

## 滨海沙地不同竹林土壤理化性质与综合评价

李磊<sup>1</sup>, 柳佳莹<sup>1</sup>, 徐艳萍<sup>1</sup>, 荣俊冬<sup>1</sup>, 施成坤<sup>2</sup>, 郑郁善<sup>1\*</sup>

1. 福建农林大学林学院, 福建福州 350002; 2. 福建省东山赤山国有防护林场, 福建东山 363400

**摘要:** 研究滨海沙地不同竹林土壤理化性质差异并评价土壤质量, 旨在充分了解滨海沙地竹林防护林土壤肥力状况, 指导滨海沙地竹林防护林建设和经营。在福建省东山县赤山国有防护林场选取 8 种滨海沙地适生竹林, 分别测定各竹林 0~20 cm 土层土壤理化性质; 采用单因素方差分析对各项指标进行显著性检验, 运用主成分分析、加权综合指数法和模糊数学法, 对不同竹林土壤肥力质量进行综合评价。四季竹 (*Oligostachyum lubricum*) 的土壤含水率、土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤总孔隙度等物理性质指标与其他竹林对应物理性质指标皆存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。土壤 pH 平均变化范围为 5.01~7.36, 除绿竹 (*Bambusa oldhamii*) 土壤 pH 偏中性外, 其他竹林土壤 pH 呈弱酸性, 且均不存在显著性差异 ( $P>0.05$ )。土壤有机质平均变化范围为 4.43~11.06 g/kg, 福建茶秆竹 (*Pseudosasa amabilis* var. *convexa*) 有机质含量显著低于其他竹林。土壤全钾和速效钾平均变化范围分别为 4.59~79.33 g/kg 和 0.78~43.11 mg/kg, 土壤全氮和全磷平均变化范围分别为 0.47~2.42 g/kg 和 0.09~0.37 g/kg, 土壤电导率, 氮、磷、钾全效及速效等养分指标在不同竹林间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。8 种竹林土壤质量由高到底依次为: 矢竹 (*Pseudosasa japonica*) > 四季竹 > 实肚竹 (*Phyllostachys nidularia* f. *farcata*) > 绿竹 > 花吊丝竹 (*Dendrocalamus minor* var. *amoenus*) > 鼓节竹 (*Bambusa tuldooides* 'Swollenintrnode') > 青丝黄竹 (*Bambusa eutuldoides* var. *viridi-vittata*) > 福建茶秆竹。滨海沙地竹林防护林土壤理化性质和总体质量均受竹林类型的显著影响, 矢竹林能有效改善土壤质量, 福建茶秆竹林对土壤的改善作用不明显, 滨海沙地竹林防护林建设经营应合理选择竹种和种植方式。

**关键词:** 滨海沙地; 竹林; 土壤肥力; 主成分分析

中图分类号: S714.8 文献标识码: A

## Soil Physical and Chemical Properties and Comprehensive Evaluation of Different Bamboo Forest in Coastal Sandy Land

LI Lei<sup>1</sup>, LIU Jiaying<sup>1</sup>, XU Yanping<sup>1</sup>, RONG Jundong<sup>1</sup>, SHI Chengkun<sup>2</sup>, ZHENG Yushan<sup>1\*</sup>

1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Dongshan Chishan State-owned Farm, Dongshan, Fujian 363400, China

**Abstract:** In order to determine the quality of soil fertility of bamboo species in coastal sandy land and guide the construction and management of bamboo shelter forest in coastal sandy land, the difference of soil physical and chemical properties of different bamboo forests in coastal sandy land and evaluate the soil quality were studied. Eight bamboo species in coastal sandy land were selected from Chishan State-owned Farm in Dongshan County, Fujian Province. The physical and chemical properties of the 0–20 cm soil layer of each bamboo species were determined. One-way ANOVA analysis was conducted to test the significance of each index, and principal component analysis weighted comprehensive index method and fuzzy mathematics were used to comprehensively evaluate the soil fertility quality of different bamboo species. Soil moisture content, soil density, capillary porosity, non-capillary porosity and total soil porosity of *Oligostachyum lubricum* were significantly different from those of other bamboo forest ( $P<0.05$ ). The average pH of

收稿日期 2022-03-17; 修回日期 2022-05-24

基金项目 福建省区域发展项目 (No. 2015N3015); 福建省科技创新团队项目 (No. 2018[49]); 福建省科技重大专项 (No. 2013 NZ0001)。

作者简介 李磊 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 沿海防护林。\*通信作者 (Corresponding author): 郑郁善 (ZHENG Yushan), Email: zys1960@163.com。

soil ranged from 5.01 to 7.36, and there was no significant difference in the pH of other bamboo forests except the neutral soil pH of *Bambusa oldhamii* ( $P>0.05$ ). The average soil organic from 4.43–11.06 g/kg, *Pseudosasa amabilis* var. *convexa* was significantly lower than that of other bamboo forests. The average range of soil total potassium and available potassium was 4.59–79.33 g/kg and 0.78–43.11 mg/kg. The average range of soil total nitrogen and total phosphorus was 0.47–2.42 g/kg and 0.09–0.37 g/kg, and soil electrical conductivity, total availability and quick availability of N, P, K, had significant differences among different bamboo forests ( $P<0.05$ ). The order of soil fertility quality index order of the eight bamboo species was *P. japonica*>*O. lubricum*>*Phyllostachys nidularia* f. *faricata*>*B. oldhamii*>*Dendrocalamus minor* var. *amoenus*>*B. tuldooides* ‘Swollenintrnode’>*B. eutuldooides* var. *viridi-vittata*>*P. amabilis* var. *convexa*. The physical and chemical properties and total soil quality of bamboo shelterbelt in coastal sandy land were significantly affected by the types of bamboo stands. *P. japonica* could effectively improve soil quality, but the effect of *P. amabilis* var. *convexa* on soil improvement was not obvious. Bamboo species and planting methods should be selected rationally for the construction and management of bamboo shelterbelt in coastal sandy land.

