

## ◆植物科学◆

## 不同喀斯特土壤类型下常见蕨类植物氮磷养分策略差异及其与土壤养分供给关系\*

庞丽<sup>1</sup>, 邹琼丽<sup>1</sup>, 吴霞<sup>1</sup>, 李家鑫<sup>1</sup>, 张明豪<sup>1</sup>, 张红霞<sup>2</sup>

(1. 安顺学院农学院, 贵州安顺 561000; 2. 安顺学院化学化工学院, 贵州安顺 561000)

**摘要:** 蕨类植物是喀斯特生态系统的先锋植物, 研究其对瘠薄的喀斯特地区土壤的适应策略, 对退化生态系统的恢复与重建具有重要意义。本研究以贵州省植物园内地带性黄壤、非地带性石灰土上均有分布的常见蕨类植物毛蕨 [*Cyclosorus interruptus* (Willd.) H. Ito]、剑叶凤尾蕨 (*Pteris ensiformis* Burm.) 和金粉蕨 [*Onychium siliculosum* (Desv.) C. Chr.] 为试验材料, 研究 2 种喀斯特土壤类型下 3 种常见蕨类植物氮磷养分策略的差异, 及其与土壤氮磷养分供给的关系。结果表明: ①石灰土上蕨类植物根系分泌的有机酸主要为酒石酸、草酸和苹果酸, 黄壤上为酒石酸、苹果酸和柠檬酸, 且石灰土上根系分泌的有机酸总量远高于黄壤; ②与黄壤上生长的蕨类植物相比, 石灰土上蕨类植物干物质积累量、氮素与磷素吸收量均较高, 分别高出 2.7 倍、30.8% 和 43.8%; ③2 种土壤条件下蕨类植物地上部分的氮(N)、磷(P)平均含量均较地下部分高; 石灰土上蕨类植物地上部分 N/P 为 13.17, 黄壤上为 11.35; ④2 种土壤条件下蕨类植物的氮素吸收量均与土壤有效磷含量呈显著正相关, 说明蕨类植物对土壤氮素的吸收利用受土壤有效磷含量的限制。综上可知, 蕨类植物在 2 种土壤类型上的氮磷养分利用与分配策略存在显著差异, 其在石灰土上生长时对土壤养分循环的影响较黄壤上大。

**关键词:** 喀斯特地区; 不同土壤类型; 蕨类植物; 氮磷养分特征; 养分适应策略

中图分类号: Q949.36 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2024)02-0162-10

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20240709.008

氮(N)和磷(P)是植物生长发育过程中不可缺少的大量营养元素。氮对植物器官建造、物质代谢及营养品质形成具有不可替代的作用<sup>[1]</sup>, 而磷则以多种方式参与植物体内光合调节、能量代谢、物质运输及信号传导等生理过程<sup>[2]</sup>。二者通过单独和/或偶联等方

式影响植物的生长发育、生态系统的植物群落结构与功能<sup>[3,4]</sup>。然而, 目前我国大部分地区植物的生长发育和生产力的形成常常受到氮、磷养分有效性的限制<sup>[4]</sup>。由于特殊的地质地貌特点, 加上普遍的季节性干旱和土壤侵蚀作用, 喀斯特地区土壤的氮、磷养分

收稿日期: 2023-12-27

修回日期: 2024-02-27

\* 国家级大学生创新创业训练计划平台项目(202010667023), 贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7497), 贵州省科技拔尖人才项目(黔教合 KY 字[2020]040), 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教合 KY 字[2018]008)和安顺学院博士基金项目(asubsjj201404)资助。

## 【第一作者简介】

庞丽(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事植物生理生态学研究, E-mail: pangli4286@163.com。

## 【引用本文】

庞丽, 邹琼丽, 吴霞, 等. 不同喀斯特土壤类型下常见蕨类植物氮磷养分策略差异及其与土壤养分供给关系[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(2): 162-171.

PANG L, ZOU Q L, WU X, et al. Differences in Nitrogen and Phosphorus Nutrients Strategies of Common Ferns under Different Karst Soil Types and Their Relationship with Soil Nutrient Supply [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(2): 162-171.

