

郝佳, 刘宇航, 殷洁, 等. 不同磷浓度对土壤理化性质及防风生长和药材品质的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(3): 59-67.  
HAO Jia, LIU Yuhang, YIN Jie, et al. Effects of different phosphorus concentrations on soil physicochemical property, growth and medicinal materials quality of *Saposhnikovia divaricata*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(3): 59-67.

# 不同磷浓度对土壤理化性质及防风 生长和药材品质的影响

郝佳, 刘宇航, 殷洁, 刘晶, 田新, 韩忠明, 王云贺, 韩梅, 杨利民  
(吉林农业大学 中药材学院/吉林省生态恢复与生态系统管理重点实验室, 吉林 长春 130118)

**摘要:**【目的】探讨不同磷浓度处理对土壤特性及防风 *Saposhnikovia divaricata* 生长状况、色原酮含量的影响, 为防风人工栽培的技术策略制定以及防风对低磷胁迫响应机制的研究提供理论依据。【方法】以 2 年生防风为材料, 设置营养液磷 ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) 浓度分别为 1.0、0.1 和 0 (无磷)  $\text{mmol/L}$ , 分别在 30、60、90 d 时测定土壤理化性质及防风生长特性和 4 种色原酮总含量, 分析不同磷浓度处理防风各指标与 4 种色原酮总含量的关系。【结果】无磷处理下, 2 年生防风根粗、根生物量在整个处理期间均低于 1.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理, 根长在 90 d 时显著高于 1.0 和 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理; 土壤 pH 在 60 d 后表现为 1.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理显著高于 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和无磷处理; 土壤有机质含量在整个试验期表现为 1.0 和 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理显著低于无磷处理; 90 d 时, 无磷处理的土壤碱解氮含量显著高于 1.0 和 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理, 而土壤有效磷含量 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理显著高于无磷处理, 4 种色原酮总含量 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和无磷处理显著高于 1.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理。防风根系土壤中酸性磷酸酶活性在 30 d 时, 3 种磷处理间存在显著差异。1.0  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理下, 根长、根鲜生物量与 4 种色原酮总含量呈正相关; 0.1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷处理下, 碱解氮、有效磷含量和根鲜生物量均与 4 种色原酮总含量呈正相关; 无磷处理下 pH、碱解氮含量、酸性磷酸酶活性均与 4 种色原酮总含量呈正相关。【结论】防风面对磷胁迫有一系列响应机制, 有效成分 4 种色原酮总含量显著增加, pH、有机质、碱解氮等与酸性磷酸酶协同作用, 保证防风对养分的吸收利用。

**关键词:** 防风; 磷; 色原酮; 生物量; 药材品质; 低磷胁迫; 土壤理化性质  
**中图分类号:** R282.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-411X(2022)03-0059-09

## Effects of different phosphorus concentrations on soil physicochemical property, growth and medicinal materials quality of *Saposhnikovia divaricata*

HAO Jia, LIU Yuhang, YIN Jie, LIU Jing, TIAN Xin, HAN Zhongming, WANG Yunhe, HAN Mei, YANG Limin  
(College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University/Key Laboratory for Ecological Restoration and Ecosystem Management of Jilin Province, Changchun 130118, China)

**Abstract:** 【Objective】To discuss the effects of different phosphorus concentrations on soil characteristics,

收稿日期: 2021-04-23      网络首发时间: 2021-12-27 12:26:36  
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20211224.1719.002.html>  
作者简介: 郝佳, 硕士研究生, 主要从事野生动植物保护与利用研究, E-mail: 1719809814@qq.com; 通信作者: 韩忠明, 教授, 博士, 主要从事中药资源生态学研究, E-mail: hanzm2008@126.com  
基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC1710700, 2019YFC1710702); 吉林省科技发展规划 (20200404010YY, 20210204011YY); 中央财政林业科技推广示范项目 (JLT2020-22, JLT2021-03); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-21); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究 (JJKH20190936KJ)

growth status and chromone content of *Saposhnikovia divaricata*, and provide theoretical basis for technical strategy formulation of *S. divaricata* artificial cultivation and responding mechanism research of *S. divaricata* to low phosphorus stress. 【Method】 Two-year-old *S. divaricata* was used as material, and three phosphorus treatments with  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  concentration of 1.0, 0.1 and 0 (no phosphorus) mmol/L respectively were set up. The soil physical and chemical properties, and the growth characteristics and total contents of four kinds of chromones in *S. divaricata* were determined on the 30th, 60th, and 90th day to analyze the correlativity between the various indicators and total chromone content under different phosphorus concentrations. 【Result】 The root diameter and weight of 2-year-old *S. divaricata* in no phosphorus treatment were lower than those of 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment during the whole treatment period, and the root length after 90 d of treatment was significantly higher than those of 1.0 and 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatments. After 60 d of treatment, the soil pH of 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment was significantly higher than those of 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> and no phosphorus treatments. The contents of soil organic matter in 1.0 and 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatments were significantly lower than that in no phosphorus treatment during the whole treatment period. After 90 d of treatment, the alkali-hydrolyzable nitrogen content in soil of no phosphorus treatment was significantly higher than those of 1.0 and 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatments, whereas the available phosphorus content in soil of 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment was significantly higher than that of no phosphorus treatment, the total content of four chromones of 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> and no phosphorus treatments were significantly higher than that of 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment. On the 30 th day of treatment, the activities of acid phosphatase in soil among three treatments were significantly different. There were positive correlations between root diameter/root fresh biomass and chromone content in 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment, between alkali-hydrolyzable nitrogen content/available phosphorus content/root fresh biomass and chromone content in 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> phosphorus treatment, between pH/alkali-hydrolyzable nitrogen content /acid phosphate activity and chromone content in no phosphorus treatment, respectively. 【Conclusion】 *S. divaricata* has a series of response mechanisms to phosphorus stress, including chromone content significantly increasing, synergistic interaction of pH, organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen and acid phosphatase, which ensures the absorption and utilization of nutrients by *S. divaricata*.