**Keywords:** sandy coast; bamboo; soil fertility; principal component analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.01.022

沿海沙地地区生态环境恶劣, 土壤贫瘠, 沿海防护林的建设和经营尤为重要。森林土壤作为森林生态系统的重要组成部分, 是森林生态系统主要功能可以有效发挥作用的重要物质支撑<sup>[1-2]</sup>。森林土壤对于森林植被的生长和发育以及森林生态系统的营养元素转化和森林健康可持续发展起着关键作用<sup>[3]</sup>。森林植被类型与土壤养分紧密关联, 一方面林木生长从土壤中吸收养分, 植物的生长和分布受土壤养分高低的影响, 另一方面森林植物以凋落物的形式向土壤归还有机质和养分, 进而对土壤养分含量造成影响<sup>[4]</sup>。由于不同林地类型凋落物数量和性质的差异, 养分归还量的不同, 根系分泌物的差异均会导致不同林地间土壤养分含量存在差异<sup>[5-6]</sup>。近年来, 有许多学者对不同地区森林类型对土壤理化性质和土壤质量做了广泛的研究, 如库布齐沙漠<sup>[7]</sup>、南泥湾湿地<sup>[8]</sup>、湘中丘陵区<sup>[9]</sup>、西北地区<sup>[10]</sup>, 杨晓娟等<sup>[11]</sup>对东北低山丘陵区 4 种林分类型林地土壤肥力也做了相关研究, 学者们发现不同森林类型对土壤养分具有显著影响作用。而在沿海沙地地区, 徐馨等<sup>[12]</sup>通过对不同林龄木麻黄土壤养分状况研究发现, 土壤养分是滨海沙地植物生长发育的主要限制因素, ZHENG 等<sup>[13]</sup>研究发现适当的花吊丝竹林分密度对土壤质量具有改良效果。随着对滨海防护林的建设和保护, 人为生产活动逐渐减少, 沙地肥力逐渐降低, 森林自肥能力不强<sup>[14]</sup>。竹子作为耐干旱、贫瘠, 适应性强的植物材料, 繁殖能力强, 根系发达, 鞭根交错, 能较好地发挥防风固沙, 保水保肥等作用<sup>[15-16]</sup>。竹类植物改善土壤质量的研究主要集中在不同竹林培

育措施对于土壤质量的影响<sup>[9, 17]</sup>, 而不同种竹类植物对土壤理化性质的影响研究鲜有报道。鉴于此, 本研究以 8 种滨海沙地适生竹种为研究对象, 借助模糊数学和多元统计分析方法, 通过综合指数计算, 分析比较不同竹林的土壤理化性质特征, 并采用主成分分析方法进行综合评价, 通过对不同竹林土壤质量综合得分比较的角度, 探讨沿海沙地地区不同竹类植物对土壤肥力质量的影响作用, 旨在为滨海沙地地区防护林经营和土壤养分管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区在福建省漳州市东山县赤山国有防护林场, 23°38'N, 117°24'E。属南亚热带海洋性季风气候, 干湿季节明显, 多年年均降雨量 1103 mm, 多年平均蒸发量 2027.9 mm, 雨季主要集中在 5—9 月, 雨量占全年降雨量的 61%。年平均气温为 20.8℃, 极端高温一般出现在 7—8 月, 为 36.6℃, 极端低温一般出现在 12 月和 1 月, 为 3.8℃, 终年无霜冻; 该地多发自然灾害有台风和干旱, 台风多发于每年 7—8 月。土壤类型主要为滨海风积沙土, 结构疏松, 厚度 80~100 cm, 保水保肥能力差。研究区天然植被稀少, 主要防护林树种以木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*)、湿地松 (*Pinus elliottii*) 等适应性和抗性较强树种为主, 林下常见植物有马樱丹 (*Lantana*)、龙舌兰 (*Agave americana*)、蔓荆 (*Vitex trifolia*)、鼠刺 (*Itea chinensis*) 等灌木和零星或小块状分布的草本。沙地地形较为平缓, 坡度为 2~10°, 海拔为 5~10 m。

## 1.2 方法

1.2.1 样地设置 2021年6月通过对东山县赤山林场全面踏查后,为保证立地条件基本一致,在相同原始土壤发育条件及离岸距离相同的条件下,根据植被分布现状和数量,筛选出8种在沿海沙地成功引种的竹种,分别为: I. 福建茶秆竹 (*Pseudosasa amabilis* var. *convexa*)、II. 鼓节竹 (*Bambusa tuldoidea* ‘Swollenintrnode’)、III. 花吊丝竹 (*Dendrocalamus minor* var. *amoenus*)、IV. 绿竹 (*Bambusa oldhamii*)、V. 青丝黄竹 (*Bambusa eutuldoides* var. *viridi-vittata*)、VI. 实肚竹 (*Phyllostachys nidularia* f. *faricata*)、VII. 矢竹 (*Pseudosasa japonica*)、VIII. 四季竹 (*Oligostachyum lubricum*) 作为研究对象,这些竹种在林下呈块状或片状分布,引种时间均在5a以上,自引种以来均未采取人工抚育措施,在滨海沙地的适应性相对较强,长势良好,能自然发展,生长面积相对较大,能满足研究采样要求。同一竹林分别设置3个10 m×10 m样地,共24个样地。8个竹种的竹林样地基本情况见表1,采用“S”型5点采样法在每个样地内设置5个采样点,用土钻采集0~20 cm层土壤,去除土壤中根系和石块等杂质后用四分法取1.0 kg土样,分别装入对应编号的自封袋内,带回实验室风干过筛后用于土壤理化性质的测定。

