水平上 RDA1 轴解释度为 53.76%, RDA2 轴解释度为 4.56%,土壤细菌多样性组成主要与 pH ( $r^2 = 0.45$ ,  $P = 0.015$ ) 和全氮 ( $r^2 = 0.39$ ,  $P = 0.029$ ) 显著相关(图 3)。

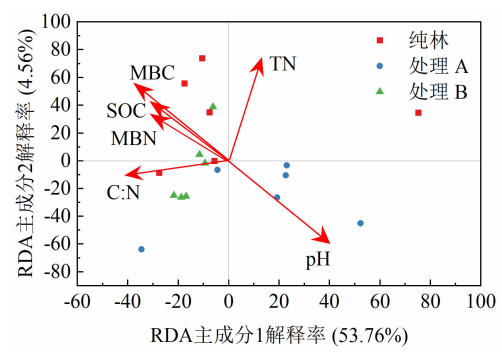


图3 土壤细菌多样性与 pH、TN、SOC、MBC、MBN 和碳氮比的相关性 RDA 分析 (门水平)

Fig. 3 Relationship among soil bacterial diversity, pH, TN, SOC, MBC, MBN and C:N ratio (phylum level) by Redundancy analysis

6 种细菌门丰度仅与一种因子变化呈显著相关关系 (图 4)。其中,除 *Chloroflexi* 与碳氮比 ( $r^2 = 0.22, P = 0.048$ ) 变化呈显著的正相关关系外, *Spirochaetes*、*Bacteroidetes*、*Gemmatimonadetes*、*WPS-2*

和 *Elusimicrobia* 分别仅与 TN、MBN、SOC 和 pH 值变化呈显著的负相关关系。*Acidobacteria* 分别与 MBC ( $r^2 = 0.31, P = 0.016$ )、MBN ( $r^2 = 0.29, P = 0.02$ ) 和碳氮比 ( $r^2 = 0.34, P = 0.011$ ) 变化呈显著的正相关关系,而 *Margulisbacteria*、*GAL15*、*Fibrobacteres*、*Patescibacteria* 和 *Dependentiae* 等 5 种细菌门丰度分别与两种因子变化呈显著的负相关关系 (图 4)。此外,6 种细菌门丰度受多种因子变化影响。例如, *Rokubacteria* 不仅和 pH 值变化存在显著的正相关关系,同时与 SOC 和 TN 变化呈显著的负相关关系。

3 讨论

疏伐抚育是一种较强的人为干预措施,适当的疏伐抚育不仅能降低植物间的竞争强度、促进植物生长、提升林分质量,同时还能提高土壤微生物活性,增强微生物调控土壤养分循环的能力,在保持生

表3 疏伐抚育对土壤理化因子和微生物生物量碳氮含量的影响

Tab. 3 Effects of thinning on soil physical and chemical properties, microbial biomass carbon and nitrogen content

样品	土壤 pH	有机碳含量/ (g/kg)	全氮含量/ (g/kg)	碳氮比	微生物生物量碳 含量/(mg/kg)	微生物生物量氮 含量/(mg/kg)
纯林	4.45 ± 0.04 b	73.42 ± 2.73 b	6.50 ± 0.35 a	11.34 ± 0.27ab	992.54 ± 53.09 a	221.06 ± 11.71 ab
处理 A	5.05 ± 0.08 a	50.20 ± 1.58 c	5.04 ± 0.12 b	9.78 ± 0.34b	700.54 ± 32.53 b	187.19 ± 14.95 b
处理 B	4.51 ± 0.05 b	85.85 ± 1.74 a	6.39 ± 0.56 ab	13.76 ± 1.55a	1086.2 ± 80.08 a	243.89 ± 17.95 a
VIF 值	3.22	—	4.29	2.98	7.95	4.77