**Key words:** *Saposhnikovia divaricata*; Phosphorus; Chromone; Biomass; Medicinal materials quality; Low phosphorus stress; Soil physicochemical property

土壤理化性质是衡量土壤综合生产力的重要指标,对作物产量和品质起着关键性作用,研究表明,土壤有效养分(尤其是土壤碱解氮、有效磷和速效钾)与作物品质及养分吸收量间存在一定的相关关系<sup>[1]</sup>。对药用植物而言,土壤养分是影响药材产量和品质的重要环境因子。在实际生产过程中发现,尤其在逆境条件下,药用植物栽培前后土壤养分变化非常明显<sup>[2-3]</sup>,导致药材质量也具有一定差异。磷素是植株生长所需的大量元素之一,主要作用是促进根系生长和果实发育,但在我国乃至全球的环境下,磷素一直处于严重匮乏的状况,研究表明,当磷供给不能满足植物生长时,会出现植株新陈代谢受阻、生长繁殖迟缓、对环境的不良刺激抗性变弱等症状<sup>[4]</sup>。当土壤全磷质量分数低于 0.03% 时,土壤往往表现缺少有效磷。因此,在磷胁迫下,

植物会形成一系列的响应策略,同时土壤养分含量的变化反过来影响着药用植物的生长发育及药材质量。

防风 *Saposhnikovia divaricata* 是我国常用大宗中药材之一,以未抽薹的干燥根入药,具有解表祛风、胜湿、止痉等作用<sup>[5]</sup>,其主要药效成分为色原酮类,主要包括升麻素苷、升麻素、5-O-甲基维斯阿米醇苷和亥茅酚苷等<sup>[6-8]</sup>。近年来,对防风的水分、光照以及化学成分等方面研究较多<sup>[8-11]</sup>,而不同磷浓度处理对防风影响的研究鲜见报道。本研究以 2 年生防风为试验材料,就不同磷浓度对防风生长特性、4 种色原酮总含量及土壤理化性质的影响开展研究,揭示防风对低磷环境的响应,旨在为吉林省西部缺磷环境条件下防风人工栽培技术策略的制定以及防风对低磷环境响应机制的研究提供理论

依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

在吉林省长春市吉林农业大学人工气候室内, 采用室内圆柱沙培的方式进行试验, 柱高 50 cm, 口径 10 cm, 每桶装洗净的沙子 3.3 kg, 沙子的有效磷、速效钾、碱解氮质量分数分别为 0.05、47.06、22.15 mg/kg, 有机质质量分数为 0.57 mg/g。2019 年 6 月播种, 期间保证水分充足, 7 月齐苗后, 每柱定苗 1 株。

### 1.2 试验设计

参考全国以及分布区内防风土壤中有效磷含量, 试验共设计了 3 个磷浓度处理, 采用 Hoagland 营养液浇灌<sup>[12-13]</sup>的方式供应营养液, 营养液的磷( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )浓度分别为 1.0、0.1 和 0 mmol/L, 其他营养元素供应均相同。2020 年 6 月 15 日开始供应营养液, 每个处理的营养液浇灌时间均相同, 每 10 天 1 次, 每柱浇灌营养液 100 mL, 每个处理设置 50 柱。分别于处理 30、60 和 90 d 采土样, 每个处理随机取防风 10 株。

### 1.3 试验方法

1.3.1 土壤指标测定 将土壤自然晾干后, 过筛, pH、电导率( $\kappa$ )采用 pH 计法测定, 有机质含量采用重铬酸钾容量法测定, 碱解氮含量采用碱解扩散法测定, 有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定<sup>[14]</sup>, 酸性磷酸酶活性采用苯磷酸二钠法测定<sup>[15]</sup>。

1.3.2 生长指标测定 防风样品置于冰盒中带回实验室, 用流水迅速清洗干净, 吸干表面水分, 分别测量防风根长、根粗, 并称量根鲜生物量, 烘干后称量根干生物量。

1.3.3 4 种色原酮总含量测定 将干燥的防风根用粉碎机粉碎, 过 100 目筛, 精确称取 0.5 g 样品, 加入  $\varphi$  为 70% 的乙醇 15 mL, 在微波萃取仪中, 90 ℃ 条件下提取 3 min, 收集滤液, 采用 Agilent 1260 高效液相色谱仪测定 4 种色原酮的总含量, 4 种色原酮分别为升麻素苷、升麻素、5-O-甲基维斯阿米醇苷和亥茅酚苷。色谱条件: 色谱柱为 Diamonsil  $\text{C}_{18}$ (4.6 mm × 200 mm, 5  $\mu\text{m}$ ), 柱温 30 ℃, 检测波长 254 nm。甲醇-水梯度洗脱: 0~15 min,  $\varphi$  为 20%~45% 的甲醇; 15~25 min,  $\varphi$  为 45%~70% 的甲醇。流速 1 mL/min<sup>[6, 16]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