表 1 样地基本情况  
Tab. 1 Situation of bamboo forests

竹种 Species	株高 Height/m	胸径 Base diameter/cm	平均密度 Average density (culms·m <sup>-2</sup> )
I	2.7±0.9	10.6±2.7	0.63±0.10
II	3.7±0.8	36.6±5.9	0.48±0.06
III	3.1±1.2	27.8±8.4	0.77±0.16
IV	3.6±1.0	28.6±7.4	0.52±0.08
V	4.7±1.1	27.9±6.7	0.68±0.18
VI	2.0±0.6	7.4±1.9	1.73±0.11
VII	2.2±0.3	10.7±1.2	0.96±0.10
VIII	2.8±0.5	10.1±1.5	1.87±0.22

1.2.2 土壤理化性质测试 采用环刀法测定8个竹种的土壤含水率、土壤密度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度等物理性质;采用5:1水土质量比电位法测定土壤pH;采用重铬酸钾硫酸氧化-硫酸亚铁滴定法测定土壤有机质;采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量;采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;采用氢氧

化钠碱熔-火焰光度法测定土壤全钾含量;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量<sup>[18]</sup>。

1.2.3 土壤理化性质综合评价 选择0~20 cm土层各土壤理化因子指标,包括土壤含水率( $X_1$ ),土壤密度( $X_2$ ),毛管孔隙度( $X_3$ ),非毛管孔隙度( $X_4$ ),总孔隙度( $X_5$ ),pH( $X_6$ ),土壤有机质( $X_7$ ),电导率( $X_8$ ),全氮( $X_9$ ),全磷( $X_{10}$ ),全钾( $X_{11}$ ),碱解氮( $X_{12}$ ),有效磷( $X_{13}$ ),速效钾( $X_{14}$ ),将以上不同量纲数据指标首先进行标准化处理,使各指标间具有可比性。

数据标准化处理过程中,各个指标分为正、负2种效应,本研究中土壤密度( $X_2$ )、电导率( $X_8$ )为负效应指标,其余指标均为正效应指标。正、负效应分别选用式(1)和(2)计算。

$$W(X_i) = \frac{X_{i\max} - X_{ij}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (1)$$

$$W(X_i) = \frac{X_{ij} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (2)$$

式中, $W(X_i)$ 表示第*i*项土壤肥力评价指标的隶属度值; $X_{ij}$ 表示第*i*项土壤肥力指标测定平均值; $X_{i\max}$ 为第*i*项指标中的最大值; $X_{i\min}$ 为第*i*项指标中的最小值。

因各指标的重要性存在差异,对土壤肥力的影响程度不同,需通过权重系数反映各指标的重要程度。本研究通过主成分分析对14项指标进行处理,计算得出各指标的公因子方差、方差贡献率和累积方差贡献率,并将各指标公因子方差占总公因子方差的比重作为各指标的权重(式3)。

$$Q_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

式中, $Q_i$ 表示第*i*项土壤肥力评价指标的权重; $C_i$ 为第*i*项土壤肥力评价指标的公因子方差。

最后,在各评价指标隶属度值和权重确定的基础上,用公式(4)对不同竹林的土壤肥力综合指数进行计算。

$$H = \sum Q_i \times W(X_i) \quad (4)$$

式中,H为土壤综合肥力指数。

## 1.3 数据处理

采用Excel 2010软件对数据进行整理,利用隶属度函数对原始数据进行标准化处理,使用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),

利用最小显著性检验 (LSD) 进行多重比较, 运用主成分分析方法计算各竹林土壤综合质量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同竹林土壤物理特性

四季竹土壤物理性质相较于其他 7 种竹林具

有显著差异 (表 2), 其中土壤含水率最高, 为 22.88%, 土壤密度以青丝黄竹和绿竹土壤密度最大, 四季竹土壤密度最小。土壤密度与土壤孔隙度存在显著负相关关系, 不同竹种间土壤总孔隙度差异以四季竹最大, 福建茶秆竹最小, 毛管孔隙度与非毛管孔隙度分布规律相类似。

表 2 不同竹林土壤物理性质  
Tab. 2 Soil physical properties of different bamboo woodlands

竹种 Species	土壤含水率 Soil moisture/%	土壤密度 Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Noncapillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%
I	1.95±0.91 <sup>a</sup>	1.44±0.01 <sup>b</sup>	16.75±0.43 <sup>a</sup>	28.02±1.59 <sup>a</sup>	44.77±1.22 <sup>a</sup>
II	9.00±1.83 <sup>a</sup>	1.43±0.02 <sup>b</sup>	27.27±2.45 <sup>a</sup>	19.95±1.52 <sup>a</sup>	47.22±1.89 <sup>a</sup>
III	5.31±1.09 <sup>a</sup>	1.48±0.03 <sup>b</sup>	17.63±2.59 <sup>a</sup>	25.48±0.60 <sup>a</sup>	43.11±3.19 <sup>a</sup>
IV	6.27±1.18 <sup>a</sup>	1.51±0.06 <sup>b</sup>	20.98±4.00 <sup>a</sup>	21.26±1.50 <sup>a</sup>	42.24±4.63 <sup>a</sup>
V	8.26±1.44 <sup>a</sup>	1.57±0.07 <sup>b</sup>	22.36±4.53 <sup>a</sup>	17.42±3.82 <sup>a</sup>	39.78±1.07 <sup>a</sup>
VI	11.64±5.28 <sup>a</sup>	1.34±0.09 <sup>b</sup>	25.35±2.65 <sup>a</sup>	24.77±1.52 <sup>a</sup>	50.12±2.11 <sup>a</sup>
VII	5.30±3.53 <sup>a</sup>	1.31±0.04 <sup>b</sup>	19.51±3.67 <sup>a</sup>	36.91±0.66 <sup>b</sup>	56.42±3.37 <sup>a</sup>
VIII	22.88±3.86 <sup>b</sup>	0.98±0.04 <sup>a</sup>	39.11±2.57 <sup>b</sup>	27.60±2.51 <sup>a</sup>	66.71±2.91 <sup>b</sup>

注: 同列不同小写字母表示品种间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among species ( $P<0.05$ ).

