

DOI: 10.20103/j.stxb.202308271839

李震凯, 张贻荣, 邓智文, 柳佳莹, 荣俊冬, 陈礼光, 何天友, 郑郁善. 封育年限对武夷山毛竹细根功能性状的影响. 生态学报, 2024, 44(17): 7725-7737.

Li Z K, Zhang Y R, Deng Z W, Liu J Y, Rong J D, Chen L G, He T Y, Zheng Y S. Effects of enclosure term on fine root functional traits of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in the Wuyi Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7725-7737.

## 封育年限对武夷山毛竹细根功能性状的影响

李震凯<sup>1</sup>, 张贻荣<sup>2</sup>, 邓智文<sup>1</sup>, 柳佳莹<sup>1</sup>, 荣俊冬<sup>1</sup>, 陈礼光<sup>1</sup>, 何天友<sup>3</sup>, 郑郁善<sup>1,3,\*</sup>

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 武夷山国家公园科研监测中心, 南平 353000

3 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002

**摘要:** 自然封育是培育森林资源重要且有效的途径, 细根作为植物体重要的资源获取型器官, 在森林群落发挥生态功能中扮演重要角色。为明晰自然封育对毛竹细根功能性状的影响, 采用空间代替时间的研究方法, 以武夷山国家公园内正常经营和封育年限为 3、5、10、15 年和 40 年的毛竹林作为研究对象, 揭示不同封育年限下毛竹细根功能性状的差异以及对土壤理化性质变化的适应规律。结果表明: (1) 封育年限对毛竹细根的功能性状具有显著影响。随着封育年限的增长, 毛竹细根的比根长、比根面积、全碳、全氮和全磷含量均呈现先上升后下降的变化趋势, 组织密度、碳氮比和碳磷比呈现先下降后上升的趋势, 同其他封育毛竹林群落相比, 封育 10 和 15 年的毛竹林群落中细根比根长、比根面积和养分含量得到显著提高。土壤层次和细根径级对细根功能性状同样具有显著影响。(2) 毛竹细根功能性状间随封育年限的变化存在显著的相关性。比根长、比根面积、全碳含量、全氮含量和全磷含量彼此之间存在显著的正相关关系, 与碳氮比、碳磷比和组织密度存在显著的负相关关系。(3) 随着封育演替进程, 毛竹林群落中土壤因子的变化驱动着细根功能性状发生改变, 土壤容重同细根养分含量呈显著的负相关关系, 土壤碳磷含量与细根比根长和比根面积存在显著的正相关关系, 土壤养分含量与细根养分含量呈现极显著正相关关系。综上, 自然封育促使毛竹细根通过自身表型可塑性合理权衡不同功能性状之间的资源配置, 当封育 10—15 年, 毛竹细根将更多养分集中于资源获取型性状的构建, 吸收能力和效率显著提高, 林分生产力和生态功能较优, 在封育 10—15 年后适当进行科学的人为经营活动有助于毛竹林的可持续健康发展。

**关键词:** 细根; 封育毛竹林群落; 形态特征; 养分性状; 生态化学计量学; 土壤理化性质

## Effects of enclosure term on fine root functional traits of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in the Wuyi Mountains

LI Zhenkai<sup>1</sup>, ZHANG Yirong<sup>2</sup>, DENG Zhiwen<sup>1</sup>, LIU Jiaying<sup>1</sup>, RONG Jundong<sup>1</sup>, CHEN Liguang<sup>1</sup>, HE Tianyou<sup>3</sup>, ZHENG Yushan<sup>1,3,\*</sup>

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Wuyi Mountain National Park Scientific Research Monitoring Center, Nanping 353000, China

3 College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract:** Natural enclosure refers to the forest in a closed state, which is extensively believed to be an important and effective approach to cultivating forest resources. Fine roots, as the important resource-acquiring organ of plants, are crucial to the ecological function fulfillment of forest communities. To clarify the effects of natural enclosure on the fine root functional traits, the moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forests under human management and enclosure for 3, 5, 10, 15

基金项目: 福建省林业厅资助项目(2021FKJ27); 福建农林大学科技创新基金项目(KFB23201)

收稿日期: 2023-08-27; 网络出版日期: 2024-06-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zys1960@163.com

years, and 40 years in the Wuyi Mountain National Park were chosen as the research objects, using the method of substituting space for time, to compare the differences in the fine root functional traits of moso bamboo and investigate their adaptations to the changes of soil physical and chemical properties under different enclosure years. The results indicated that: (1) The natural enclosure had a significant effect on the functional traits of moso bamboo fine roots. With the increase of the enclosure year, the specific root length (SRL), specific root area (SRA), total carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorus (P) content of moso bamboo fine roots showed a trend of increasing and then decreasing, and root tissue density (RTD), the C:N and C:P ratio showed a trend of decreasing and then increasing. Compared with other natural enclosure forests, the SRL, SRA and nutrient content of fine roots in the moso bamboo forest community enclosure for 10 and 15 years were significantly improved. The soil layer and diameter class had significant effects on fine root functional traits equally. (2) There was a significant correlation between the functional traits of moso bamboo fine roots with the changes of enclosure year. SRL, SRA and nutrient content had significantly positive correlations, and they had significantly negative correlations with C:N, C:P and RTD. (3) With the successional process of enclosure, the changes of soil factors in the moso bamboo forest community drove the changes of the fine root functional traits. There was a significantly negative correlation between soil capacity and fine root nutrient contents. The C and P content of soil were significantly positively correlated with the SRL and SRA of fine roots. The soil nutrient contents showed a highly significant positive correlation with the fine root nutrient contents. In conclusion, the natural enclosure prompted the fine roots to reasonably weigh the allocation of resources between different functional traits through their phenotypic plasticity. After 10—15 years of the natural enclosure, the moso bamboo fine roots concentrated more nutrients on the construction of resource-acquisitive traits, with significantly higher absorption capacity and efficiency, the stand productivity and ecological functions being superior. Appropriately scientific human management activities after 10—15 years of natural enclosure would contribute to the sustainable and healthy development of moso bamboo forests.

**Key Words:** fine root; enclosure moso bamboo community; morphological characteristics; nutrient characteristics; ecological stoichiometry; soil physical and chemical properties

细根通常是指位于植物根系最前端直径小于 2 mm 的根,是植物根系中生理活动最为活跃且吸收养分效率最高的部分,在森林生态系统的养分循环和能量流动中扮演着极其重要的角色<sup>[1-3]</sup>。细根具有极强的可塑性且对于外界环境中的变化极为敏感,其功能性状不仅受自身遗传特性的影响,同时为适应土壤环境变化和维持自身生长发育所需而发生相应改变,从而在种间竞争及群落演替中占据有利地位<sup>[4-7]</sup>。细根在森林生态系统中发挥关键功能往往与其形态性状密切相关,如细根比根长和比根面积可以表征植物根系生长分布和推断植物的资源获取策略<sup>[8-9]</sup>。植物细根的碳氮磷含量及其生态化学计量特征也是细根极其重要的功能性状,能够反映出植物体的生存适应策略和林地养分有效性<sup>[10-12]</sup>。

封山育林是培育森林资源重要且有效的途径,通过将人为干扰程度不同且具有天然萌蘖能力的森林封闭起来,禁止或减少人为活动干扰,依靠森林的自我调节能力使森林植物进行自然恢复和演替,可以缓解人为经营措施造成的土地肥力下降和生物多样性降低等不利于毛竹林可持续发展的状况<sup>[13-15]</sup>。相关研究表明封育能够增加植物群落的细根生物量,改善土壤结构,增强土壤团聚体稳定性<sup>[16-17]</sup>。在一定封育年限内,土壤水肥条件的改善能够显著改变植物根系的形态特征,影响植物根系的分布格局<sup>[18]</sup>。然而长期的自然封育会使植物根系中的碳氮含量降低,影响植物-凋落物-根-土壤系统中的碳氮分布<sup>[19]</sup>。因而深入探究封育森林群落细根功能性状的变化规律及同土壤环境因子间的相互关系,对于理解封育演替进程中森林群落的物质循环和生态系统可持续性具有重要意义。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)是我国栽种面积最大且经济效益和生态功能俱佳的优良竹种,具有生长迅速、生物量积累大和生产周期短等特点<sup>[1,20-21]</sup>。武夷山毛竹林的栽种培育历史悠久,生产价值和生态价值在全