注:VIF 为方差膨胀因子。同一列不同字母代表组间差异经 Tukey 检测具有统计学意义 (平均值 ± 标准误,  $n = 6, P < 0.05$ )。

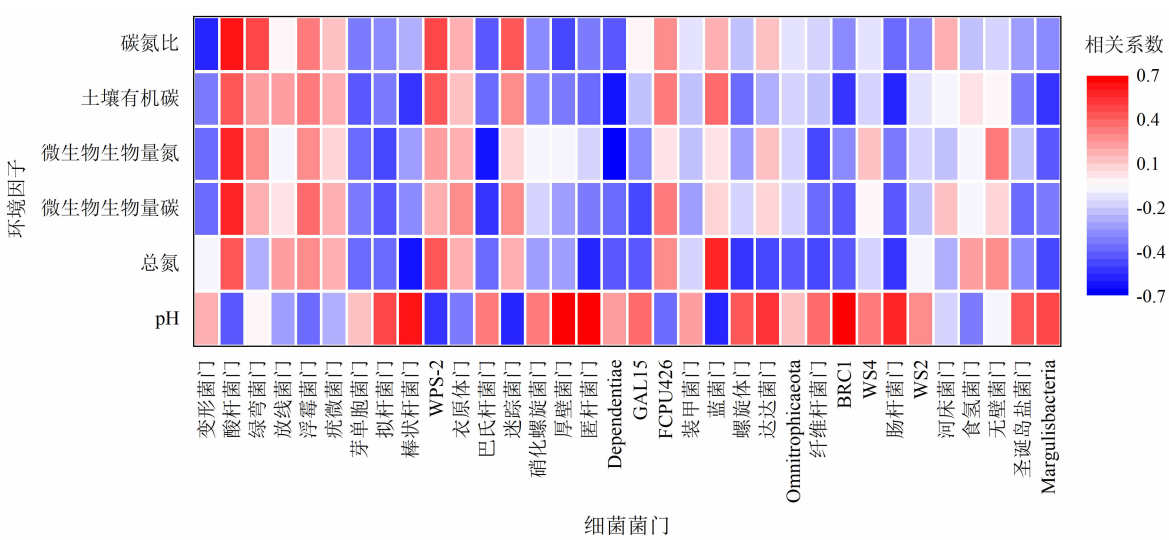


图4 土壤细菌多样性与 pH、TN、SOC、MBC、MBN 和碳氮比的相关性 Heatmap 分析 (门水平)

Fig. 4 Relationship among soil bacterial diversity, pH, TN, SOC, MBC, MBN and C:N ratio (phylum level) by Heatmap analysis



境稳定方面发挥积极作用<sup>[4, 25-26]</sup>。本研究中,处理 B 旨在提高疏伐带生物多样性,对保留带中土壤微环境改变较小,因而土壤细菌群落表现出较强的稳定性;而经过强度为 45% 的疏伐抚育(处理 A)后,土壤细菌群落的丰富度和覆盖度变化显著(表 1),这可能与疏伐降低林分密度,改善林下光照和水分条件,为土壤微生物活动创造了有利的生存条件有关<sup>[27-28]</sup>。由此可见,不同的疏伐抚育模式对八月竹林土壤微生物群落影响差异较大,深入研究微生物群落变化的驱动因素对预测群落如何应对外界干扰十分重要<sup>[25]</sup>。

分类学比较分析发现,3 种处理下变形杆菌门、酸杆菌门和绿弯菌门等 5 种菌门构成了八月竹纯林土壤细菌的优势类群(图 2a),这说明八月竹的生长发育对土壤核心菌群具有较强的选择作用<sup>[29-30]</sup>。自然界中,酸杆菌分布较广,约占细菌总量的 20%~50%,是土壤生态系统构建的核心物种。有研究表明,当森林土壤被扰动处理后,变形杆菌门的丰度最大,而未被扰动的原始林土壤中的酸杆菌门丰度最大<sup>[31]</sup>。已有研究发现,酸杆菌在杉木人工林土壤物质循环中发挥重要作用<sup>[32]</sup>,土壤 pH 值是驱动酸杆菌门动力学的关键环境因素<sup>[33]</sup>。与对照相比,处理 A 中酸杆菌纲丰度下降明显(图 2b),这说明该处理对林下生境和土壤细菌群落具有较大的扰动作用。