利用 Excel 2010 对原始数据进行整理, 采用 DPS12.01 统计软件对数据统计分析, 使用 Origin

9.5 软件绘图。

## 2 结果与分析

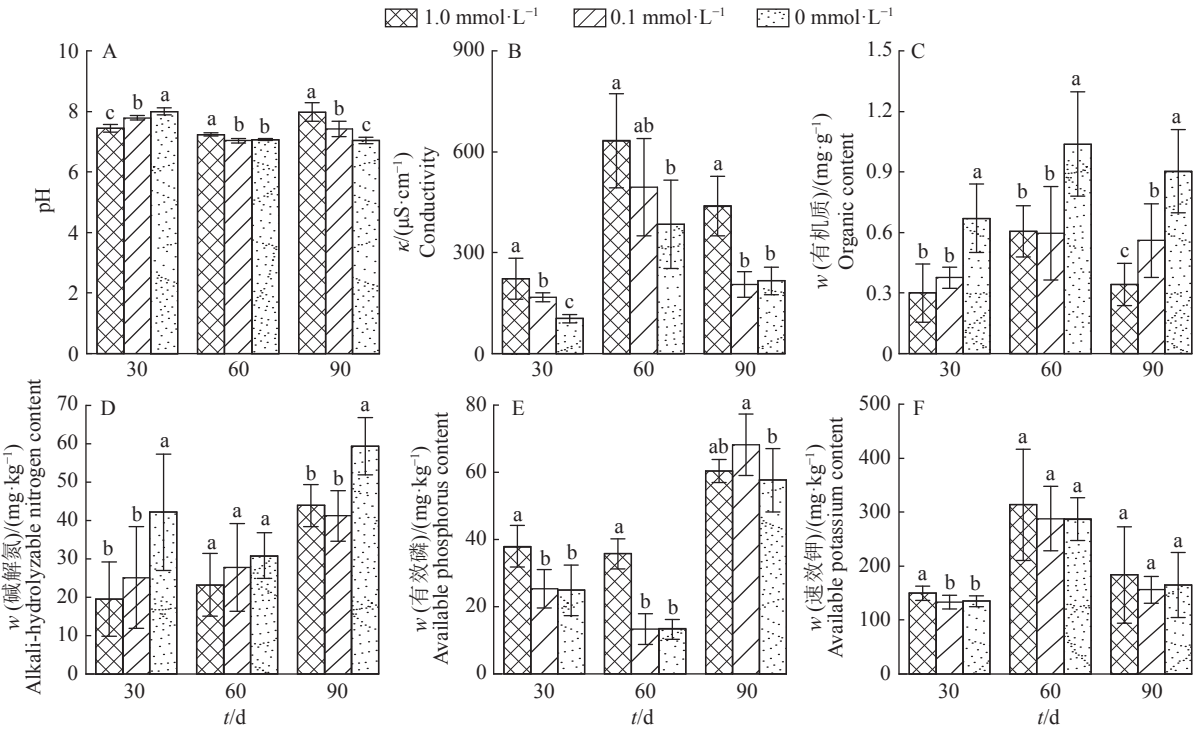
### 2.1 不同磷浓度对防风土壤理化性质的影响

#### 2.1.1 不同磷浓度对防风土壤养分含量的影响

如图 1 所示, 土壤 pH(图 1A) 在处理 30 d 时 3 种磷浓度处理间存在显著差异, 无磷处理的 pH 显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 随着处理时间的延长, 60 d 时 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的 pH 显著降低, 较 30 d 时分别降低了约 12%, 90 d 时 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的 pH 显著低于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 分别降低了 7% 和 12%, 3 种处理间差异显著。土壤电导率(图 1B) 在整个试验期间表现为 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理显著高于无磷处理, 在 30、60 和 90 d 时分别为无磷处理的 2.14、1.64 和 2.03 倍。土壤有机质含量(图 1C) 在整个试验期间表现为无磷处理显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 在 30、60 和 90 d 时, 无磷处理的土壤有机质含量较 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理分别提升了 1.23、0.72 和 1.63 倍, 较 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理分别提升了 0.78、0.74 和 0.61 倍。

处理 30 d 时土壤碱解氮含量(图 1D) 表现为无磷处理显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 60 d 时 3 种处理间无显著差异, 90 d 时各处理的碱解氮含量均升为最大值, 且无磷处理显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 分别为 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理的 1.35 和 1.44 倍。土壤有效磷含量(图 1E) 在处理 30 和 60 d 时表现为 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理显著低于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 且分别较 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下降了约 34% 和 63%, 随着处理时间的延长, 90 d 时的土壤有效磷含量积累到最大值, 且 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理显著高于无磷处理。0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的速效钾含量(图 1F) 在整个处理期间无显著差异, 在 30 d 时 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理的速效钾含量显著高于 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理。

2.1.2 不同磷浓度对防风土壤酸性磷酸酶活性的影响 磷酸酶活性是评价土壤磷素生物转化方向及强度的指标, 酸性磷酸酶参与有机磷的转化, 因此被认为是研究低磷胁迫下磷代谢的重要酶<sup>[17]</sup>。如图 2 可知, 2 年生防风根系土壤中酸性磷酸酶活性在处理 30 d 时为无磷处理 > 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理 > 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 3 种处理间存在显著差异, 处理 60 和 90 d 时 3 种处理间无显著差异。因此, 试验初期, 缺磷(0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷) 处理下, 防风增加酸性磷酸酶的分泌, 以此转化更多的无机磷供自身吸收利用。

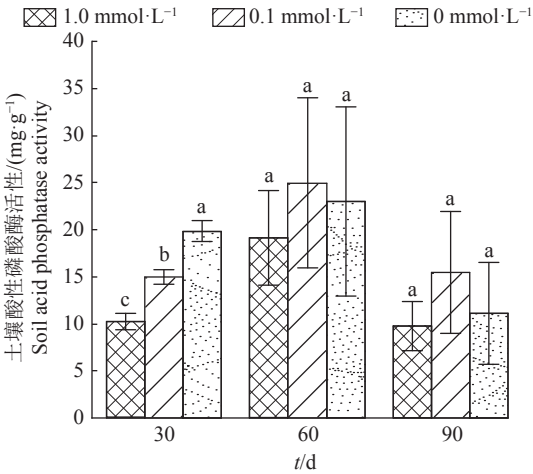


各图中，相同处理时间柱子上的不同小写字母表示不同磷浓度间差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the columns of the same treatment time indicate significant differences among different phosphorus concentrations ( $P<0.05$ , Duncan's method)

图 1 不同磷浓度对防风土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effects of different phosphorus concentrations on physicochemical properties of soil in which *Saposhnikovia divaricata* was grown



相同处理时间柱子上的不同小写字母表示不同磷浓度间差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns of the same treatment time indicate significant differences among different phosphorus concentrations ( $P<0.05$ , Duncan's method)

图 2 不同磷浓度对防风土壤酸性磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different phosphorus concentrations on acid phosphatase activity of soil in which *Saposhnikovia divaricata* was grown

2.2 不同磷浓度对防风生长的影响

如图 3 可知，根长 (图 3A) 在处理 30 d 时 3 种磷浓度无显著差异，处理 60 d 时无磷处理的根长

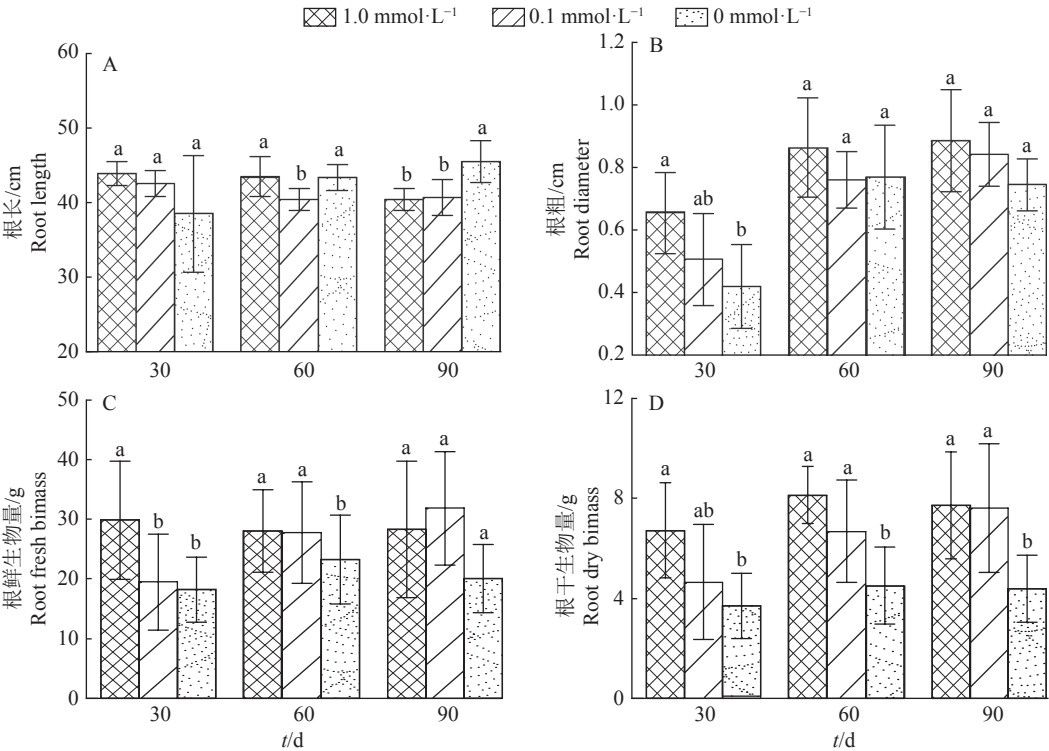
显著高于 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理，90 d 时无磷处理的根长显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理，均高出 12% 左右。根粗 (图 3B) 表现为在整个试验期间 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理高于 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理，30 d 时 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理与无磷处理之间存在显著差异，根粗增加，3 种磷水平间差异缩小；根鲜生物量 (图 3C) 在处理 30 d 时 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理显著高于 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理；根干生物量 (图 3D) 在整个试验期间表现为 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理显著高于无磷处理。说明，磷胁迫 (无磷处理) 下 2 年生防风地下部分生长受到了限制，根生物量显著降低。