国均属于较优水平,具有重大研究价值<sup>[22]</sup>。细根功能性状的研究是当前植物根系研究的热点之一,但关于封育毛竹林群落细根功能性状演变及与土壤因子间联系的研究鲜有报道。因此,本研究以武夷山国家公园内封育毛竹林群落作为研究对象,探究不同封育年限下毛竹细根主要功能性状间的差异及同土壤因子间的相关作用,旨在揭示自然封育状态下毛竹细根生长对于封育年限的响应规律和毛竹林合理的封育年限,为武夷山封育毛竹林管理方式的选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于福建省南平市武夷山国家公园(117°24′—117°59′ E, 27°31′—27°55′ N),属典型的中亚热带季风性气候,年平均气温 12—18 °C,年平均降水量约为 2000 mm,全年无霜期 260 d 左右<sup>[23]</sup>,国家公园内地势高低悬殊,土壤垂直分异显著,植被呈现出鲜明的垂直带谱特征,主要有毛竹林、常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林和高山草甸植被群落等。毛竹林作为武夷山国家公园内重要的森林资源,在海拔 250—1500 m 的范围内均有分布<sup>[22]</sup>,其中毛竹生长分布的平均海拔为 600 m,试验地主要的植被有毛竹(*Phyllostachys edulis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置

在福建省南平市武夷山国家公园内,采取空间代替时间的研究方法,选取位于福建省南平市星村镇桐木村、洋庄乡大安村和黄坑镇坳头村 6 个封育年限不同的典型毛竹林群落进行样地的设置并编号,群落 A:正常经营(CK);群落 B:封育 3 年;群落 C:封育 5 年;群落 D:封育 10 年;群落 E:封育 15 年;群落 F:封育 40 年。在每个毛竹林分中分别设置 3 块 25.8 m×25.8 m 的样地,共计 18 块样地,同一林分不同样地的间隔均大于 25 m,每块样地均远离林缘且避开道路及河流。试验地各封育毛竹林群落林分特征和土壤理化性质如表 1 和表 2 所示。

表 1 试验地毛竹林分特征

Table 1 Stand characteristics of moso bamboo forest in the study site

毛竹林群落类型 Community type	封育年限 Enclosure year/a	海拔高度 Altitude/m	立竹密度 Density/ (株/hm <sup>2</sup> )	平均株高 Average height/m		平均胸径 Average DBH/cm		竹木混交比例 Bamboo and wood mixing ratio
				毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	乔灌植物 Arbor and shrub plants	毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	乔灌植物 Arbor and shrub plants	
				A	0(正常经营)	695±11	2760±450	
B	3	790±26	2120±220	16.20±2.10	7.50±6.30	11.80±0.50	13.60±6.80	50:1
C	5	867±18	4090±150	14.00±1.30	5.60±1.80	11.70±0.30	6.80±5.40	90:1
D	10	753±16	3370±340	17.70±1.80	11.10±2.50	12.20±0.50	19.80±2.80	35:1
E	15	670±13	5910±1480	16.10±1.50	11.00±0.90	12.00±0.20	15.50±1.20	5:1
F	40	897±5	2970±1210	19.30±0.70	10.70±2.80	11.80±0.40	16.30±3.60	3:1

A:正常经营的毛竹林群落(CK);B:封育 3 年的毛竹林群落;C:封育 5 年的毛竹林群落;D:封育 10 年的毛竹林群落;E:封育 15 年的毛竹林群落;F:封育 40 年的毛竹林群落;DBH:胸径 Diameter at breast height

#### 1.2.2 毛竹细根样品采集

根据样地前期调查的每木检尺结果,于 2022 年 8 月在每块样地采用“S”型取样方法,选取 3 株近似林分平均胸径且生长良好的毛竹。以选定的毛竹为中心,在距离其箨部约 0.5 m 左右的位置进行采样,将地表凋落物清理干净后,垂直向下挖取 0.2 m×0.2 m×0.6 m 的土方,并根据土层深度 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 进行毛竹细根样品的采集,将同一样地内相同土层深度采集的毛竹细根样品装入同一塑封袋中,带回实验室后,用清水进行多次冲洗。通过观察细根的颜色、弹性等特征,从中挑拣出直径小于 2 mm 且具有活力的毛竹

细根,活细根一般颜色较浅,具有弹性,皮质发白,并进一步根据直径细分为0—1 mm和1—2 mm的细根。

表2 试验地毛竹林土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties of moso bamboo forest in the study site

毛竹林群落类型 Community type	土壤层次/cm Soil layer	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	土壤含水率 Soil water content/%	土壤全碳含量 Soil total carbon content/ (g/kg)	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content/ (g/kg)	土壤全磷含量 Soil total phosphorus content/ (g/kg)
A	0—20	1.33±0.09a	23.73±2.49c	29.20±1.72c	2.02±0.05c	0.28±0.01a
	20—40	1.35±0.03a	19.57±1.55d	15.09±3.69c	1.05±0.26b	0.17±0.02b
	40—60	1.68±0.15a	18.22±3.63e	12.15±3.06c	0.98±0.16c	0.15±0.02c
B	0—20	1.09±0.02b	39.11±5.01b	35.27±2.14c	2.58±0.15b	0.20±0.02a
	20—40	1.25±0.05b	32.21±2.63c	17.79±1.83bc	1.20±0.23b	0.17±0.01b
	40—60	1.42±0.07b	26.95±1.80d	13.90±1.53bc	1.08±0.06c	0.14±0.02c
C	0—20	1.04±0.13bc	41.27±4.34b	36.67±3.41bc	2.85±0.26b	0.23±0.02a
	20—40	1.14±0.04c	38.78±6.19bc	21.70±2.79abc	1.31±0.14b	0.16±0.01b
	40—60	1.30±0.20bc	34.50±0.95c	14.99±2.57abc	1.26±0.10bc	0.14±0.02bc
D	0—20	1.06±0.17bc	43.19±5.92b	38.96±1.80b	2.74±0.21b	0.26±0.05a
	20—40	1.14±0.03c	42.72±2.28b	23.62±2.29abc	1.42±0.11b	0.18±0.03ab
	40—60	1.24±0.09bc	37.51±1.16bc	16.30±2.32abc	1.28±0.09bc	0.16±0.02abc
E	0—20	0.85±0.11c	48.27±8.27b	41.67±1.39b	2.95±0.17b	0.27±0.09a
	20—40	0.89±0.04d	43.37±2.02b	26.72±3.83ab	2.35±0.10a	0.19±0.01ab
	40—60	1.16±0.11c	39.20±1.87b	17.52±0.64ab	1.47±0.28b	0.18±0.01ab
F	0—20	0.57±0.08d	65.48±4.19a	45.90±1.83a	3.83±0.27a	0.23±0.05a
	20—40	0.70±0.03e	59.71±5.34a	29.01±3.12a	2.68±0.28a	0.21±0.02a
	40—60	1.09±0.01c	45.15±0.91a	18.49±1.39a	1.96±0.18a	0.19±0.01a

不同小写字母表示同一土壤层次不同封育年限毛竹林林地土壤理化性质存在显著差异( $P<0.05$ )