### 2.2 不同竹林土壤化学性质

由不同竹林地土壤化学性质 (表 3) 可知, 各竹林 pH 平均值变化范围为 5.01~7.36, 除绿竹土壤 pH 偏中性外, 其他竹种的土壤 pH 均呈弱酸性。土壤有机质平均变化范围为 4.43~11.06 g/kg, 速效钾平均变化范围为 0.78~43.11 mg/kg, 变化幅度较大, 其中福建茶秆竹的土壤有机质含量和速效钾含量最低, 仅为 4.43 g/kg 和 0.78 mg/kg。绿竹土壤的水解氮、有效磷和电导率相对较高, 分别为 153.88 mg/kg、90.80 g/kg、157.83  $\mu$ S/cm。各竹林地土壤全氮和全磷平均变化范围分别为 0.47~

2.42 g/kg 和 0.09~0.37 g/kg, 实肚竹和矢竹的全氮和全磷含量相对其他竹种较低。绿竹的碱解氮含量相对较高, 花吊丝竹的速效钾含量为 43.11 mg/kg, 相对其他竹种含量较高。

### 2.3 不同竹林土壤肥力综合评价

2.3.1 指标权重确定 对 8 种竹种土壤 14 项指标标准化处理后, 运用统计软件对其进行主成分分析, 得出各主成分特征值、公因子方差、贡献率和权重。根据主成分分析累积贡献率  $\geq 80\%$  的原则, 提取了前 5 个主成分因子, 其特征值分别为 3.936、2.952、2.311、1.765、1.441, 累积方差贡

表 3 不同竹林地土壤化学性质  
Tab. 3 Soil chemical properties of different bamboo woodlands

竹种 Species	pH	有机质 SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤电导率 EC/( $\mu$ S·cm <sup>-1</sup> )	全氮 TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 AP/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
I	5.80±0.10 <sup>a</sup>	4.43±0.68 <sup>a</sup>	22.87±1.86 <sup>a</sup>	0.70±0.15 <sup>a</sup>	0.16±0.05 <sup>a</sup>	11.10±0.50 <sup>b</sup>	50.14±3.50 <sup>b</sup>	3.32±1.59 <sup>a</sup>	0.78±0.28 <sup>a</sup>
II	5.99±0.11 <sup>a</sup>	8.03±1.80 <sup>ab</sup>	70.10±9.44 <sup>c</sup>	1.74±0.05 <sup>bc</sup>	0.37±0.10 <sup>b</sup>	19.13±0.67 <sup>c</sup>	104.88±10.69 <sup>de</sup>	54.11±4.44 <sup>c</sup>	13.81±1.97 <sup>c</sup>
III	5.55±0.04 <sup>a</sup>	8.89±0.40 <sup>ab</sup>	95.15±3.52 <sup>c</sup>	1.50±0.02 <sup>b</sup>	0.32±0.05 <sup>b</sup>	79.33±2.56 <sup>d</sup>	71.49±3.58 <sup>c</sup>	25.15±2.03 <sup>b</sup>	43.11±1.43 <sup>c</sup>
IV	7.36±0.04 <sup>b</sup>	8.86±1.40 <sup>ab</sup>	157.83±7.16 <sup>d</sup>	2.42±0.20 <sup>d</sup>	0.10±0.06 <sup>a</sup>	4.59±1.87 <sup>a</sup>	117.14±7.07 <sup>c</sup>	90.80±5.40 <sup>d</sup>	10.71±0.48 <sup>bc</sup>
V	6.14±0.12 <sup>ab</sup>	7.67±1.86 <sup>ab</sup>	77.80±9.35 <sup>c</sup>	1.80±0.03 <sup>c</sup>	0.35±0.06 <sup>b</sup>	19.11±1.30 <sup>c</sup>	100.22±4.04 <sup>d</sup>	29.11±2.21 <sup>b</sup>	9.50±2.58 <sup>bc</sup>
VI	5.67±0.12 <sup>a</sup>	10.80±3.67 <sup>b</sup>	12.65±1.00 <sup>a</sup>	0.47±0.04 <sup>a</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	9.37±0.42 <sup>b</sup>	12.72±5.35 <sup>a</sup>	1.34±0.31 <sup>a</sup>	24.58±0.84 <sup>d</sup>
VII	5.37±0.02 <sup>a</sup>	11.06±1.91 <sup>b</sup>	10.94±0.37 <sup>a</sup>	0.53±0.05 <sup>a</sup>	0.09±0.05 <sup>a</sup>	7.26±1.70 <sup>ab</sup>	19.15±1.05 <sup>a</sup>	1.27±0.12 <sup>a</sup>	26.30±1.79 <sup>d</sup>
VIII	5.01±0.03 <sup>a</sup>	8.90±1.86 <sup>ab</sup>	52.47±4.55 <sup>b</sup>	1.57±0.05 <sup>bc</sup>	0.15±0.03 <sup>a</sup>	16.05±1.33 <sup>c</sup>	67.79±7.01 <sup>c</sup>	6.94±1.78 <sup>a</sup>	7.51±4.23 <sup>b</sup>

注: 同列不同小写字母表示品种间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among species ( $P<0.05$ ).