2.3 不同磷浓度对防风药材品质的影响

由图 4 可以看出，处理 30 和 60 d 时防风 4 种色原酮总含量在 3 个磷浓度间无显著差异，处理 90 d 时 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的 4 种色原酮总含量显著高于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理，且分别高出 59% 和 46%。结果表明，防风在长期的磷胁迫下，会通过增加次生代谢产物色原酮来适应外界环境。

2.4 土壤理化性质、防风生长指标与 4 种色原酮总含量的相关关系

2.4.1 相关性分析 不同磷浓度处理下土壤理化

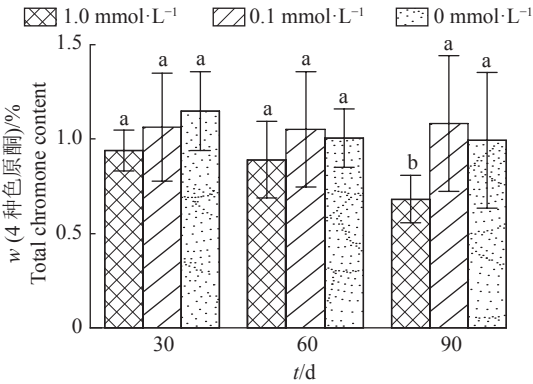


各图中, 相同处理时间柱子上的不同小写字母表示不同磷浓度间差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the columns of the same treatment time indicate significant differences among different phosphorus concentrations ( $P<0.05$ , Duncan's method)

图 3 不同磷浓度对防风生长的影响

Fig. 3 Effects of different phosphorus concentrations on growth of *Saposhnikovia divaricata*



相同处理时间柱子上的不同小写字母表示不同磷浓度间差异显著 ( $P<0.05$ , Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns of the same treatment indicate significant differences among different phosphorus concentrations ( $P<0.05$ , Duncan's method)

图 4 不同磷浓度下防风 4 种色原酮总含量变化

Fig. 4 Changes in total content of four chromones of *Saposhnikovia divaricata* in different phosphorus concentrations

性质、防风生长指标和 4 种色原酮总含量的相关关系见图 5, 从图 5 中可以看出, 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 碱解氮、有效磷含量与 4 种色原酮总含量存在极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 根长与 4 种色原酮总含量呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 根鲜质量与 4 种色原酮总

含量呈正相关, 其他各指标均与 4 种色原酮总含量呈负相关; 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, pH、碱解氮含量、酸性磷酸酶活性与 4 种色原酮总含量呈正相关, 其他指标均与 4 种色原酮总含量呈负相关; 无磷处理下, 碱解氮、有效磷含量和根鲜生物量与 4 种色原酮总含量呈正相关, 其他指标与色原酮含量存在负相关。

**2.4.2 灰色关联度分析** 表 1 为不同磷浓度处理下土壤理化性质、防风生长指标与 4 种色原酮总含量的灰色关联度矩阵。从表 1 中可以看出, 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 各因子与 4 种色原酮总含量的关联系数在 0.270~0.496 之间, 与 4 种色原酮总含量的关联系数最大的为根长; 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 各因子与 4 种色原酮总含量的关联系数在 0.297~0.459 之间, 与 4 种色原酮总含量的关联系数最大的为酸性磷酸酶活性; 无磷处理下, 各因子与 4 种色原酮总含量的关联系数在 0.292~0.524 之间, pH 和根长是与 4 种色原酮总含量关联系数最大的 2 个因子, 分别为 0.524 和 0.500。