### 1.2.3 毛竹细根样品指标测定

使用根系扫描仪(Epson scanner)分别扫描不同样地内不同土层深度采集的0—1 mm和1—2 mm毛竹细根,在WinRHIZO(2013e)根系分析系统中分析扫描图像得到毛竹细根根长、表面积和体积等。将分级挑拣后的细根样品全部扫描完成后,装入纸质信封置于烘箱中烘干至恒重后进行充分研磨并过筛,保存于干燥的试剂瓶中进行碳氮磷含量的测定。

细根功能性状的测定方法为:

- (1) 比根长(Specific root length, SRL) (cm/g): 细根根长(cm)/细根干重(g);
- (2) 比根面积(Specific root area, SRA) (cm<sup>2</sup>/g): 细根表面积(cm<sup>2</sup>)/细根干重(g);
- (3) 根组织密度(Root tissue density, RTD) (g/cm<sup>3</sup>): 细根干重(g)/体积(cm<sup>3</sup>);
- (4) 细根全碳含量(Root total carbon content, RTC) (g/kg): 采用重铬酸钾氧化-外加热法进行测定;
- (5) 细根全氮含量(Root total nitrogen content, RTN) (g/kg): 采用半微量凯氏定氮法进行测定;
- (6) 细根全磷含量(Root total phosphorus content, RTP) (g/kg): 采用钼锑抗比色法进行测定<sup>[24]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2016软件统计和处理数据,使用Origin 2018软件绘制图像。使用SPSS 26.0软件进行数据分析,运用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法检验毛竹细根形态特征、碳氮磷含量及其生态化学计量特征在不同封育年限下是否存在显著差异,运用Pearson相关性分析和线性回归分析方法对毛竹细根功能性状间及其同土壤理化性质间的相关性关系进行检验。图表中的数据均为各指标测定数据的平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土层毛竹细根功能性状随封育年限的变化

毛竹细根比根长和比根面积随着封育年限的增长大致呈现出先增后减的变化趋势(图1),不同封育年限

下相同土层的毛竹同一径级细根比根长和比根面积均存在着显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中 0—1 mm 细根比根长和比根面积的变化范围分别为 555.58—1249.30 cm/g 和 116.61—238.27 cm<sup>2</sup>/g, 1—2 mm 细根比根长和比根面积的变化范围分别为 104.42—209.21 cm/g 和 50.44—85.10 cm<sup>2</sup>/g。与正常经营的毛竹林群落相比, 封育 15 年的毛竹林群落细根比根长和比根面积均得到显著提高。在同一毛竹林群落中, 随着土层深度的增加, 毛竹林细根比根长和比根面积均呈现下降趋势, 且不同土层间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

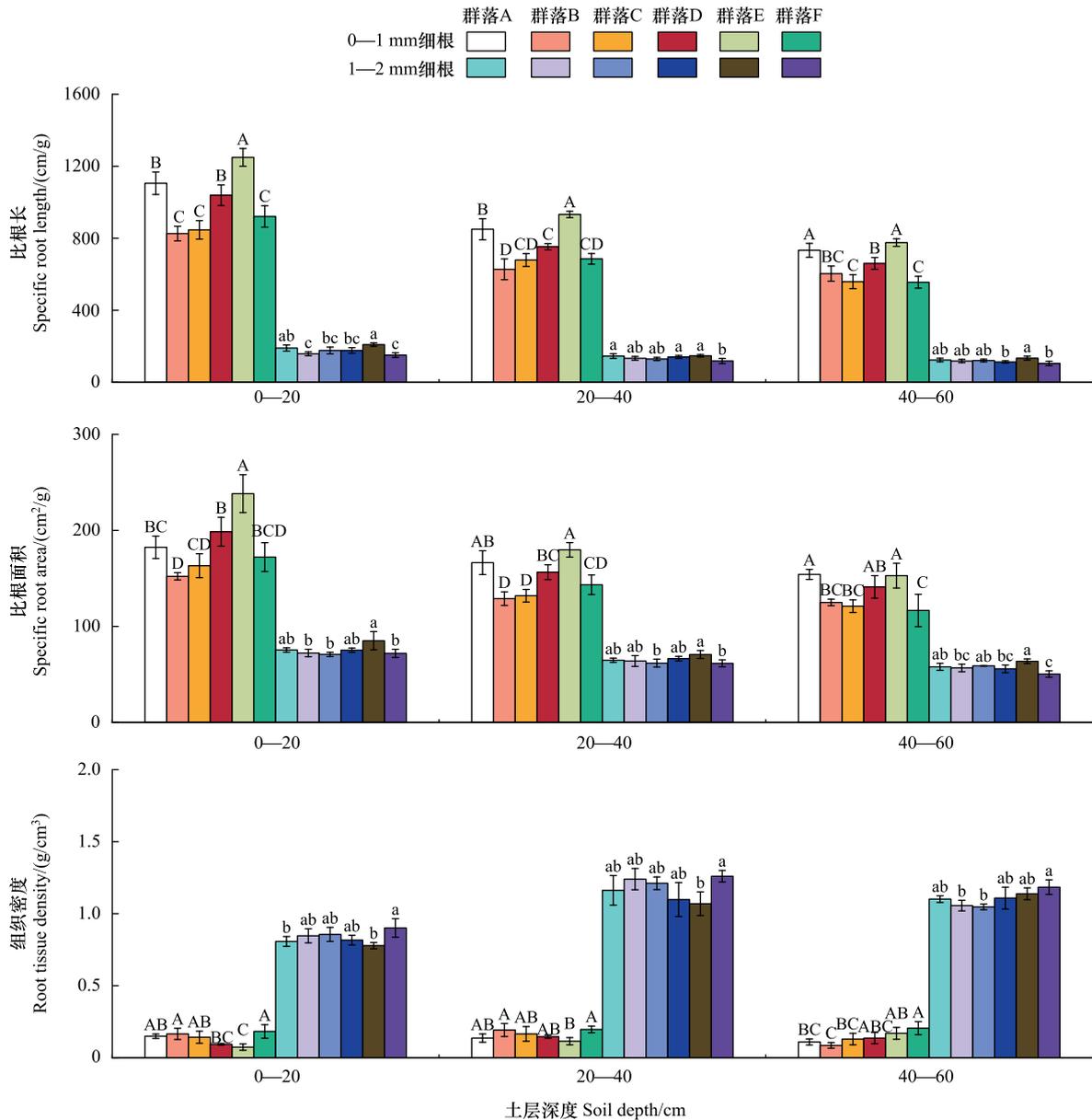


图 1 不同封育年限下不同土层深度毛竹细根形态性状

Fig.1 Morphological characteristics of moso bamboo fine roots in different soil depths under different enclosure years

A: 正常经营的毛竹林群落 (CK); B: 封育 3 年的毛竹林群落; C: 封育 5 年的毛竹林群落; D: 封育 10 年的毛竹林群落; E: 封育 15 年的毛竹林群落; F: 封育 40 年的毛竹林群落; 不同大写字母表示同一土层深度的 0—1 mm 细根形态性状在不同群落中存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一土层深度的 1—2 mm 细根形态性状在不同群落中存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

毛竹细根根组织密度随着封育年限的增长大致呈现出先减后增的变化趋势 (图 1), 不同封育年限毛竹林群落中, 同一土层深度相同径级的毛竹细根均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 0—1 mm 和 1—2 mm 细根根组织密度

的变化范围分别为 0.07—0.21 g/cm<sup>3</sup> 和 0.75—1.24 g/cm<sup>3</sup>。0—1 mm 细根根组织密度随着土层深度的增加差异不显著,1—2 mm 细根根组织密度随着土层深度的增加则呈现先增后减的变化趋势,且不同土层间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