献率达 88.608% (表 4), 5 个主成分因子几乎包括了原始数据的全部信息量, 能够解释系统的变异性信息。其中, 非毛管孔隙度 ( $X_4$ )、pH ( $X_6$ )、全氮 ( $X_9$ )、碱解氮 ( $X_{12}$ ) 在第 1 主成分中发挥了重要作用, 土壤密度 ( $X_2$ )、总孔隙度 ( $X_5$ )、

有效磷 ( $X_{13}$ ) 在第 2 主成分中发挥了重要作用, 毛管孔隙度 ( $X_3$ )、全钾 ( $X_{11}$ ) 在第 3 主成分中发挥了重要作用, 土壤有机质 ( $X_7$ ) 在第 4 主成分中发挥了重要作用, 土壤含水率 ( $X_1$ ) 在第 5 主成分中具有重要作用。

表 4 正交旋转后前 5 个主成分的载荷矩阵、公因子方差、权重  
Tab. 4 Rotated principal component matrix, communality and weight of each indicator

指标 Index	主成分 Principal component					公因子方差 $\sigma^2$ of common factor	权重 Weight
	1	2	3	4	5		
$X_1$	-0.095	-0.490	0.316	0.331	0.718	0.983	0.0730
$X_2$	0.317	-0.836	-0.335	-0.137	0.177	0.997	0.0740
$X_3$	0.137	0.021	-0.710	0.613	0.299	0.995	0.0739
$X_4$	0.874	-0.106	-0.401	-0.100	-0.033	1.000	0.0742
$X_5$	0.525	0.817	0.057	-0.019	-0.061	0.958	0.0711
$X_6$	0.873	-0.185	0.197	-0.121	-0.307	0.944	0.0701
$X_7$	0.548	-0.207	-0.127	-0.701	0.349	0.998	0.0741
$X_8$	-0.397	0.524	0.557	0.042	0.272	0.993	0.0737
$X_9$	0.748	0.236	-0.037	0.378	0.020	0.901	0.0669
$X_{10}$	0.105	0.002	0.460	-0.560	0.401	1.000	0.0742
$X_{11}$	0.307	-0.536	0.598	0.375	-0.080	0.992	0.0736
$X_{12}$	0.693	0.302	0.439	0.066	-0.087	0.827	0.0614
$X_{13}$	-0.247	0.564	-0.547	-0.298	0.249	0.973	0.0722
$X_{14}$	0.586	0.479	0.050	0.233	0.523	0.910	0.0675
特征值	3.936	2.952	2.311	1.765	1.441		
贡献率/%	28.118	21.086	16.504	12.609	10.291		
累积贡献率/%	28.118	49.203	65.708	78.317	88.608		

2.3.2 土壤肥力质量综合得分 从图 1 可知, 不同竹林土壤肥力质量指数介于 0.4490~0.5708 之间, 其大小顺序为矢竹 (0.5708) > 四季竹 (0.5231) > 实肚竹 (0.5202) > 绿竹 (0.4942) > 花吊丝竹

(0.4910) > 鼓节竹 (0.4874) > 青丝黄竹 (0.4867) > 福建茶秆竹 (0.4490), 矢竹林土壤肥力优于其他林分, 其次为四季竹、青丝黄竹, 福建茶秆竹土壤肥力明显低于其他 7 种竹种。

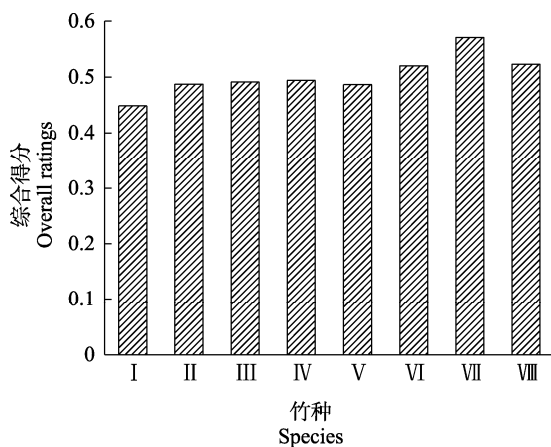


图 1 各竹种土壤肥力质量综合得分  
Fig. 1 Comprehensive score of soil fertility quality of bamboo species

### 3 讨论

植物生长所需养分主要来自土壤, 另一方面土壤养分也受到植物的反作用, 不同类型竹林由于根际效应的差别、凋落物储量及分解程度、土壤动物等因素均存在差异, 进而导致土壤理化性质的差异<sup>[19-20]</sup>。本研究中, 滨海沙地 8 种竹林土壤含水量普遍偏低, 远低于内陆山地地区毛竹林地土壤含水率<sup>[9, 21]</sup>, 这与滨海地区的气候和土质有密切关系, 滨海沙地土壤以沙质结构为主, 保水保肥能力差, 同时由于沿海沙地地区季节性干旱严重, 土壤温度高, 水分蒸发, 土壤呼吸加剧, 从而进一步导致土壤含水量减少。土壤密度、孔隙度及土壤含水率等土壤物理指标是影响土壤肥

力的重要因素<sup>[22]</sup>, 有研究表明, 土壤密度、孔隙度对土壤持水能力有直接影响作用, 土质越疏松, 土壤密度越低, 土壤含水量越高, 土壤透气性和水分有效性更加协调<sup>[11]</sup>。本研究发现, 四季竹的土壤密度显著低于其他 7 种竹林地, 孔隙度高于其他 7 种竹林地, 这直接导致四季竹的土壤持水能力优于其他竹林地。土壤密度和土壤孔隙度都是反映土壤持水能力的敏感性指标, 土壤密度反映的是土壤紧实程度, 它与土壤自身的结构、质地和有机质含量有关<sup>[23]</sup>, 土壤孔隙度决定着土壤的持水能力, 土壤孔隙度的不同会导致土壤对水分和空气的容纳程度不同<sup>[24]</sup>。在本研究中, 8 种竹种土壤密度平均值为  $1.38 \text{ g/cm}^3$ , 密度相较于湖北幕阜山区毛竹林地<sup>[25]</sup>和四川盆地<sup>[26]</sup>竹林地土壤密度更高, 这可能也是导致沙地地区土壤透气性和水分含量偏低的原因。FENG 等<sup>[27]</sup>研究发现, 土壤含水量与土壤有机质间存在强烈耦合作用, 竹林地土壤有机质含量偏低可能也是造成土壤含水量低的原因之一。本研究中 8 种竹林土壤物理性质与徐馨等<sup>[12]</sup>对滨海沙地木麻黄土壤养分状况研究结果相一致, 这表明滨海沙地地区土壤养分相较于内陆山地地区更加匮乏, 但相比于沙地母质土壤养分含量, 土壤肥力有明显提升, 这意味着竹林防护林建设对土壤质量有一定的改善作用, 竹林防护林经营尤为重要。