**2.4.3 通径分析** 通径分析可将相关系数分解为直接作用和间接作用, 从而清楚地显示各因素的相

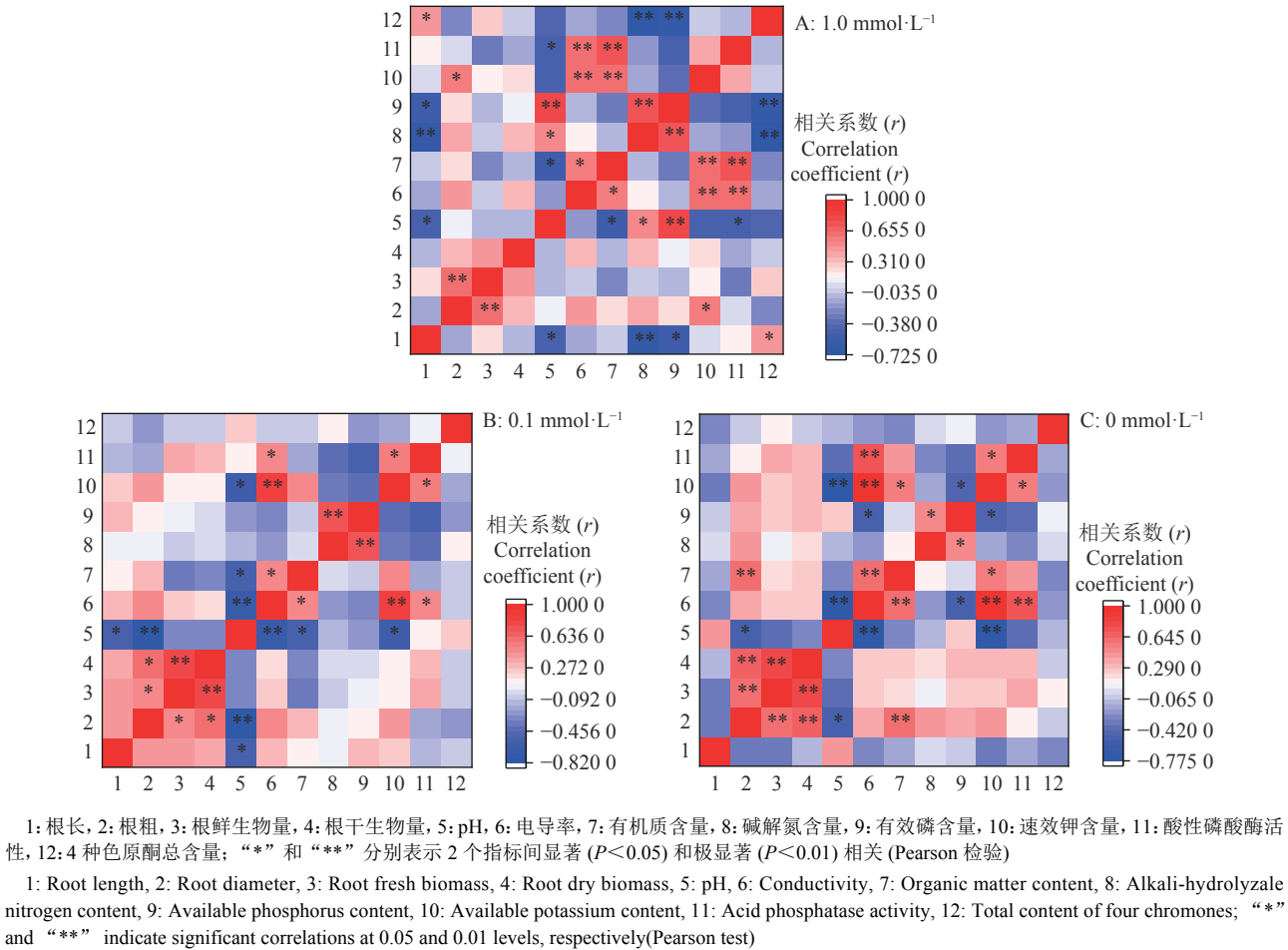


图 5 不同磷浓度下的土壤理化性质、防风生长指标与 4 种色原酮总含量的相关关系

**Fig. 5 Correlation between soil physicochemical property, growth index with total content of four chromones of *Saposhnikovia divaricata* under different phosphorus concentrations**

表 1 不同磷浓度下的土壤因子、防风生长指标与 4 种色原酮总含量的灰色关联度分析

**Table 1 Grey correlation analysis between soil factors, growth index with total content of four chromones of *Saposhnikovia divaricata* under different phosphorus concentrations**

| 因子 Factor                                 | 关联系数 Correlation coefficient |                          |                        |
|-------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------|
|                                           | 1.0 mmol·L <sup>-1</sup>     | 0.1 mmol·L <sup>-1</sup> | 0 mmol·L <sup>-1</sup> |
| 根长Root length                             | 0.496                        | 0.447                    | 0.500                  |
| 根粗 Root diameter                          | 0.386                        | 0.447                    | 0.444                  |
| 根鲜生物量 Root fresh biomass                  | 0.406                        | 0.423                    | 0.396                  |
| 根干生物量 Root dry biomass                    | 0.413                        | 0.351                    | 0.423                  |
| pH                                        | 0.445                        | 0.448                    | 0.524                  |
| 电导率 Conductivity                          | 0.334                        | 0.332                    | 0.320                  |
| 有机质含量 Organic matter content              | 0.295                        | 0.334                    | 0.486                  |
| 碱解氮含量 Alkali-hydrolyzale nitrogen content | 0.274                        | 0.451                    | 0.442                  |
| 速效磷含量 Available phosphorus content        | 0.323                        | 0.297                    | 0.292                  |
| 速效钾含量 Available potassium content         | 0.270                        | 0.355                    | 0.328                  |
| 酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity         | 0.394                        | 0.459                    | 0.460                  |

关关系。从表 2 中可以看出: 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 电导率、根粗、根鲜生物量对防风 4 种色原酮总含量的直接途径系数为正值, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量及酸性磷酸酶活性、pH、根长、根干质量对防风 4 种色原酮总含量的直接途径系数为负值; 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 仅有根鲜质量对防风 4 种色原酮总含量的直接途径系数为正值, 其他指标均为负值; 无磷处理下, 有机质和碱解氮含量及根长、根鲜质量对防风药材 4 种色原酮总含量的直接途径系数为正值, pH、电导率、酸性磷酸酶活

表 2 不同磷浓度下的土壤理化性质、防风生长指标与 4 种色原酮总含量的通径系数<sup>1)</sup>

Table 2 Path coefficient between soil factors, growth index with total content of four chromones of *Saposhnikovia divaricata* under different phosphorus concentrations