毛竹 0—1 mm 细根全碳含量大致随着封育年限的增长呈现先上升后下降的变化趋势(图 2),变化范围为 415.39—498.82 g/kg,在 0—20 cm 土层存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层则无显著差异;而 1—2 mm 根则呈现先下降后上升的变化趋势,变化范围为 385.16—462.20 g/kg,在 20—40 cm 和 40—60 cm 土层存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。其中相比于对照组,封育 15 年的毛竹 0—1 mm 细根碳含量均有所提高。在同一封育毛竹林群落,随着土层深度的增加,毛竹 0—1 mm 和 1—2 mm 细根的变化大多无显著差异。

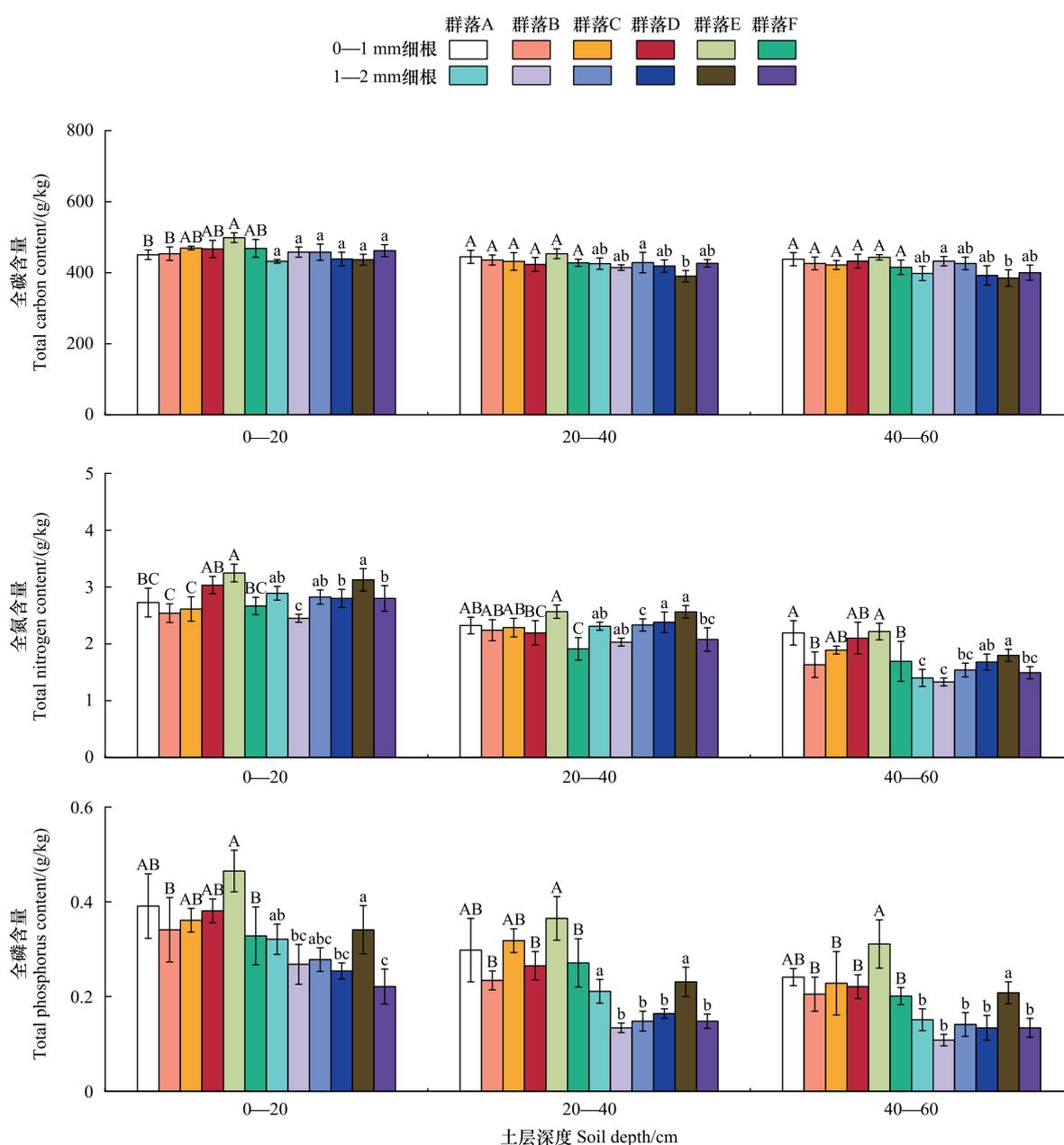


图 2 不同封育年限下不同土层深度毛竹细根碳氮磷含量

Fig. 2 The total carbon, nitrogen and phosphorus content of moso bamboo fine roots in different soil depths under different enclosure years. 不同大写字母表示同一土层深度的 0—1 mm 细根养分性状在不同群落中存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一土层深度的 1—2 mm 细根养分性状在不同群落中存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

毛竹细根全氮和全磷含量大致随着封育年限的增长呈现先上升后下降的变化趋势(图 2),不同封育年限相同土层的毛竹 0—1 mm 与 1—2 mm 细根的全氮和全磷含量均存在显著差异( $P<0.05$ ),其中 0—1 mm 细根的全氮和全磷含量变化范围分别为 1.63—3.25 g/kg 和 0.20—0.46 g/kg,1—2 mm 细根的变化范围为 1.33—3.13 g/kg和 0.11—0.34 g/kg。与对照组相比,封育 15 年的毛竹林群落细根氮磷含量大多得到显著提高,而封育 40 年的毛竹林细根氮磷含量则出现不同程度的降低。随着土层深度的增加,同一封育毛竹林群落中两个径级的毛竹细根的全氮和全磷含量均呈下降趋势,且不同土层间存在显著差异( $P<0.05$ )。

毛竹细根的 C:N 和 C:P 大致随着封育年限的增长呈现出先下降后上升的变化趋势(图 3),0—1 mm 和 1—2 mm 毛竹细根在同一土层深度不同封育年限下的 C:N 和 C:P 均存在着显著差异( $P<0.05$ ),其中 0—