土壤有机质作为限制土壤肥力的关键因素之一, 是植物生长的养分来源和土壤微生物生命活动的能量来源<sup>[28]</sup>。本研究中, 土壤有机质含量普遍偏低, 均值在  $8.58 \text{ g/kg}$  左右, 处于匮乏水平, 这与 ZHENG 等<sup>[13]</sup>对沿海沙地花吊丝竹竹林土壤有机质的研究结果相同。森林土壤有机质含量高低主要由有机物的输入和输出决定, 森林植被凋落物的积累和分解会对有机物的输入造成影响<sup>[2, 6]</sup>, 本研究中竹林地土壤均为沙质土壤, 母质条件基本一致, 土壤养分的主要生物来源是植被凋落物和根系分泌的有机质。8 种竹林地郁闭度总体水平不高, 林下凋落物较少、分解程度不高, 这是造成滨海竹林地土壤有机质含量及养分元素偏低的重要原因。另一方面土壤有机质含量与土壤中氮、磷、钾等养分元素含量有密切关系<sup>[19]</sup>, 本研究中沙地土壤养分匮乏, 相较于其他内陆地区<sup>[8-10]</sup>养分含量偏低。相较于其他 7 种竹种, 矢竹对水分要求较高, 在受干旱胁迫的影响下, 会导致出笋周期慢, 不出笋及叶片脱落甚至死亡的现象<sup>[29]</sup>。在

季节性干旱时期, 矢竹叶片大量卷曲脱落, 林下凋落物积累量大, 分解程度更高, 这可能导致矢竹林下土壤有机质相较于其他竹种含量更多。

土壤 pH 是土壤化学性质的综合反映, 其与土壤养分元素存在的不同形式、土壤微生物活动状态、土壤养分含量多少有着十分密切的关系。滨海沙地土壤 pH 平均值为 5.86, 除绿竹的土壤偏中性外, 其他竹种的土壤均呈弱酸性, 这可能与滨海沙地土质主要以沙质土壤有关, 同时森林地表枯落物分解所产生的酸性物质通过雨水对土壤进行淋溶也会使土壤 pH 呈酸性<sup>[23]</sup>。滨海沙地土壤盐渍化严重<sup>[24]</sup>, 而姜林等<sup>[10]</sup>研究表明, 土壤盐渍化对土壤 pH 也可能存在一定影响作用, 导致沙地土壤呈弱酸性。8 种竹种土壤 pH 除绿竹较高外, 其他竹种间土壤 pH 差异不显著, 由此可以看出, 不同竹林地土壤由于初始的土壤条件相同, 竹子种植时间较短, 土壤 pH 受竹种类型的影响较小。

在自然状态下, 不同林分间土壤的养分含量主要取决于凋落物厚度及分解状态、根系分泌物的多少和土壤动物及微生物的残体差异等<sup>[6]</sup>。土壤全量养分特征分析土壤中的全氮、全磷、全钾含量能够反映土壤“营养库”中养分总储量水平<sup>[30]</sup>, 不同竹种在滨海沙地种植, 由于适应性强弱、群落结构及枯落物分解存在差异, 从而可能导致不同竹种土壤全量养分含量差异显著。氮素是植物能从土壤中吸收的最大量元素, 植物土壤全氮含量可以用来衡量土壤氮素的基础肥力, 碱解氮含量高低影响着植物的生长状况<sup>[27]</sup>。在本研究中, 主成分分析揭示氮元素是限制滨海沙地土壤养分的主要因素, 滨海沙地土壤氮素水平相对较低, 进而导致土壤基础肥力质量较差。通过对 8 种竹林地土壤养分含量分析比较, 绿竹的土壤全氮含量和碱解氮含量在 8 种竹类植物中最高, 种植绿竹后对于土壤肥力有较好的改善作用。这可能是因为绿竹作为丛生竹, 根系发达, 对于干旱盐碱有一定耐受程度<sup>[31]</sup>, 能使其在一定程度上更加适应滨海沙地地区生态环境, 改善土壤质量。参照全国第二次土壤普查的土壤养分分极标准, 8 种竹林地土壤全磷和全钾含量都属于低水平, 这是因为在偏酸性的沙地土壤中, 磷元素易与铁、铝的氢氧化物及其离子形成不溶性的磷酸盐沉淀, 导致沙地土壤磷含量普遍偏低<sup>[4]</sup>。郑翔等<sup>[32]</sup>研究表明, 土壤钾元素的来源主要是含钾元素矿物的

风化, 土壤表层的速效钾含量对植物的生长起着决定性作用。本研究中竹林土壤磷钾元素一定程度上受到竹类植物根系分布及吸收的影响, 但总体影响较小, 这与刘永贤等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。

#### 4 结论

本研究分析滨海沙地 8 种适生竹林的土壤理化性质特征并综合评价土壤质量, 结果表明, 不同竹林对土壤理化性质影响差异显著, 从而导致不同竹林间土壤质量的异质性。沿海沙地不同竹林土壤含水率偏低, 最高为 22.88%, 四季竹土壤密度及孔隙度与其他竹种间存在显著差异, 但其他 7 种竹种土壤密度及孔隙度差异不显著。竹林土壤 pH 平均变化范围为 5.01~7.36, 除绿竹土壤 pH 偏中性, 其他竹林土壤呈弱酸性。不同竹林间土壤有机质平均变化范围为 4.43~11.06 g/kg, 土壤全钾和速效钾平均变化范围分别为 4.59~79.33 g/kg 和 0.78~43.11 mg/kg, 土壤全氮和全磷平均变化范围分别为 0.47~2.42 g/kg 和 0.09~0.37 g/kg, 土壤主要化学性质在不同竹林间差异显著。不同竹林类型土壤质量综合评价指数排序如下: 矢竹>四季竹>实肚竹>绿竹>花吊丝竹>鼓节竹>青丝黄竹>福建茶秆竹。本研究通过土壤质量指数法, 对福建省赤山国有防护林场 8 种滨海沙地竹种进行土壤肥力质量评价的探讨, 揭示滨海沙地地区竹林防护林土壤肥力质量状况, 表明在沙地种植竹子能够在一定程度上提高土壤肥力及改善沙地土壤恶劣生态环境, 对于滨海沙地防护林生态系统的可持续经营管理具有重要实际意义。本研究发现, 土壤水分也是限制沙地土壤肥力的一大重要因素, 在今后的研究中, 可以对滨海沙地土壤水分效应进行进一步深入探讨, 为滨海沙地防护林建设和经营提供更有利指导。