| c(P)/<br>(mmol·L <sup>-1</sup> ) | 变量<br>Variate   | 直接系数<br>Direct coefficient | 间接系数 Indirect coefficient |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |
|----------------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                                  |                 |                            | x <sub>1</sub>            | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> | x <sub>5</sub> | x <sub>6</sub> | x <sub>7</sub> | x <sub>8</sub> | x <sub>9</sub> | x <sub>10</sub> | x <sub>11</sub> |
| 1.0                              | x <sub>1</sub>  | -0.085                     |                           | -0.012         | 0.037          | 0.003          | 0.082          | -0.079         | 0.001          | 0.367          | 0.270          | -0.017          | -0.090          |
|                                  | x <sub>2</sub>  | 0.087                      | 0.012                     |                | 0.111          | -0.014         | -0.024         | 0.251          | -0.023         | -0.235         | -0.116         | -0.271          | -0.035          |
|                                  | x <sub>3</sub>  | 0.173                      | -0.018                    | 0.056          |                | -0.018         | 0.012          | -0.002         | 0.025          | -0.002         | 0.029          | -0.091          | 0.141           |
|                                  | x <sub>4</sub>  | -0.041                     | 0.005                     | 0.029          | 0.076          |                | 0.010          | 0.210          | 0.007          | -0.209         | -0.044         | -0.115          | 0.058           |
|                                  | x <sub>5</sub>  | -0.174                     | 0.040                     | 0.012          | -0.012         | 0.002          |                | -0.114         | 0.049          | -0.317         | -0.391         | 0.230           | 0.249           |
|                                  | x <sub>6</sub>  | 0.585                      | 0.012                     | 0.037          | -0.001         | -0.015         | 0.034          |                | -0.057         | -0.102         | 0.031          | -0.308          | -0.313          |
|                                  | x <sub>7</sub>  | -0.099                     | 0.000                     | 0.020          | -0.044         | 0.003          | 0.086          | 0.333          |                | 0.052          | 0.143          | -0.306          | -0.397          |
|                                  | x <sub>8</sub>  | -0.595                     | 0.053                     | 0.035          | 0.001          | -0.014         | -0.093         | 0.100          | 0.009          |                | -0.365         | 0.052           | 0.099           |
|                                  | x <sub>9</sub>  | -0.489                     | 0.047                     | 0.021          | -0.010         | -0.004         | -0.139         | -0.037         | 0.029          | -0.444         |                | 0.178           | 0.237           |
|                                  | x <sub>10</sub> | -0.497                     | -0.003                    | 0.048          | 0.032          | -0.009         | 0.080          | 0.362          | -0.061         | 0.062          | 0.175          |                 | -0.202          |
|                                  | x <sub>11</sub> | -0.523                     | -0.015                    | 0.006          | -0.047         | 0.005          | 0.083          | 0.350          | -0.075         | 0.112          | 0.222          | -0.192          |                 |
| 0.1                              | x <sub>1</sub>  | -0.229                     |                           | 0.032          | -0.081         | 0.007          | -0.226         | 0.150          | 0.002          | 0.000          | 0.004          | 0.057           | 0.007           |
|                                  | x <sub>2</sub>  | -0.103                     | 0.071                     |                | 0.140          | -0.042         | 0.256          | -0.195         | -0.005         | -0.027         | -0.040         | -0.073          | -0.008          |
|                                  | x <sub>3</sub>  | 0.233                      | 0.079                     | -0.062         |                | -0.048         | 0.203          | -0.144         | -0.002         | -0.006         | -0.032         | -0.043          | -0.017          |
|                                  | x <sub>4</sub>  | -0.061                     | 0.027                     | -0.070         | 0.181          |                | 0.149          | -0.144         | -0.002         | -0.013         | -0.037         | -0.059          | -0.013          |
|                                  | x <sub>5</sub>  | -0.505                     | -0.102                    | 0.052          | -0.094         | 0.018          |                | 0.390          | 0.003          | 0.005          | -0.030         | 0.132           | 0.018           |
|                                  | x <sub>6</sub>  | -0.534                     | 0.064                     | -0.037         | 0.063          | -0.017         | 0.369          |                | -0.005         | 0.012          | 0.056          | -0.162          | -0.032          |
|                                  | x <sub>7</sub>  | -0.008                     | 0.042                     | -0.063         | 0.044          | -0.016         | 0.150          | -0.315         |                | -0.008         | -0.006         | -0.091          | -0.020          |
|                                  | x <sub>8</sub>  | -0.060                     | 0.000                     | -0.046         | 0.023          | -0.013         | 0.041          | 0.106          | -0.001         |                | -0.059         | 0.021           | 0.013           |
|                                  | x <sub>9</sub>  | -0.113                     | 0.007                     | -0.037         | 0.067          | -0.020         | -0.134         | 0.266          | 0.000          | -0.032         |                | 0.081           | 0.017           |
|                                  | x <sub>10</sub> | -0.171                     | 0.077                     | -0.044         | 0.059          | -0.021         | 0.391          | -0.507         | -0.004         | 0.008          | 0.053          |                 | -0.025          |
|                                  | x <sub>11</sub> | -0.045                     | 0.037                     | -0.018         | 0.087          | -0.018         | 0.206          | -0.380         | -0.004         | 0.017          | 0.042          | -0.093          |                 |
| 0                                | x <sub>1</sub>  | 0.157                      |                           | -0.509         | 0.277          | -0.013         | 0.647          | -0.151         | 0.003          | 0.051          | -0.544         | -0.043          | 0.036           |
|                                  | x <sub>2</sub>  | -1.214                     | 0.066                     |                | 0.298          | -0.023         | 1.011          | -0.237         | 0.008          | 0.050          | -0.177         | -0.077          | 0.059           |
|                                  | x <sub>3</sub>  | 0.616                      | 0.071                     | -0.588         |                | -0.030         | 0.339          | -0.136         | -0.009         | -0.048         | -0.146         | -0.022          | -0.122          |
|                                  | x <sub>4</sub>  | -0.038                     | 0.054                     | -0.710         | 0.487          |                | 0.397          | -0.104         | -0.008         | -0.007         | -0.026         | -0.025          | -0.105          |
|                                  | x <sub>5</sub>  | -1.234                     | -0.082                    | 0.994          | -0.169         | 0.012          |                | 0.346          | -0.013         | -0.110         | 0.412          | 0.112           | -0.048          |
|                                  | x <sub>6</sub>  | -0.508                     | 0.047                     | -0.567         | 0.165          | -0.008         | 0.840          |                | 0.013          | -0.250         | 0.540          | -0.166          | -0.175          |
|                                  | x <sub>7</sub>  | 0.026                      | 0.020                     | -0.366         | -0.225         | 0.012          | 0.642          | -0.260         |                | -0.016         | 0.131          | -0.088          | 0.068           |
|                                  | x <sub>8</sub>  | 0.914                      | 0.009                     | -0.066         | -0.033         | 0.000          | 0.148          | 0.139          | -0.001         |                | -1.225         | 0.076           | 0.160           |
|                                  | x <sub>9</sub>  | -1.664                     | 0.051                     | -0.129         | 0.054          | -0.001         | 0.306          | 0.165          | -0.002         | 0.673          |                | 0.078           | 0.200           |
|                                  | x <sub>10</sub> | -0.192                     | 0.035                     | -0.484         | 0.070          | -0.005         | 0.717          | -0.438         | 0.012          | -0.360         | 0.673          |                 | -0.191          |
|                                  | x <sub>11</sub> | -0.354                     | -0.016                    | 0.203          | 0.213          | -0.011         | -0.168         | -0.250         | -0.005         | -0.413         | 0.942          | -0.104          |                 |

1) x<sub>1</sub>: 根长; x<sub>2</sub>: 根粗; x<sub>3</sub>: 根鲜生物量; x<sub>4</sub>: 根干生物量; x<sub>5</sub>: pH; x<sub>6</sub>: 电导率; x<sub>7</sub>: 有机质含量; x<sub>8</sub>: 碱解氮含量; x<sub>9</sub>: 有效磷含量; x<sub>10</sub>: 速效钾含量; x<sub>11</sub>: 酸性磷酸酶活性