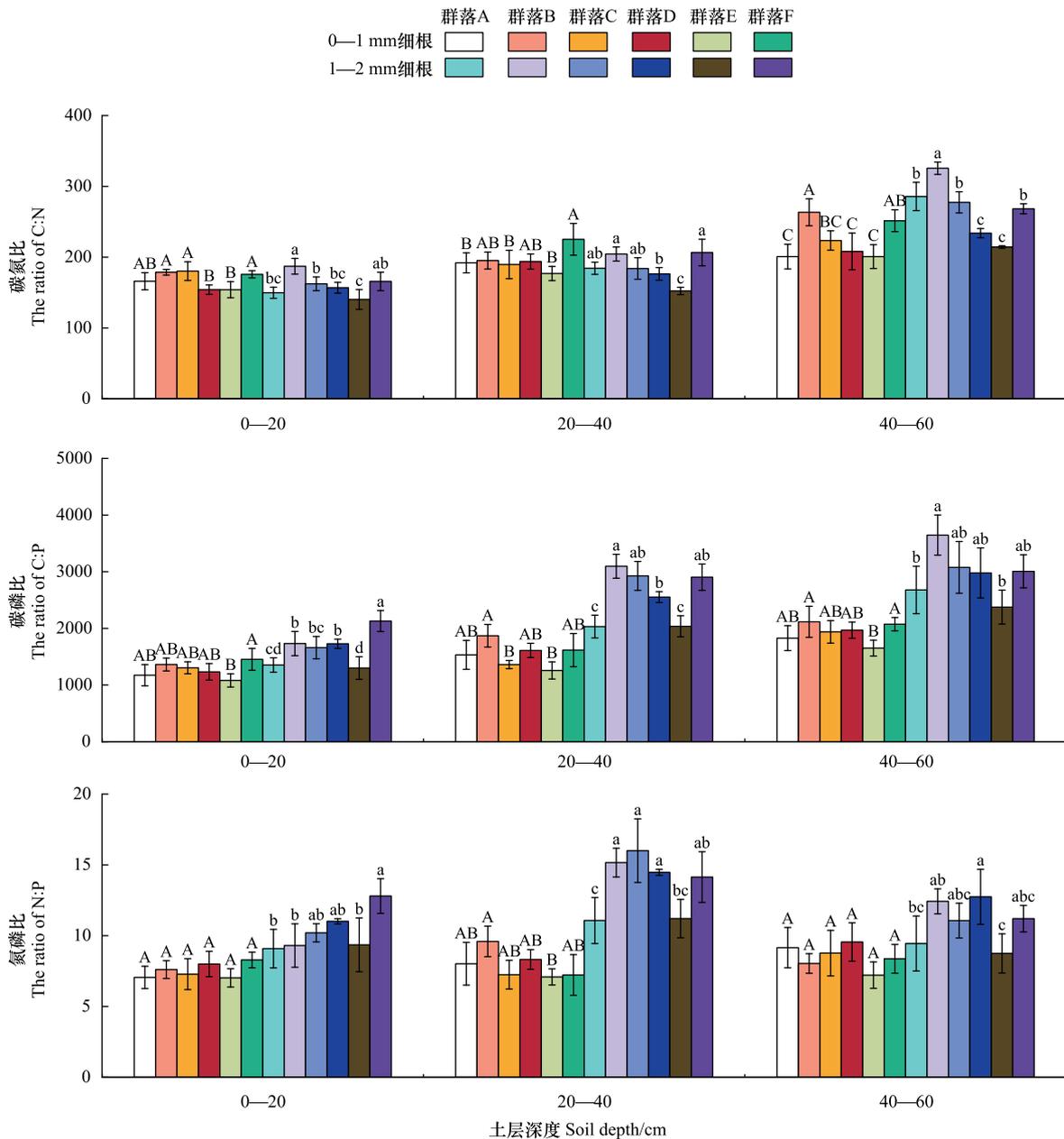


图 3 不同封育年限下不同土层深度毛竹细根碳氮磷含量化学计量比

Fig.3 The C:N, C:P, N:P ratio of moso bamboo fine roots in different soil depths under different enclosure years

不同大写字母表示同一土层深度的 0—1 mm 细根碳氮磷含量化学计量比在不同群落中存在显著差异( $P<0.05$ ),不同小写字母表示同一土层深度的 1—2 mm 细根碳氮磷含量化学计量比在不同群落中存在显著差异( $P<0.05$ )

1 mm 细根的 C:N 和 C:P 的变化范围分别为 154.00—263.44 和 1080.25—2116.23, 1—2 mm 细根的变化范围为 140.26—325.59 和 1299.53—3646.58, 与对照组相比, 封育 3 年和封育 40 年的毛竹群落中 2 个径级的细根 C:N 和 C:P 出现了不同程度的提高。在同一封育毛竹林群落中, 随着土层深度的增加, 毛竹 0—1 mm 和 1—2 mm 细根的 C:N 和 C:P 均呈现出上升的变化趋势, 且不同土层间存在着显著差异 ( $P < 0.05$ )。

毛竹细根的 N:P 随着封育年限增长的变化无一致规律 (图 3), 其中 0—1 mm 细根 N:P 的变化范围为 7.02—9.59, 在 20—40 cm 土层存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 在 0—20 cm 和 40—60 cm 土层无显著差异; 1—2 mm 细根的变化范围为 8.75—16.00, 在不同土层深度随着封育年限的变化均存在着显著差异 ( $P < 0.05$ )。同一封育毛竹林群落中 0—1 mm 细根 N:P 在不同土层间的差异不显著; 而 1—2 mm 细根 N:P 随着土层深度的增加大致呈现先上升后下降的变化趋势, 不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由表 3 可知, 封育年限、土壤层次和细根径级对细根比根长、比根面积、组织密度、全氮含量、全磷含量、碳磷比和氮磷比均具有极显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 三者的交互作用对细根比根长、比根面积和碳氮比具有显著影响 ( $P < 0.05$ )。

表 3 封育年限、土层深度、细根径级及其交互作用对毛竹细根功能性状的影响

Table 3 Effect of enclosure year, soil layer, diameter class and their interaction on functional traits of moso bamboo fine roots

变异来源 Source of variation	比根长 SRL	比根面积 SRA	组织密度 RTD	细根全碳 RTC	细根全氮 RTN	细根全磷 RTP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P
Y	78.76 **	38.99 **	9.36 **	0.78	23.46 **	20.04 **	36.75 **	22.90 **	9.25 **
S	385.01 **	146.66 **	138.32 **	49.87 **	346.18 **	130.78 **	355.49 **	169.32 **	20.49 **
D	11359.93 **	3143.28 **	9194.38 **	37.40 **	14.42 **	199.30 **	9.97 *	346.31 **	230.25 **
Y×S×D	2.54 *	2.27 *	0.95	0.75	1.64	0.59	2.22 *	1.44	1.41

Y: 封育年限 Enclosure year; S: 土壤层次 Soil layer; D: 细根径级 Diameter class; SRL: 比根长 Specific root length; SRA: 比根面积 Specific root area; RTD: 组织密度 Root tissue density; RTC: 细根全碳 Root total carbon; RTN: 细根全氮 Root total nitrogen; RTP: 细根全磷 Root total phosphorus; \*\* 表示具极显著影响 ( $P < 0.01$ ); \* 表示具有显著影响 ( $P < 0.05$ )

## 2.2 不同封育年限下毛竹细根功能性状之间的关系

由表 4 可知, 毛竹细根功能性状中, 随着封育年限的变化, 比根长与比根面积、全碳含量、全氮含量和全磷

表 4 不同封育年限下毛竹细根功能性状之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient among functional traits of moso bamboo fine roots under different enclosure years

细根径级/mm Fine root diameter class	指标 Index	比根长 SRL	比根面积 SRA	组织密度 RTD	细根全碳 RTC	细根全氮 RTN	细根全磷 RTP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P
0—1	SRL	1	0.93 **	-0.36 **	0.71 **	0.86 **	0.82 **	-0.77 **	-0.77 **	-0.35 **
	SRA		1	-0.51 **	0.71 **	0.84 **	0.74 **	-0.72 **	-0.68 **	-0.25
	RTD			1	-0.38 **	-0.32 *	-0.25	0.17	0.13	-0.06
	RTC				1	0.80 **	0.77 **	-0.59 **	-0.63 **	-0.29 *
	RTN					1	0.82 **	-0.93 **	-0.78 **	-0.17
	RTP						1	-0.71 **	-0.95 **	-0.67 **
	C:N							1	0.75 **	0.08
	C:P								1	0.68 **
	N:P									1
1—2	SRL	1	0.84 **	-0.77 **	0.41 **	0.82 **	0.86 **	-0.71 **	-0.75 **	-0.37 **
	SRA		1	-0.71 **	0.38 **	0.87 **	0.80 **	-0.78 **	-0.74 **	-0.26
	RTD			1	-0.48 **	-0.63 **	-0.75 **	0.44 **	0.61 **	0.49 **
	RTC				1	0.51 **	0.43 **	-0.28 *	-0.26	-0.11
	RTN					1	0.80 **	-0.94 **	-0.78 **	-0.10
	RTP						1	-0.71 **	-0.93 **	-0.64 **
	C:N							1	0.77 **	0.01
	C:P								1	0.62 **
	N:P									1

\*\* 表示相关性达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ); \* 表示相关性达到显著水平 ( $P < 0.05$ )