含量均处于中低水平,成为制约该地区植物生长及植被恢复与重建的重要因子<sup>[5-9]</sup>。

众多研究表明,喀斯特适生植物能够形成独特的养分适应策略,以响应土壤养分贫瘠状况<sup>[10]</sup>,如改善组织结构特征<sup>[11]</sup>、调节生理活动<sup>[12]</sup>、调整养分吸收及分配策略<sup>[13]</sup>等。有机酸是根系向根际分泌或溢泌的有机化合物。Hinsinger<sup>[14]</sup>研究表明,适生植物通过增加有机酸的分泌量、调节有机酸的分泌种类来改变根际土壤理化性质,增加土壤难溶性养分的溶解以及提高微生物和酶的活性,从而促进土壤氮磷养分的循环。潘复静等<sup>[15]</sup>研究表明,喀斯特植物根际土壤中有有机酸的季节变化是优势植物适应土壤养分限制的一种重要机制。张雅洁等<sup>[16]</sup>认为,土壤钙浓度的变化可以调控喀斯特地区卷柏[*Selaginella tamariscina* (P. Beauv.) Spring]根系有机酸的分泌。可见,喀斯特适生植物具有调整根系有机酸分泌从而适应生境土壤理化性质的能力。另外,杜有新<sup>[12]</sup>对普定县退化喀斯特生态系统的研究表明,不同植物通过采取不同的养分利用和分配策略来适应退化的土壤养分环境。对喀斯特地区无籽刺梨(*Rosa sterilis* S. D. Shi)的研究表明,无籽刺梨中的氮、磷含量表现为叶部>根部>茎部,叶片是无籽刺梨氮磷养分的积累中心<sup>[13]</sup>。因此,植物氮磷养分的利用与分配特征在一定程度上可以揭示植物对喀斯特生境的响应与适应策略。

喀斯特生态系统地势格局复杂,土壤类型多样,其中地带性黄壤和非地带性石灰土是此类地区分布最为广泛的2种土壤类型<sup>[17,18]</sup>。蕨类植物是喀斯特生态系统中常见的先锋植物类群,其在2种土壤类型上均有分布,对喀斯特生态系统养分的循环具有重要意义,常被用作退化喀斯特生态系统恢复与重建的先锋草被植物<sup>[19]</sup>。然而,喀斯特地区黄壤和石灰土上分布的蕨类植物的氮磷养分适应策略及其差异尚不清楚,因此本研究选取贵州喀斯特地区黄壤和石灰土上均有分布的蕨类植物毛蕨[*Cyclosorus interruptus* (Willd.) H. Ito]、剑叶凤尾蕨(*Pteris ensiformis* Burm.)和金粉蕨[*Onychium siliculosum* (Desv.) C. Chr.]为试验材料,研究它们在2种土壤类型上的有机酸分泌特征、氮磷养分利用策略及其与土壤养分供给的关系,阐明不同喀斯特土壤类型的养分供给能力和蕨类植物对土壤养分的利用状况,拟为全面和深入地了解蕨类植物对喀斯特环境的适应机制、有针对

性地选择生态修复植物类型提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样地位于贵州省植物园内(26.63°N,106.73°E,海拔1245 m)。贵州省植物园位于贵州省中部贵阳市北郊,属于亚热带季风气候,年平均气温为14℃,年平均降水量为1200 mm。该地区成土母岩主要为石灰岩和砂岩,土壤可分为黄壤和石灰土。两个采样地均为地势较平坦的灌草丛。黄壤植被主要有狗尾草(*Setaria viridis*),植被盖度平均为54.8%,土壤pH值为6.2—6.5。石灰土植被主要为火棘[*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) H. L. Li]、贯众(*Cyrtomium fortunei* J. Sm.)等,植被盖度平均为70.5%,土壤pH值为7.5—8.0。

### 1.2 样品采集

试验样品于2021年4月采集,分别采集黄壤和石灰土上均有分布的毛蕨、剑叶凤尾蕨和金粉蕨的当年生幼嫩植株(图1)。用不锈钢铲挖取带有土体的整棵蕨类植物植株,同一采样点同一种蕨类植物采集生长较一致的当年生植株6—8株(6—8个重复),放入大号取样袋带回实验室。在实验室内分别去掉根外非根际土壤,轻轻抖落根系上黏附的根际土壤,将收集的土样风干、研细,过2 mm筛后装入自封袋待测。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 根系分泌物的收集和有机酸测定