1) x<sub>1</sub>: Root length; x<sub>2</sub>: Root diameter; x<sub>3</sub>: Root fresh biomass; x<sub>4</sub>: Root dry biomass; x<sub>5</sub>: pH; x<sub>6</sub>: Conductivity; x<sub>7</sub>: Organic matter content; x<sub>8</sub>: Alkali-hydrolyzale nitrogen content; x<sub>9</sub>: Available phosphorus content; x<sub>10</sub>: Available potassium content; x<sub>11</sub>: Acid phosphatase activity

性、根粗、根干质量以及有效磷和速效钾含量对防风药材品质的直接通径系数均为负值。

从间接通径系数来看, 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, x<sub>10</sub>(速效钾含量)→(通过)x<sub>6</sub>(电导率)→y(4 种色原酮总含量)、x<sub>11</sub>(酸性磷酸酶活性)→x<sub>6</sub>→y、x<sub>7</sub>(有机质含量)→x<sub>6</sub>→y 的间接通径系数为正, 且位列前 3, 分别

为 0.362、0.350 和 0.333; x<sub>9</sub>(有效磷含量)→x<sub>8</sub>(碱解氮含量)→y、x<sub>11</sub>→x<sub>10</sub>→y、x<sub>9</sub>→x<sub>5</sub>(pH)→y 的间接通径系数为负, 且其绝对值位列前 3, 分别为-0.444、-0.192、-0.139。

0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, x<sub>10</sub>→x<sub>5</sub>→y、x<sub>5</sub>→x<sub>6</sub>→y、x<sub>6</sub>→x<sub>5</sub>→y 的间接通径系数为正, 且位列前 3, 分别为

0.391、0.390、0.369;  $x_{10} \rightarrow x_6 \rightarrow y$ 、 $x_{11} \rightarrow x_6 \rightarrow y$ 、 $x_7 \rightarrow x_6 \rightarrow y$  的间接通径系数为负, 且其绝对值位列前 3, 分别为-0.507、-0.380、-0.315。

无磷处理下,  $x_5 \rightarrow x_2(\text{根粗}) \rightarrow y$ 、 $x_{11} \rightarrow x_9 \rightarrow y$ 、 $x_6 \rightarrow x_5 \rightarrow y$  的间接通径系数为正, 且位列前 3, 分别为 0.994、0.942、0.840;  $x_4(\text{根干生物量}) \rightarrow x_2 \rightarrow y$ 、 $x_3(\text{根鲜生物量}) \rightarrow x_2 \rightarrow y$ 、 $x_6 \rightarrow x_2 \rightarrow y$  的间接通径系数为负, 且其绝对值位列前 3, 分别为-0.710、-0.588、-0.567。

3 讨论与结论

植物的生长发育与土壤养分含量密切相关<sup>[18]</sup>, 除受自身遗传因素控制外, 药用植物生长特性、药效成分与土壤养分也密切相关, 药效成分多为次生代谢产物, 是植物与环境在长期进化过程中相互作用的结果, 更加容易受到外界环境的影响。磷素是影响植物生理活动的重要生态因素, 土壤中的磷素有效性高低与土壤对磷的吸附-解吸、沉淀-溶解等过程有关, 而这些过程又取决于气候条件、土壤理化性质等因素<sup>[19]</sup>。前人研究发现, 进入土壤中的磷素有效性不仅受土壤理化性质影响, 反过来低磷或缺磷的环境下, 植物根系也会启动一系列的觅磷策略, 从而抵御不良环境, 例如增加有机酸的分泌, 通过其络合或螯合作用活化土壤中难溶的营养成分供自身吸收利用, 反过来也影响土壤理化性质<sup>[20]</sup>, 或者改变根系生物量及形态特征, 从而影响根系对营养成分的吸收。

本研究发现, 防风根系土壤 pH 在 7.04~7.99 之间, 呈弱碱性, 处理 30 d 时无磷处理的 pH 显著高于 1.0 和 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 随着处理时间延长, 60 和 90 d 时 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的 pH 降低, 且显著低于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 90 d 时更是表现出 3 种处理间 pH 存在显著差异。pH 是影响植物对土壤中难溶磷进行活化的重要因素, 有学者研究表明, 在一定范围内, 随着根际土壤 pH 的下降, 植物对磷的吸收会显著增加<sup>[21]</sup>, 本研究结果表明, 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理下 2 年生防风处于缺磷状态, 要通过提高自身对土壤中磷的获取, 才能满足植株的生长以及各项生理活动对磷的需求, 因此 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理下防风根系不断分泌有机酸等物质, 导致处理后期低磷胁迫下土壤 pH 显著低于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 这与刘晓霞<sup>[22]</sup>、谢安强等<sup>[23]</sup> 的研究结果一致。植物根系分泌物和土壤 pH 的相互作用之间存在动态平衡, 并受多方面因素共同调节, Chen 等<sup>[24]</sup> 提出有机质、碱解氮等物质

含量与维持土壤微生物生态平衡之间关系密切, 本研究发现, 防风在磷胁迫下, 土壤有机质、碱解氮含量积累增加, 这可能是一方面低磷环境使得土壤中微生物的数量和活性受到了抑制, 因此减缓了有机质等的消耗, 另一方面, 也可能是有机酸和其他螯合剂的分泌增多, 将土壤中难溶的部分释放为可溶态, 因此使土壤中的速效养分含量增多, 同时, 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理在长时间的磷胁迫下, 防风根系可吸收的磷不足, 根表面积和生物量减小, 进一步抑制了根系对氮的吸收, 导致无磷处理下防风根际土壤中碱解氮的含量显著高于其他 2 个处理, 这与李荣坦<sup>[25]</sup> 研究结果相一致。

酸性磷酸酶是重要的水解酶, 也是诱导酶, 它不仅在植物碳水化合物转化及蛋白质合成中起重要作用, 还与土壤中有机磷的分解和再利用有密切联系。徐静等<sup>[26]</sup> 研究表明, 大麦根际土壤酸性磷酸酶活性在不施磷以及磷质量分数为 30 mg/g 的土壤中显著高于磷质量分数为 90 mg/g 的土壤。本试验通过分析发现, 防风根系土壤中酸性磷酸酶活性在处理 30 d 时表现为无磷处理>0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理>1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 说明试验初期防风在低磷环境下酸性磷酸酶分泌增多, 使得土壤中酸性磷酸酶活性提高, 从而提高防风对低磷环境的适应性。