含量均呈极显著正相关关系,与组织密度、C:N、C:P 和 N:P 呈极显著负相关关系;比根面积与全碳含量、全氮含量和全磷含量呈极显著正相关,与组织密度、C:N 和 C:P 呈极显著负相关,与 N:P 的相关性不显著;组织密度与全碳含量呈极显著负相关,与其他指标的相关性在 0—1 mm 和 1—2 mm 细根中存在差异;全碳含量与全氮含量、全磷含量呈极显著正相关;全氮含量与全磷呈极显著正相关,与 C:N、C:P 呈极显著负相关,与 N:P 相关性不显著;全磷含量与 C:N、C:P、N:P 均呈极显著负相关;C:N 与 C:P 呈显著正相关,与 N:P 无显著相关性;C:P 与 N:P 呈极显著正相关关系。

### 2.3 不同封育年限下毛竹细根功能性状与土壤理化性质之间的关系

毛竹细根比根长与土壤全碳、土壤全磷含量存在显著正相关。细根比根面积与土壤全碳、土壤全磷含量存在极显著正相关,与土壤全氮含量存在显著的正相关关系。细根组织密度与土壤性质之间不存在显著的相关关系(表 5,图 4)。细根碳氮磷含量与土壤碳氮磷含量之间均呈现极显著正相关关系,与土壤容重均呈极显著负相关关系,细根碳含量与土壤含水率呈显著正相关,细根全氮含量与土壤含水率呈极显著正相关,细根全磷含量与土壤含水率则不存在显著的相关关系(表 5,图 4)。细根碳氮比与土壤容重呈极显著正相关,与土壤含水率和碳氮磷含量均呈极显著负相关。细根碳磷比与土壤容重呈显著正相关,与土壤碳氮磷含量均存在极显著负相关关系。细根氮磷比与土壤氮磷比存在显著的负相关关系(表 5)。

表 5 不同封育年限下毛竹细根功能性状与土壤理化性质相关系数

Table 5 Correlation coefficient among moso bamboo fine root functional traits and soil physical and chemical properties under different enclosure years

指标 Index	比根长 SRL	比根面积 SRA	组织密度 RTD	细根全碳 RTC	细根全氮 RTN	细根全磷 RTP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P
土壤容重 Soil bulk density	-0.09	-0.13	0.02	-0.29**	-0.43**	-0.28**	0.42**	0.24*	-0.01
土壤含水率 Soil water content	0.04	0.07	-0.01	0.21*	0.26**	0.14	-0.25**	-0.11	0.05
土壤全碳 Soil total carbon	0.21*	0.26**	-0.12	0.57**	0.76**	0.56**	-0.65**	-0.51**	-0.13
土壤全氮 Soil total nitrogen	0.17	0.21*	-0.10	0.47**	0.61**	0.47**	-0.51**	-0.42**	-0.15
土壤全磷 Soil total phosphorus	0.23*	0.25**	-0.12	0.49**	0.72**	0.59**	-0.61**	-0.52**	-0.20*

\*\* 表示相关性达到极显著水平( $P<0.01$ ); \* 表示相关性达到显著水平( $P<0.05$ )

## 3 讨论与结论

### 3.1 封育年限对毛竹细根功能性状变化的影响

毛竹细根的形态性状决定着同土壤之间相互作用的面积大小,直接影响细根吸收养分和水分的效率<sup>[9,25]</sup>。研究发现植物根系同叶片一样会在提高生产效率和增强持久性间进行合理权衡,沿着两种不同的生存策略进行演化以适应生境变化,其中比根长和比根面积等性状倾向于资源获取型策略,而组织密度则属于资源保守型策略性状<sup>[26-28]</sup>。本研究结果表明,随着封育年限的增长,毛竹细根比根长和比根面积均出现先上升后下降的变化趋势,而根组织密度则出现相反的变化趋势,造成该现象的原因可能是毛竹林群落在封育演替进程中生态功能逐步改善,土壤中养分富集,毛竹倾向于增加比根长和比根面积来汲取更多的水分和养分供生长所需。同时封育后毛竹林密度增大使得不同立竹个体间出现对于有限资源环境的竞争,毛竹通过将更多的营养物质用于资源获取型性状的构建,从而在种内和种间竞争中占据有利位置。研究发现,1—2 mm 毛竹细根拥有较低的比根长和比根面积,但其组织密度远高于 0—1 mm 细根,这可能是由于不同径级的毛竹细根在养分循环中扮演的角色不同,0—1 mm 毛竹细根多为吸收细根,而 1—2 mm 细根多起运输作用,直径较

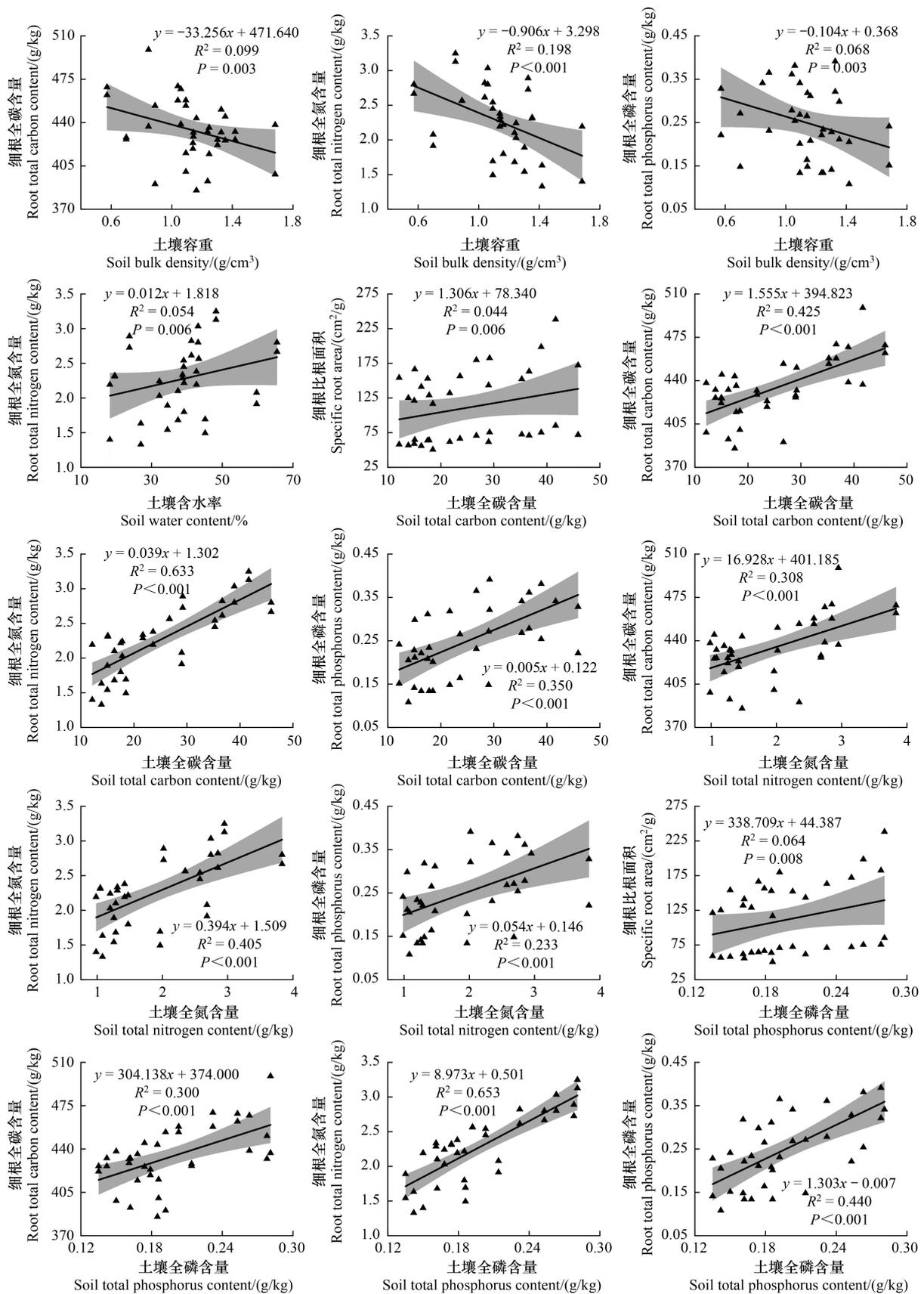


图4 不同封育年限下毛竹细根功能性状与土壤理化性质之间的线性关系

Fig.4 Linear relationship among moso bamboo fine root functional traits and soil physical and chemical properties under different enclosure years