根系分泌物的收集参考沈宏等<sup>[20]</sup>的方法,用去离子水洗净蕨类植物根系并吸干水分后,将每一单株根系置于收集管中,加入30 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液,同时加入2—3滴0.05%百里酚以抑制微生物活性,浸提12 h。用滤纸过滤后将浸提液在旋转蒸发仪(RV-211M,上海一恒科学仪器有限公司)上浓缩,并用超纯水溶解定容至5 mL,然后从中取2 mL过0.45 μm(孔径)×13 mm(直径)针式过滤器后装入液相瓶。参考俞乐等<sup>[21]</sup>的方法,采用外标法测定不同蕨类植物根系有机酸分泌的种类和含量。HPLC测定条件如下:色谱柱为Symmetry C<sub>18</sub>柱,4.6 mm×250 mm,5 μm;柱温为30℃;进样量为5 μL;流速为1 mL·min<sup>-1</sup>;PAD检测器,检测波长为210 nm;流动相为甲醇:磷酸二氢钾(0.05 mol·L<sup>-1</sup>, pH值为3.0)=3:97。



图 1 3 种蕨类植物(从左到右依次为毛蕨、剑叶凤尾蕨和金粉蕨)

Fig. 1 3 types of ferns (from left to right: *C. interruptus* (Willd.) H. Ito, *P. ensiformis* Burm. and *O. siliculosum* (Desv.) C. Chr.)

### 1.3.2 蕨类植物氮磷含量测定

将植物样品用去离子水洗净并晾干后,分成地上部分和地下部分,于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 60 °C 烘干至恒重,以获得植物各部分的干物质质量。分别称取适量的各部分干样,用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮后,采用行业标准 NY T 1738—2009 中的方法测定植物地上部分(叶、茎)、地下部分(根)的磷含量,采用行业标准 NY/T 2419—2013 中的方法测定植物地上部分(叶、茎)、地下部分(根)的氮含量。

### 1.3.3 土壤养分含量测定

土壤 pH 值采用电位法测定(LY/T 1239—1999)。石灰土有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,黄壤有效磷含量测定采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定(LY/T 1232—2015)。土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定(LY/T 1228—2015)。

### 1.4 统计分析

地上部分氮(磷)素吸收量(mg) = 叶氮(磷)含量 × 叶干物质质量。

地下部分氮(磷)素吸收量(mg) = 根氮(磷)含量 × 根干物质质量。

整株氮(磷)素吸收量用单位植株干物质积累量的全氮(全磷)含量表示,即整株氮(磷)素吸收量( $mg \cdot plant^{-1}$ ) = 整株(氮)磷含量( $mg \cdot g^{-1}$ ) × 整株干物质积累量( $g \cdot plant^{-1}$ )。

地上部分 N/P = 地上部分氮含量/地上部分磷含量。

采用 Microsoft Office Excel 2003 软件进行数据处理及图表制作,利用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行多因素方差分析,采用 Duncan 检验法进行多重比较( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系有机酸分泌特征

由表 1 可知,石灰土上蕨类植物有机酸分泌总量显著多于黄壤上的。石灰土上不同种类有机酸分泌量大小顺序为酒石酸 > 草酸 > 苹果酸 > 柠檬酸 > 丙二酸,黄壤上则为酒石酸 > 苹果酸 > 柠檬酸 > 草酸 > 丙二酸。可见,石灰土上分布的蕨类植物根系分泌的有机酸主要是酒石酸、草酸和苹果酸,而黄壤上主要为酒石酸、苹果酸和柠檬酸。另外,两种生境下不同种蕨类植物间有机酸分泌差异显著(表 2),石灰土上剑叶凤尾蕨有机酸分泌总量显著高于毛蕨和金粉蕨,而黄壤上金粉蕨有机酸分泌总量最大,显著高于毛蕨和剑叶凤尾蕨(表 1)。