无磷处理下, 2 年生防风的根粗、根生物量在整个处理期间均低于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 这与郭轶敏等<sup>[27]</sup> 研究结果低磷胁迫下柱花草 *Stylosanthes guianensis* 的生物量总体呈下降趋势相一致, 但是无磷处理下防风的根长随着处理时间的延长逐渐增加, 在处理 3 个月时显著高于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 说明 2 年生防风长期在无磷胁迫处理下, 为满足自身生长需求, 通过增加根长来增加与土壤的接触面积, 吸收更多的养分, 这与 Liu 等<sup>[28]</sup> 研究结果相一致, 即植物可以通过增加根长来提高植株对低磷胁迫的耐受。

中药材药效成分的含量由遗传因素和环境因素共同决定, 遗传因素决定其是否具有合成药效成分的能力, 而环境因素决定其药效成分的含量高低<sup>[29]</sup>。韩忠明等<sup>[8]</sup> 研究发现, 适当的逆境胁迫有助于提高中药材有效成分含量及药材品质。本研究结果表明, 在整个处理期间, 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理下防风的 4 种色原酮含量高于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理, 特别是 90 d 时, 0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 和无磷处理的 4 种色原酮含量显著高于 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理。相关性分析和灰色关联度分析表明, 1.0 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下, 碱解氮和有效磷含量与 4 种色原酮总含量存在极显著

负相关关系,与通径分析结果相一致;0.1 mmol·L<sup>-1</sup> 磷处理下酸性磷酸酶活性是影响4种色原酮总含量的最大因子;无磷处理下土壤pH和根长是与4种色原酮总含量关联系数最大的2个因子,通径分析结果进一步确定了根长对防风4种色原酮总含量是正向促进作用,土壤pH对防风4种色原酮总含量是负向作用。说明低磷胁迫下,防风通过改变代谢途径维持其基本生长的需要,根长增加、有机酸的释放以及酸性磷酸酶的分泌致使pH降低,从而促进磷素的吸收、转运和有效利用,进而影响防风次生代谢水平,因此土壤pH对防风4种色原酮总含量的影响是负向作用,而根长对防风4种色原酮总含量的影响是正向促进作用。

3种磷浓度下防风生长状况、土壤理化性质与4种色原酮总含量之间并不是简单的相关关系,它们通过协同作用共同维持防风正常生长,以减轻低磷胁迫给防风造成的危害。因此,防风面对磷胁迫有一系列的响应机制,在磷胁迫下,防风对土壤有机质和碱解氮的吸收利用减弱,但通过增加根长及有效成分总色原酮的含量,在试验初期增加酸性磷酸酶的分泌,从而改变土壤的pH、活化土壤中难溶的营养成分供自身吸收利用,以提高对低磷环境的适应性。本研究结果能够为防风人工栽培技术策略的制定以及防风对低磷胁迫响应机制的研究提供理论依据。但本研究仅限于室内盆栽试验,试验结果需进一步开展大田试验研究进行验证。

参考文献:

[1] 陈敏旺. 吉林省农田耕层土壤速效氮磷钾养分的时空变化特征[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.

[2] 张智猛, 戴良香, 张电学, 等. 施磷对土壤有效磷含量、吸磷特性及小麦产量的影响[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1999, 1(1): 12-16.

[3] 裴洲洋, 陈油鸿, 江春, 等. 不同施肥结构对土壤理化性质及烤烟氮、磷、钾含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(21): 35-37.

[4] 张焯. 低磷胁迫诱导植物酸性磷酸酶的分子调控机制[D]. 北京: 清华大学, 2014.

[5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: I 部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 156.

[6] 韩忠明, 王云贺, 胥苗苗, 等. 干旱胁迫对防风生理特性及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 100-106.

[7] 孙晖, 曹玲, 王喜军. 防风药效物质基础季节积累规律的研究[J]. 中国中医药科技, 2003, 10(6): 355-356.

[8] 韩忠明, 胥苗苗, 王云贺, 等. 干旱胁迫对防风叶片保护酶活性、渗透调节物质含量及药材品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 91-97.

[9] 胥苗苗. 水分胁迫对防风质量、生理生态特性及关键

酶活性影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.

[10] 黄艳茹, 任晓蕾, 霍金海, 等. 影响防风质量因素的研究概况[J]. 中医药信息, 2017, 34(6): 134-138.

[11] 郭旭, 田新, 郝佳, 等. 不同产地防风色原酮含量与土壤因子的关系[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 30-37.

[12] 邵畅畅, 韦小丽, 周紫晶, 等. 供磷水平对棕榈幼苗生长及根系形态的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(1): 12-15.

[13] 张文献, 李增强, 胡亚丽, 等. 不同浓度磷胁迫对大豆幼苗生长及根系DNA甲基化水平的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 9-18.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[16] 韩忠明, 王云贺, 李轶雯, 等. 防风色原酮微波辅助提取及含量动态变化研究[J]. 中药材, 2011, 34(3): 465-468.

[17] 梁霞, 刘爱琴, 马祥庆, 等. 磷胁迫对不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 54-59.

[18] 唐荣莉, 王春萍, 王红娟, 等. 低磷胁迫对辣椒苗期生长和生理特性的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(9): 1933-1942.

[19] 王斐. 有机结合态磷对土壤微生物、玉米生长及磷素利用率的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.

[20] 余健. 磷胁迫下林木分泌的有机酸及对土壤磷的活化[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.

[21] 王庆仁, 李继云, 李振声. 植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 107-116.

[22] 刘晓霞. 苹果园土壤磷库特征及土壤磷含量和磷源对磷吸收的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.

[23] 谢安强, 洪伟, 吴承祯, 等. 内生真菌对低磷胁迫下尾巨桉生理及土壤特性的影响[J]. 西南林业大学学报, 2013, 33(3): 1-7.

[24] CHEN H, LI D, XIAO K, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non - karst forests[J]. Functional Ecology, 2018, 32(5): 1400-1409.

[25] 李荣坦. 低磷胁迫对番茄根系生长及根际土壤微生物多样性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.

[26] 徐静, 张锡洲, 李廷轩, 等. 野生大麦对土壤磷吸收及其酸性磷酸酶活性的基因型差异[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 88-98.

[27] 郭轶敏, 文亦芾, 史亮涛, 等. 土壤磷水平对柱花草株高、根长及生物量的影响[J]. 草业与畜牧, 2014(1): 1-4.

[28] LIU Y, MI G, CHEN F, et al. Rhizosphere effect and root growth of two maize ( *Zea mays* L. ) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability[J]. Plant Science, 2004, 167(2): 217-223.

[29] 王鑫, 郭平毅, 原向阳, 等. 2, 4-D 丁酯对罂粟 ( *Papaver somniferum* L. ) 保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1098-1103.