图中阴影区域表示 95% 的置信区间

粗的细根更趋向于在获取资源时增加组织密度的保守型策略<sup>[29]</sup>。随着土层深度的增加,两个径级的细根比根长和比根面积均随着土层深度的增加而显著下降,可能是由于土壤中养分含量的下降且土壤密度增加,导致毛竹细根延伸能力和吸收效率下降,因而毛竹细根不会将过多养分用于构建比根长和比根面积等资源获取型性状上。

碳氮磷是植物生长所需最基础的营养元素,是植物体各器官生长和正常行使功能的重要保证<sup>[30-31]</sup>。碳是构成植物体形态骨架的结构型物质,生境变化对其的影响相对较小,因而其在植物体内的含量相对稳定;氮和磷是调控植物体内蛋白质等能量物质合成的重要功能型物质,其含量相对于结构型物质更易受到生境变化的影响,是森林生态系统中重要的限制性营养因子<sup>[11,32-33]</sup>。本研究中,随着封育年限的增长,0—1 mm 细根碳含量大致呈现缓慢上升后下降的变化趋势,而 1—2 mm 细根则呈现出缓慢下降后回升的变化趋势,这可能是因为在封育一段时间后,毛竹根系为了增强自身的吸收功能将更多的养分投入到 0—1 mm 细根的构建上,从而在获取营养和资源的竞争中占据有利位置。毛竹细根的全氮和全磷含量随着封育年限的增长在不同土层中均呈现出波动式上升后下降的变化趋势,且在不同毛竹林群落中存在显著差异,这可能是因为自然封育引起林内植物群落物种组成和环境要素的改变<sup>[21]</sup>,进而影响生态系统物质循环和能量流动的过程和程度,在一定封育年限内毛竹生长速率显著提高,细根对于氮磷元素的吸收量增大。

碳氮磷的生态化学计量特征不仅能够表征植物有机体特性、生长状况和对养分的吸收利用效率,还有助于研究森林生态系统中能量和化学元素平衡<sup>[12-13]</sup>。本研究中,毛竹细根的碳氮比和碳磷比随着封育年限的增长大致呈现出波动式下降后回升的变化趋势,相比于正常经营的毛竹林,封育初期和长期封育的毛竹林群落中细根碳氮比和碳磷比显著增高。在自然封育状态下,细根的氮磷含量不仅受细根自身形态可塑性和吸收特性的影响,亦受到外界营养环境的限制<sup>[32]</sup>,细根中氮和磷含量的增加使其能够合成大量的蛋白质来促进生长,封育初期的毛竹林群落中土壤氮磷含量相对较低,细根生长和周转受限,而长期封育的毛竹林群落中细根更趋向于资源保守型生长策略,吸收效率较低,与封育 3 年和封育 40 年的毛竹林群落中立竹密度和毛竹平均胸径相对较小的结果相一致。土壤层次对碳氮磷元素化学计量特征存在显著影响,随着土壤深度的增加,毛竹细根的碳氮比和碳磷比出现了增长的趋势,这可能是由于中深层土壤中氮磷养分含量较低,毛竹细根采取资源保守型生长策略,周转速度减慢,吸收效率和生长速率下降。

### 3.2 封育年限对毛竹细根功能性状间相关性的影响

植物细根功能性状间普遍存在紧密的关系<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,随着封育年限的增长,同一径级的毛竹细根不同功能性状间存在显著的相关性。毛竹细根比根长和比根面积随着封育年限的增长存在极显著的正相关关系,两者均为资源获取型形态性状,相关研究表明当细根比根长越大时,比根面积也会显著增大,从而提高细根的吸收功能<sup>[26,35]</sup>。组织密度与比根长、比根面积均呈极显著的负相关关系,说明封育毛竹林群落中物种组成和资源环境变化促使毛竹细根性状在资源获取型策略和保守型策略间进行权衡<sup>[36]</sup>。随封育年限的变化,毛竹细根不同养分元素之间呈显著的正相关关系,这可能是由于自然封育使得林地土壤养分含量提高,细根吸收效率提高,毛竹生长和繁衍速率加快,而林分密度增大的同时种间和种内竞争加剧,促使毛竹将更多的生物量分配到根系部分的构建上。随着封育年限的变化,毛竹细根比根长和比根面积,与碳氮磷含量均呈现显著的正相关关系,与碳氮比和碳磷比呈现显著的负相关关系,说明毛竹细根对于生境变化的敏感促使其具有极高的可塑性,从而增强其形态性状来提高吸收能力和效率<sup>[30]</sup>。

### 3.3 封育毛竹林群落中毛竹细根功能性状同土壤理化性质的关系

细根作为植物同土壤进行物质交换的纽带,其功能性状往往受到系统发育和环境土壤因素的限制<sup>[37-38]</sup>。本研究中毛竹细根形态性状同土壤养分间存在着显著的相关性。在封育初期,由于人为干扰后的毛竹林在短时间内群落生态功能的发挥存在不足,且林地土壤中的养分含量得不到外来补充,毛竹细根的资源获取型形态性状和养分含量显著下降,群落处于恢复演替阶段,这也表现在毛竹林分密度显著下降。在合适的封育年限范围内,毛竹林密度增大,乔灌植物多样性增加,群落稳定性得到提升<sup>[33]</sup>,凋落物分解后进入土壤中的养分

增多,土壤养分含量富集且土壤结构得到改善<sup>[16]</sup>。研究表明土壤养分空间异质性是导致根系分布空间差异的主要原因<sup>[25]</sup>,且土壤养分富集程度是植物根系功能性状改变的重要驱动因素<sup>[39]</sup>,竹林群落生态系统的能量流动和养分循环的效率提高,毛竹个体对于养分的摄取更加旺盛,因而毛竹细根比根长和比根面积等资源获取型性状得到显著改善,根系吸收功能上升,细根中养分含量增加,这也表现在封育演替进程中细根养分同土壤养分存在显著的正相关关系。