有研究认为,微生物主要通过调节群落结构而不是改变生物量来适应疏伐引起的生物和非生物因素变化<sup>[13]</sup>。本研究中,绿弯菌门,厚壁菌门和拟杆菌门均被检测到仅在处理 A 土壤中具有较高的丰度(LDA 值 > 3,  $P < 0.05$ ),说明它们对处理 A 引起的生境改变较为敏感。绿弯菌门细菌在硝化作用中发挥重要作用<sup>[34]</sup>,常被用于降低对象基质中的氮含量。它们通过发酵碳水化合物,将其他复杂的聚合有机化合物降解为低分子量的物质,以保障自己和其他细菌种群的生长<sup>[35]</sup>。与对照相比,处理 A 中土壤全氮含量显著降低,这可能与绿弯菌门丰度较高有关。

此外,土壤性质的改变对细菌群落的组成和丰富度具有较强影响。本研究中,细菌群落多样性主要与土壤 pH 值和全氮含量变化呈显著相关关系(图 3)。与对照相比,处理 A 中林下生境的改变对土壤 pH 值影响较大,土壤全氮含量显著降低(表

3)。这可能是由于土壤 pH 值升高,增加了有机质的可溶性,为微生物提供了大量富含碳氮基团的物质,促进土壤氮素的矿化作用,同时更多可利用的无机氮源被植物生长吸收所致<sup>[36]</sup>。有研究指出,大多数细菌类群对土壤 pH 值变化的耐受性相对较差<sup>[37]</sup>。因此,研究疏伐抚育后土壤 pH 值变化与细菌群落多样性之间的关系具有重要参考意义。研究表明,疏伐能迅速改善高密度云杉人工纯林地表阴湿环境,增强 O 层土壤微生物活性与土壤矿化过程,促进土壤养分释放<sup>[11]</sup>,但较高的氮素水平也可能降低生态系统的生物多样性,影响土壤微生物的生长、组成和功能,进而改变一些关键地下生态过程<sup>[38-39]</sup>。研究区八月竹纯林土壤全氮含量为 5.04~6.5 g/kg,高于《全国第二次土壤普查养分分级标准》全氮含量为 2 g/kg 的一级标准。与对照相比,处理 A 显著降低了土壤全氮含量,土壤细菌群落丰富度也显著提高,而处理 B 无显著差异。土壤微生物生物量碳的数量在平衡土壤碳释放与有机质储存之间起着重要作用,常被视为环境因子变化的敏感性指标<sup>[40]</sup>。与对照相比,处理 A 导致土壤微生物生物量碳含量显著降低,而处理 B 中该指标变化并不明显。这再一次印证了处理 A 显著影响了八月竹生长的土壤微环境,而处理 B 对纯竹林改造产生的影响相对较小。

## 4 结论

采用不同疏伐抚育模式对八月竹纯林进行结构功能改造后发现,以促进生态廊道内主食竹更新复壮为目的的疏伐抚育模式对土壤细菌群落影响较大,表现出更高的群落丰富度。相对应的是,以促进纯竹林向大熊猫更为喜爱的竹阔混交林转变的疏伐抚育模式所产生的林缘效应对纯林保留带中地下生态系统的影响相对较小。八月竹纯林土壤细菌群落核心菌门为酸杆菌门、放线菌门和变形菌门。绿弯菌门对前一种处理引起的生境改变较为敏感,绿弯菌门较高的丰度可能导致土壤全氮含量下降。八月竹林土壤细菌群落门丰度变化主要与 pH 值和全氮含量变化有关。