#### 参考文献

- [1] MARTENS R, INSAM H. Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China[J]. Pergamon, 1992, 24(9): 865-872.
- [2] 梁洋, 邵森, 马冰倩. 太岳山油松人工林土壤质量随林龄的演变特征[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(3): 581-589. LIANG Y, SHAO S, MA B Q. Characteristics of soil quality evolution with stand age in *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(3): 581-589. (in Chinese)
- [3] GARRIGUES E, CORSON M S, ANGERS D A, VAN DER WERF H M G, WALTER C. Soil quality in life cycle assessment: towards development of an indicator[J]. Ecological Indicators, 2012, 18: 434-442.
- [4] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 崔鸿侠, 唐万鹏, 周文昌, 潘磊, 姜琦. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 156-166. WANG X R, HU W J, PANG H D, CUI H X, TANG W P, ZHOU W C, PAN L, JIANG Q. Soil physicochemical properties and soil quality of main forest types in Hubei Province[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, 40(11): 156-166. (in Chinese)
- [5] 刘永贤, 熊柳梅, 韦彩会, 谭宏伟, 杨尚东, 农梦玲, 曾艳, 黄国勤, 赵其国. 广西典型土壤上不同林分的土壤肥力分析与综合评价[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5229-5233. LIU Y X, XIONG L M, WEI C H, TAN H W, YANG S D, NONG M L, ZENG Y, HUAG G Q, ZHAO Q G. Soil fertility analysis and comprehensive evaluation of different stands on typical soils in Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5229-5233. (in Chinese)
- [6] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646. HU C J, GUO L. Research progress on ecological effects of vegetation restoration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1640-1646. (in Chinese)
- [7] 刘江, 袁勤, 张立欣, 代香荣, 刘向阳, 丁茹, 叶丽娜. 库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 46-53. LIU J, YUAN Q, ZHANG L X, DAI X R, LIU X Y, DING R, YE L N. Soil fertility and quality of different artificial shrub lands in the northern edge of the Kubuqi Desert[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2021, 36(2): 46-53. (in Chinese)
- [8] 周永维, 葛瑶, 艾宁, 郝宝宝, 李阳, 强大宏, 刘长海. 南泥湾湿地不同植被类型土壤养分变化规律与肥力评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 76-80. ZHOU Y W, GE Y, AI N, HAO B B, LI Y, QIANG D H, LIU C H. Soil nutrient variation and fertility evaluation under different vegetation types in Nanniwan Wetland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 76-80. (in Chinese)
- [9] 漆良华, 范少辉, 艾文胜, 刘广路, 孟勇, 杜满义, 唐晓鹿. 湘中丘陵区竹杉混交对毛竹林土壤质量的影响[J]. 山地学报, 2012, 30(3): 314-320. QI L H, FAN S H, AI W S, LIU G L, MENG Y, DU M Y, TANG X L. Effects of mixed bamboo and fir trees on soil quality in phyllostachys pubescens forest in hilly area of central Hunan[J]. Journal of mountain, 2012, 30(3): 314-320. (in Chinese)