综上,自然封育对毛竹细根功能性状具有显著影响,但长期封育会使得毛竹细根的生长趋向于资源保守型策略,影响毛竹的生长发育和竹林群落生态功能的发挥。在封育 10—15 年后,毛竹细根形态和养分性状显著改善,细根的功能性状趋向于资源获取型生长策略,林分整体生产力和生态功能发挥较好,因而在合理的自然封育期限后应适当进行科学的人为经营活动,充分发挥毛竹林的经济和生态效益。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 黄爱梅, 方毅, 孙俊, 李锦隆, 胡丹丹, 钟全林, 程栋梁. 武夷山不同海拔毛竹细根功能性状. 生态学报, 2023, 43(1): 398-407.
- [ 2 ] 赵佳宁, 梁韵, 柳莹, 王玉珏, 杨倩茹, 肖春旺. 森林生态系统细根周转规律及影响因素. 植物学报, 2020, 55(3): 308-317.
- [ 3 ] 胡琪娟, 王霖娇, 盛茂银. 植物细根生产和周转研究进展. 世界林业研究, 2019, 32(2): 29-34.
- [ 4 ] Carmona C P, Bueno C G, Toussaint A, Träger S, Díaz S, Moora M, Munson A D, Pärtel M, Zobel M, Tamme R. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function. Nature, 2021, 597: 683-687.
- [ 5 ] 张运, 宋崇林, 陈健, 史作民, 肖文发, 赵广东, 袁小平, 吴建国. 10 年生杉木人工林叶片和细根功能性状对土壤磷添加的响应. 林业科学研究, 2022, 35(4): 23-32.
- [ 6 ] 刘广路, 范少辉, 蔡春菊, 刘希珍, 李雁冰, 罗天磊. 毛竹细根分布特征研究. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(5): 472-479.
- [ 7 ] McCormack M L, Guo D L, Iversen C M, Chen W L, Eissenstat D M, Fernandez C W, Li L, Ma C G, Ma Z Q, Poorter H, Reich P B, Zadworny M, Zanne A. Building a better foundation: improving root-trait measurements to understand and model plant and ecosystem processes. New Phytologist, 2017, 215(1): 27-37.
- [ 8 ] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, Da Costa A C L, Braga A P, Gonçalves P H L, de Athaydes Silva Junior J, de Almeida S S, Dawson L A, Malhi Y, Williams M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. Plant and Soil, 2008, 311(1/2): 189-199.
- [ 9 ] 崔家宝, 魏晨, 王宁, 曹建军. 高寒草地不同径级根形态对围封年限的响应. 生态学报, 2023, 43(8): 3327-3338.
- [ 10 ] 李爱琴, 张莎莎, 王会荣, 张丹丹, 赵晓雅, 关梦冉, 徐小牛. 杉木成熟林细根形态与功能特征的海拔梯度变异特点. 生态学报, 2020, 40(2): 719-727.
- [ 11 ] 高小敏, 刘世荣, 王一, 栾军伟, 蔡春菊, 任立宁. 穿透雨减少和氮添加对毛竹叶片和细根化学计量学的影响. 生态学报, 2021, 41(4): 1440-1450.
- [ 12 ] 杜满义, 范少辉, 刘广路, 封焕英, 郭宝华, 唐晓鹿. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. 植物生态学报, 2016, 40(8): 760-774.
- [ 13 ] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 林泽生, 李乔妹, 叶有华. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征. 生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [ 14 ] 魏文俊, 尤文忠, 赵刚, 张慧东, 颜廷武. 退化柞蚕林封育对枯落物和表层土壤持水效能的影响. 生态学报, 2016, 36(3): 721-728.
- [ 15 ] Wang D, Liu C, Yang Y S, Liu P P, Hu W, Song H Q, Miao C, Chen J, Yang Z L, Miao Y. Clipping decreases plant cover, litter mass, and water infiltration rate in soil across six plant community sites in a semiarid grassland. The Science of the Total Environment, 2023, 861: 160692.
- [ 16 ] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系. 生态学报, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [ 17 ] Gao W B, Jiang H T, Zhang S, Hai C X, Liu B Y. Vegetation characteristics and soil properties in grazing exclusion areas of the Inner Mongolia desert steppe. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(3): 549-560.
- [ 18 ] 苏纪帅, 赵洁, 井光花, 魏琳, 刘建, 程积民, 张金娥. 半干旱草地长期封育进程中针茅植物根系格局变化特征. 生态学报, 2017, 37(19): 6571-6580.
- [ 19 ] Zhang Q L, Zhou D W, Hu J. Effects of long-term enclosing on distributions of carbon and nitrogen in semiarid grassland of Inner Mongolia. Ecological Informatics, 2022, 71: 101762.
- [ 20 ] Yang C B, Zhang X P, Ni H J, Gai X, Huang Z C, Du X H, Zhong Z K. Soil carbon and associated bacterial community shifts driven by fine root traits along a chronosequence of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations in subtropical China. The Science of the Total Environment, 2021, 752: 142333.

- [21] 叶柳欣, 库伟鹏, 刘军, 徐旻昱, 孟方荣, 傅伟军, 刘娟, 金锦, 吴家森. 封育年限对毛竹林群落结构和林下植物多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(3): 921-930.
- [22] 张健, 郭倩, 孙一铭, 林丛, 蔡丽平, 张厚喜. 武夷山不同海拔毛竹林土壤碳氮磷的生态化学计量特征. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2022, 51(3): 367-373.
- [23] 张厚喜, 林丛, 程浩, 金昌善, 徐自坤, 魏志超, 马祥庆. 武夷山不同海拔梯度毛竹林土壤有机碳特征及影响因素. 土壤, 2019, 51(4): 821-828.
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [25] 苏樑, 宋同清, 杜虎, 曾馥平, 王华, 彭晚霞, 张芳, 张家涌. 喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段细根生物量、形态特征及其影响因素. 应用生态学报, 2018, 29(3): 783-789.
- [26] Prieto I, Roumet C, Cardinael R, Dupraz C, Jourdan C, Kim J H, Maeght J L, Mao Z, Pierret A, Portillo N, Rouspard O, Thammahacksa C, Stokes A. Root functional parameters along a land-use gradient: evidence of a community-level economics spectrum. *Journal of Ecology*, 2015, 103(2): 361-373.
- [27] 周永姣, 程林, 王满堂, 朱国洁, 钟全林, 郭炳桥, 程栋梁. 武夷山不同海拔黄山松细根性状季节变化. 生态学报, 2019, 39(12): 4530-4539.
- [28] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, Lu M Z, Bardgett R D, Eissenstat D M, McCormack M L, Hedin L O. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 2018, 555: 94-97.
- [29] 邹斌, 蔡飞, 郑景明, 戴伟. 亚热带天然林 4 种树木细根生物量垂直分布和主要功能性状的差异. 东北林业大学学报, 2015, 43(3): 18-22.
- [30] 吴小健, 李秉钧, 颜耀, 吴鹏飞, 李明, 马祥庆. 不同地理种源杉木细根形态及生态化学计量特征. 森林与环境学报, 2023, 43(2): 113-122.
- [31] 孙俊, 王满堂, 袁景西, 程林, 吕敏, 陈晓萍, 钟全林, 程栋梁. 武夷山五种竹子叶、枝、秆碳氮磷化学计量对生长阶段和海拔的响应. 生态学报, 2022, 42(5): 1854-1864.
- [32] Li S Y, Fisk M C, Yanai R D, Fahey T J. Co-limitation of fine root growth by nitrogen and phosphorus in early successional northern hardwood forests. *Ecosystems*, 2024, 27: 33-44.
- [33] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 王满堂, 李曼, 杨福春, 程栋梁. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应. 生态学报, 2018, 38(1): 273-281.
- [34] 陈逸飞, 林晨蕾, 张硕, 郑德祥, 靳少非, 卢丰林, 林建东. 郭岩山不同海拔丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(3): 413-422.
- [35] 黄彪, 刘广路, 范少辉, 刘希珍, 冯云, 农珺清, 申景昕. 毛竹向阔叶林扩展过程细根可塑性变化. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(10): 11-19.
- [36] Yu W Y, Wang C W, Huang Z Y, Wang D L, Liu G F. Variations in the traits of fine roots of different orders and their associations with leaf traits in 12 co-occurring plant species in a semiarid inland dune. *Plant and Soil*, 2022, 472(1-2): 193-206.
- [37] 王志康, 祝乐, 许晨阳, 李艳, 耿增超, 王强, 刘莉丽, 秦一郎, 杜旭光. 秦岭天然林凋落物去除对土壤团聚体稳定性及细根分布的影响. 生态学报, 2022, 42(13): 5493-5503.
- [38] 张进如, 闫晓俊, 贾林巧, 范爱连, 王雪, 陈廷廷, 陈光水. 亚热带天然常绿阔叶林林下 9 种灌木细根形态和 C、N 化学计量特征. 生态学报, 2022, 42(9): 3716-3726.
- [39] Luo W Q, Lan R X, Chen D X, Zhang B W, Xi N X, Li Y Z, Fang S Q, Valverde Barrantes O J, Eissenstat D M, Chu C J, Wang Y S. Limiting similarity shapes the functional and phylogenetic structure of root neighborhoods in a subtropical forest. *New phytologist*, 2021, 229(2): 1078-1090.