## 参考文献 (References)

- [1] VERSCHUYL J, RIFFELL S, MILLER D, et al. Biodiversity

- response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests – A meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **261**: 221 – 232. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.10.010
- [2] 宋启亮,董希斌,李芝茹. 不同改造方式对大兴安岭3种类型低质林生物多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, **40**(4): 85 – 89. [SONG Qiliang, DONG Xibin, LI Zhiru. Effects of different transformation measures on biodiversity of three types of low-quality forest stands in Great Xing'an Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(4): 85 – 89] DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.04.021
- [3] 杨育林,李贤伟,周义贵,等. 林窗式疏伐对川中丘陵区柏木人工林生长和植物多样性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20**(6): 971 – 977. [YANG Yulin, LI Xianwei, ZHOU Yigui, et al. Effects of gap thinning on growth and diversity of a cypress plantation in the hilly region of central Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, **20**(6): 971 – 977] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.05004
- [4] 陈绍栓,许建伟,吴载璋,等. 不同强度疏伐改造对马尾松林分水源涵养功能时空格局的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(20): 6753 – 6760. [CHEN Shaoshuan, XU Jianwei, WU Zaizhang, et al. Effects of different thinning intensities on temporal and spatial patterns of water conservation of *Pinus massoniana* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(20): 6753 – 6760] DOI: 10.5846/stxb201608081628
- [5] DEL CAMPO A D, GONZÁLEZ-SANCHIS M, MOLINA A J, et al. Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, **438**: 163 – 175. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.02.020
- [6] MOLINA A J, GONZÁLEZ-SANCHIS M, BIEL C, et al. Ecohydrological turnover in overstocked Aleppo pine plantations: Does the effect of thinning, in relation to water, persist at the mid-term? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **483**: 118781. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118781
- [7] 李平,李凤汀,范川,等. 川中丘陵区柏木低效林改造模式植物多样性对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(8): 2667 – 2675. [LI Ping, LI Fengting, FAN Chuan, et al. Effects of plant diversity on soil organic carbon under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* in the hilly region of central Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(8): 2667 – 2675] DOI: 10.5846/stxb201307181913
- [8] LIN Wanrou, WANG Pihan, CHEN Wencheng, et al. Responses of soil fungal populations and communities to the thinning of *Cryptomeria Japonica* forests [J]. *Microbes and Environments*, 2016, **31**(1): 19 – 26. DOI: 10.1264/jsme2.ME15127
- [9] KIM S J, LI G L, HAN S H, et al. Microbial biomass and enzymatic responses to temperate oak and larch forest thinning: Influential factors for the site-specific changes [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2068 – 2079. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.153
- [10] BEVER J D. Soil community feedback and the coexistence of competitors: Conceptual frameworks and empirical tests [J]. *New Phytologist*, 2003, **157**: 465 – 473. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00714.x
- [11] 王成,庞学勇,包维楷. 低强度林窗式疏伐对云杉人工纯林地表微气候和土壤养分的短期影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(3): 541 – 548. [WANG Cheng, PANG Xueyong, BAO Weikai. Short term effects of low intensity thinning simulated by gap on ground microclimate and soil nutrients of pure spruce plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(3): 541 – 548]
- [12] WU Ran, CHENG Xiaoqin, HAN Hairong. The effect of forest thinning on soil microbial community structure and function [J]. *Forests*, 2019, **10**: 352. DOI: 10.3390/F10040352
- [13] ZHOU Tao, WANG Chuankuan, ZHOU Zhenghu. Impacts of forest thinning on soil microbial community structure and extracellular enzyme activities: A global meta-analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**: 107915. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107915
- [14] 国家林业和草原局. 全国第四次大熊猫调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 24. [National Forestry and Grassland Administration. The 4th national survey report on giant panda in China [M]. Beijing: Science Press, 2021: 24]
- [15] 高新宇,刘阳,刘定震,等. 秦岭大熊猫冬春季对巴山木竹竹林生长指标的选择[J]. *动物学研究*, 2006, **27**(2): 157 – 162. [GAO Xinyu, LIU Yang, LIU Dingzhen, et al. Analysis on the growth of bamboo species *Bashania fargesii* selection of giant pandas in Qinling Mountains [J]. *Zoological Research*, 2006, **27**(2): 157 – 162] DOI: 10.3321/j.issn:0254-5853.2006.02.005
- [16] YU Guangzhi, JIANG Zhigang, ZHAO Zhilong, et al. Feeding habitat of giant pandas (*Ailuropoda melanoleuca*): Why do they prefer bamboo patch edges? [J]. *Journal of Zoology*, 2003, **261**: 307 – 312. DOI: 10.1017/S0952836903004242
- [17] CHEN Shengyun, ZHAO Qian, LIU Wenjie, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil N<sub>2</sub>O concentration and flux in the permafrost regions of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, **10**(1): 69 – 79. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2018.00069
- [18] MORI H, MARUYAMA F, KATO H, et al. Design and experimental application of a novel non-degenerate universal primer set that amplifies prokaryotic 16S rRNA genes with a low possibility to amplify eukaryotic rRNA Genes [J]. *DNA Research*, 2014, **21**: 217 – 227. DOI: 10.1093/dnares/dst052
- [19] BOLGER A M, LOHSE M, USADEL B. Trimmomatic: A flexible