- [10] 姜林, 耿增超, 张雯, 陈心想, 余雕, 张强, 崔乐乐, 王宏翔, 郭永利. 宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1982-1993.  
JIANG L, GENG Z C, ZHANG W, CHEN X X, SHE D, ZHANG Q, CUI L L, WANG H X, GUO Y L. Soil fertility characteristics of typical forest types in Helan and Liupan Mountains, Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1982-1993. (in Chinese)
- [11] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 李旭, 李卫松. 吉林省东部低山丘陵区 4 种林分类型林地的土壤肥力分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 142-148.  
YANG X J, WANG H Y, LIU L, LI X, LI W S. Soil fertility analysis of four forest types in the hilly region of eastern Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 142-148. (in Chinese)
- [12] 徐馨, 王法明, 邹碧, 李钦禄, 王刚, 李应文, 凌青云, 李志安. 不同林龄木麻黄人工林生物多样性与土壤养分状况研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1514-1522.  
XU X, WANG F M, ZOU B, LI Q L, WANG G, LI Y W, LIN Q Y, LI Z A. Biodiversity and soil nutrient status of *Casuarina equisetifolia* plantations at different ages[J]. Journal of Ecology and Environment, 2013, 22(9): 1514-1522. (in Chinese)
- [13] ZHENG J M, CHEN X Y, CHEN L G, HE T Y, RONG J D, LIN Y, ZHENG Y S. Comprehensive evaluation of soil quality at different stand densities of *Dendrocalamus minor* var. *amoenus* plantations[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(4): 5985-5996.
- [14] 岳新建, 叶功富, 高伟, 陈智勇, 陈梦媛, 李蝶. 海岸沙地主要森林的凋落物分解及生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 77-83.  
YUE X J, YE G F, GAO W, CHEN Z Y, CHEN M Y, LI D. Litter decomposition and ecological stoichiometry of major forests in coastal sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 77-83. (in Chinese)
- [15] 郑晶晶, 蔡锰柯, 林宇, 魏建康, 陈礼光, 荣俊冬, 郑郁善. 6 种不同沿海防护混交林凋落叶持水性性能比较[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 111-116.  
ZHEN J J, CAI M K, LIN Y, WEI J K, CHEN L G, RONG J D, ZHEN Y S. Comparison of leaf litter water holding capacity of 6 different coastal protection mixed forests[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 111-116. (in Chinese)
- [16] TU Z H, CHEN L, YU X X, ZHENG Y. Rhizosphere soil enzymatic and microbial activities in bamboo forests in southeastern China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 60(2): 134-144.
- [17] 曾宪礼, 苏文会, 范少辉, 景雄, 储昊煜. 带状采伐毛竹林土壤质量评价[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3015-3023.  
ZENG X L, SU W H, FAN S H, JING X, CHU H Y. Evaluation of soil quality in *phyllostachys heterocyclus* cv. *pubescens* zonal cutting[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(10): 3015-3023. (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3 edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [19] 杨清培, 欧阳明, 杨光耀, 宋庆妮, 郭春兰, 方向民, 陈昕, 黄兰, 陈伏生. 竹子生态化学计量学研究: 从生物学基础到竹林培育学应用[J]. 植物生态学报, 2016, 40(3): 264-278.  
YANG Q P, OUYANG M, YANG G Y, SONG Q N, GUO C L, FANG X M, CHEN X, HUANG L, CHEN F S. Ecological stoichiometry of bamboos: from biological basis to cultivation of bamboos[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(3): 264-278. (in Chinese)
- [20] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.  
WEI Q, LIN L, CAI C S, ZHANG G Z, YAN P B, TAO J X, XUE R. Soil physicochemical properties during forest succession in Xinglong Mountain, Gansu province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4700-4713. (in Chinese)
- [21] 张洋洋, 凡莉莉, 徐文达, 阿卜来提·达伍提, 荣俊冬, 郑郁善. 带状采伐后不同时期毛竹林恢复和土壤养分特征[J]. 西北植物学报, 2020, 40(8): 1407-1413.  
ZHANG Y Y, FAN L L, XU W D, ABLETI D, RONG J D, ZHENG Y S. Restoration and soil nutrient characteristics of *Phyllostachys pubescens* forest at different stages after strip cutting[J]. Acta Botanica Sinica of Northeast China, 2020, 40(8): 1407-1413. (in Chinese)
- [22] 刘欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 735-743.  
LIU X, PENG D L, QIU X C. Differences of soil physical and chemical properties of *Larix principis-rupprechtii* in different forest types[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4): 735-743. (in Chinese)
- [23] WANG G, YU K, GOU Q. Effects of sand burial disturbance on establishment of three desert shrub species in the margin of oasis in Northwestern China[J]. Ecological Research, 2019, 34(1): 127-135.
- [24] 陈洋芳. 我国南方滨海地区植被修复的主要难题—盐雾危害[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.  
CHEN Y F. Salt spray is the main problem of vegetation restoration in coastal areas of south China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017. (in Chinese)

- [25] 胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 黄发新, 杨佳伟, 徐丽君, 龚苗. 竹林密度和施肥种类对幕阜山区毛竹笋产量和品质及土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(12): 32-42.  
HU W J, PANG H D, HU X Y, HUANG F X, YANG J W, XU L J, GONG M. Effects of forest density and fertilization types on yield and quality of Bamboo shoot and soil physical and chemical properties in Mufu Mountain[J]. Forest Science, 2021, 57(12): 32-42. (in Chinese)
- [26] 陈本学, 刘广路, 蔡春菊, 李雁冰. 不同施肥方式对毛竹林碳储量及土壤理化性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(3): 323-328.  
CHEN B X, LIU G L, CAI C J, LI Y B. Effects of different fertilization methods on carbon storage and soil physical and chemical properties in *Phyllostachys moso* forest[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(3): 323-328. (in Chinese)
- [27] FENG Z Z, TOBIAS R, HÅKAN P, GOERAN W, PETER B R, CLAUDIA I K, PAUL C D N, KAZUHIKO K, LUO Y J, JOHAN U. Constraints to nitrogen acquisition of terrestrial plants under elevated CO<sub>2</sub>[J]. Global Change Biology, 2015, 21(8): 3152-3168.
- [28] AMADOR J A, GÖRRES J H, SAVIN M C. Role of soil water content in the carbon and nitrogen dynamics of *Lumbricus terrestris* L. burrow soil[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 28(1): 15-22.
- [29] 向君, 樊利华, 张楠楠, 吴淑兰, 郭敏, 周星梅, 王彦杰. 施磷对于旱胁迫下箭竹根际土壤养分及微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2021(23): 1-10.  
XIANG J, FAN L H, ZHANG N N, WU S L, GUO M, ZHOU X M, WANG Y J. Effects of phosphorus application on soil nutrients and microbial communities in *Fargesia spathacea* Franch under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021(23): 1-10. (in Chinese)
- [30] 和丽萍, 李贵祥, 孟广涛, 柴勇, 李宁云. 高黎贡山不同森林类型土壤肥力状况研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 116-121.  
HE L P, LI G X, MENG G T, CAI Y, LI N Y. Soil fertility of different forest types in Gaoligong Mountain[J]. Research of Soil and Water Conversation, 2015, 22(6): 116-121. (in Chinese)
- [31] 涂志华, 潘瑞, 卢仁锋, 洪雪沿, 陈慧丽, 荣俊冬, 郑郁善. 沿海沙地 8 个竹种根际土壤的酶活性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 243-247.  
TU Z H, PAN R, LU R F, HONG X Y, CHEN H L, RONG J D, ZHENG Y S. Enzyme activities of rhizosphere soils of 8 bamboo species in coastal sandy land[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition) 2012, 41(3): 243-247. (in Chinese)
- [32] 郑翔, 李真真, 郑利亚, 刘倩, 郭晓敏, 牛德奎. 武功山不同海拔高度土壤速效钾与植物全钾分布格局及相关性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(4): 211-214.  
ZHENG X, LI Z Z, ZHENG L Y, LIU Q, GUO X M, NIU D K. Distribution pattern and correlation between soil available potassium and plant total potassium at different elevations in Wugong Mountain[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 211-214. (in Chinese)