- trimmer for Illumina sequence data [J]. *Bioinformatics*, 2014, **30** (15): 2114–2120. DOI: 10.1093/bioinformatics/btu170
- [20] MAGOC T, SALZBERG S L. FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies [J]. *Bioinformatics*, 2011, **27** (21): 2957–2963. DOI: 10.1093/bioinformatics/btr507
- [21] EDGAR R C. UPARSE: Highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads [J]. *Nature Methods*, 2013, **10** (10): 996–998. DOI: 10.1038/NMETH.2604
- [22] QUAST C, PRUESSE E, YILMAZ P, et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools [J]. *Nucleic Acids Research*, 2013, **41**: D590–D596. DOI: 10.1093/nar/gks1219
- [23] CAPORASO J G, KUCZYNSKI J, STOMBAUGH J, et al. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010, **7**(5): 335–336. DOI: 10.1038/NMETH.F.303
- [24] SEGATA N, IZARD J, WALDRON L, et al. Metagenomic biomarker discovery and explanation [J]. *Genome Biology*, 2011, **12**: R60. DOI: 10.1186/gb-2011-12-6-r60
- [25] GIUGGIOLA A, OGEE J, RIGLING A, et al. Improvement of water and light availability after thinning at a xeric site: Which matters more? A dual isotope approach [J]. *New Phytologist*, 2016, **210**: 108–121. DOI: 10.1111/nph.13748
- [26] SOHN J A, SAHA S, BAUHUS J. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **380**: 261–273. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.07.046
- [27] CHEN Xinli, WANG Dong, CHEN Xin, et al. Soil microbial functional diversity and biomass as affected by different thinning intensities in a Chinese fir plantation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **92**: 35–44. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.01.018
- [28] BARG A K, EDMONDS R L. Influence of partial cutting on site microclimate, soil nitrogen dynamics, and microbial biomass in Douglas-fir stands in western Washington [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, **29**: 705–713. DOI: 10.1139/x99-045
- [29] CHAPARRO J M, BADRI D V, VIVANCO J M. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development [J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**: 790–803. DOI: 10.1038/ismej.2013.196
- [30] XIONG Chao, ZHU Yongguan, WANG Juntao, et al. Host selection shapes crop microbiome assembly and network complexity [J]. *New Phytologist*, 2020, **229**: 1091–1104. DOI: 10.1111/nph.16890
- [31] WARD N L, CHALLACOMBE J F, JANSSEN P H, et al. Three genomes from the phylum Acidobacteria provide insight into the lifestyles of these microorganisms in soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75** (7): 2046–2056. DOI: 10.1128/AEM.02294-08
- [32] 杨安娜, 陆云峰, 张俊红, 等. 杉木人工林土壤养分及酸杆菌群落结构变化[J]. *林业科学*, 2019, **55**(1): 119–127. [YANG Anna, LU Yunfeng, ZHANG Junhong, et al. Changes in soil nutrients and Acidobacteria community structure in Cunninghamia lanceolata plantations [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(1): 119–127] DOI: 10.11707/j.1001-7488.20190114
- [33] JONES R T, ROBESON M S, LAUBER C L, et al. A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses [J]. *The ISME Journal*, 2009, **3**: 442–453. DOI: 10.1038/ismej.2008.127
- [34] DAIMS H, LÜCKER S, WAGNER M, et al. A new perspective on microbes formerly known as nitrite-oxidizing bacteria [J]. *Trends in Microbiology*, 2016, **9**: 699–712. DOI: 10.1016/j.tim.2016.05.004
- [35] SPEIRS L B M, RICE D T F, PETROVSKI S, et al. The phylogeny, biodiversity, and ecology of the Chloroflexi in activated sludge [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**: 2015. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02015
- [36] CURTIN D, CAMPBELL C A, JALIL A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30** (1): 57–64. DOI: 10.1016/s0038-0717(97)00094-1
- [37] ROUSK J, BAATH E, BROOKES P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**: 1340–1351. DOI: 10.1038/ismej.2010.58
- [38] PHILIPPOT L, SPOR A, HENAULT C, et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**: 1609–1619. DOI: 10.1038/ismej.2013.34
- [39] BAHRAM M, NETHERWAY T, HILDEBRAND F, et al. Plant nutrient-acquisition strategies drive topsoil microbiome structure and function [J]. *New Phytologist*, 2020, **227**: 1189–1199. DOI: 10.1111/nph.16598
- [40] LANGE M, EISENHAEUER N, SIERRA C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage [J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 6707. DOI: 10.1038/ncomms7707



# Thinning Effect on the Diversity of Soil Bacterial Communities in Dwarf Bamboo (*Chimonobambusa szechuanensis*) Pure Stands in Chinese Giant Panda Habitat

JIANG Hao<sup>1</sup>, TU Weiguo<sup>2</sup>, WANG Yujie<sup>2</sup>, LI Ling<sup>2</sup>, FU Mingxia<sup>3</sup>, ZHANG Yuanbin<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;

2. Sichuan Provincial Institute of Natural Resource Sciences, Chengdu 610015, China;

3. Sichuan Daxiangling Natural Reserve Administration, Ya'an 625200, Sichuan, China)

**Abstract:** Thinning is a necessary means to improve the soil quality and forest ecosystem function of giant panda habitat and enhance biodiversity. However, past scientific attentions was paid more to improving the timber yield of artificial forest, but there were relatively few studies on how thinning for the purpose of improving the functional attributes of habitats in nature reserves affect underground ecological processes, especially the changes of soil microbial communities. In this study, it took pure bamboo (*Chimonobambusa szechuanensis*) stands in the Daxiangling district of the Giant Panda National Park of China as a case study for control-experiments of thinning. Two thinning patterns (A vs B) were designed to apply separately to two pure bamboo stands, a year later followed by a careful examination of the physical and chemical properties of the pure bamboo soils and the bacterial microbiome, particularly the changes of soil bacterial community diversity. We have the following facts: (1) Different thinning patterns had different effects on soil bacterial community. As for the pattern A with a purpose of promoting the prosperity of staple bamboo, it had marked positive effects on the soil bacterial communities. It significantly increased the Sobs index ( $P=0.024$ ) and Chao index ( $P=0.027$ ) of soil bacterial community, exhibiting higher community richness as compared to those in natural pure bamboo stands. In contrast, the effect of the pattern B, which intended to expedite a transition of pure bamboo stands to broad-leaved forest, which are popular with giant pandas, had no significant impact on the underground ecosystem in reserved zone of pure forest. (2) LEfSe analysis (LDA score  $> 3$ ,  $P < 0.05$ ) revealed that the core taxa of soil bacterial communities in the pure stands were Proteobacteria, Acidobacteria, and Actinobacteria. Furthermore, the contents of organic carbon (50.2 g/kg,  $P < 0.001$ ), total nitrogen (5.04 g/kg,  $P < 0.05$ ), and microbial biomass carbon (700.54 mg/kg,  $P < 0.01$ ) were significantly reduced in pattern A, while soil pH ( $\text{pH} = 5.05$ ,  $P < 0.001$ ) was significantly increased. (3) The variation in some bacterial phyla abundance was significantly correlated with soil pH ( $r^2 = 0.45$ ,  $P < 0.05$ ) and total nitrogen content ( $r^2 = 0.39$ ,  $P < 0.05$ ). In conclusion, this study provides insights into the soil functional microbes associated with thinning patterns in pure bamboo stands.

**Key words:** thinning; *Chimonobambusa szechuanensis*; the Giant Panda National Park, China; pure stands; soil microbiome

(责任编辑 李嵘)