### 2.2 蕨类植物氮磷养分特征

与黄壤上分布的蕨类植物相比,石灰土上分布的蕨类植物总干物质积累量、氮素吸收量和磷素吸收量平均值均较高,分别高出 2.7 倍、30.8% 和 43.8%。石灰土上毛蕨氮素和磷素吸收量最高,总干物质积累量也较金粉蕨、剑叶凤尾蕨高。黄壤上剑叶凤尾蕨总干物质质量和氮素、磷素吸收量显著高于金粉蕨(表 3)。两种生境下,不同种蕨类植物间总干物质积累量、氮素和磷素吸收量差异显著(表 4)。

表 1 2种喀斯特土壤类型下常见蕨类植物根系有机酸分泌种类和含量

土壤类型 Soil type	植物种 Plant specie	草酸 Oxalic acid	酒石酸 Tartaric acid	苹果酸 Malic acid	丙二酸 Malonic	柠檬酸 Citric acid	总量 Total
Lime soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	14.74±5.22 <sup>ab</sup>	35.37±13.40 <sup>b</sup>	6.41±1.39 <sup>c</sup>	1.29±0.37	—	57.81±19.11 <sup>b</sup>
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	15.16±3.90 <sup>a</sup>	40.92±12.05 <sup>a</sup>	6.37±1.32 <sup>c</sup>	1.45±0.29	1.84±0.21 <sup>c</sup>	65.74±20.15 <sup>a</sup>
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr.	13.94±4.01 <sup>b</sup>	35.18±13.31 <sup>b</sup>	5.85±1.01 <sup>c</sup>	—	1.22±0.23 <sup>c</sup>	56.19±14.30 <sup>b</sup>
Yellow soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	3.88±1.44 <sup>c</sup>	12.01±4.21 <sup>c</sup>	9.67±2.12 <sup>b</sup>	3.11±0.45	5.78±1.64 <sup>b</sup>	34.45±10.04 <sup>d</sup>
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	3.91±1.10 <sup>c</sup>	11.98±4.19 <sup>c</sup>	11.66±2.27 <sup>a</sup>	—	5.34±1.44 <sup>b</sup>	32.89±9.56 <sup>d</sup>
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr.	4.14±1.96 <sup>c</sup>	13.53±3.85 <sup>c</sup>	12.05±2.90 <sup>a</sup>	3.04±0.23	8.30±2.81 <sup>a</sup>	41.06±11.03 <sup>c</sup>

Note: different small letters in the same column indicate significant differences between different treatments at 0.05 level.

表 2 不同因素对蕨类植物根系有机酸分泌影响的 F 检验

Table 2 F test of the effects of different factors on the secretion of organic acids in ferns roots

因素 Factors	草酸 Oxalic acid	酒石酸 Tartaric acid	苹果酸 Malic acid	丙二酸 Malonic	柠檬酸 Citric acid	总量 Total
Soil type	4 219.84 <sup>***</sup>	877.94 <sup>***</sup>	224.08 <sup>***</sup>	5.03 <sup>*</sup>	190.16 <sup>***</sup>	151.02 <sup>***</sup>
Plant specie	3.05	3.99 <sup>*</sup>	3.67	2.83	7.61 <sup>**</sup>	1.07
Soil type×Plant specie	7.04 <sup>*</sup>	7.91 <sup>*</sup>	1.69 <sup>*</sup>	5.33 <sup>*</sup>	0.91 <sup>*</sup>	2.57 <sup>*</sup>

Note: \* means significantly correlate at  $P < 0.05$  level, \*\* means significantly correlate at  $P < 0.01$  level, \*\*\* means extremely significantly correlate at  $P < 0.001$  level.

表 3 2种喀斯特土壤类型下常见蕨类植物生物量和氮磷养分吸收量

Table 3 Biomass, nitrogen and phosphorus nutrients efficiency of common ferns under 2 types of karst soil

土壤类型 Soil type	植物种 Plant specie	叶干物质质量/g Leaf dry matter quality/g	根干物质质量/g Root dry matter quality/g	总干物质质量/g Total dry matter quality/g	氮素吸收量/ ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ ) N absorption/ ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ )	磷素吸收量/ ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ ) P absorption/ ( $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ )
Lime soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	0.91±0.26 <sup>a</sup>	0.52±0.14 <sup>a</sup>	1.43±0.44 <sup>a</sup>	41.94±8.33 <sup>a</sup>	4.61±0.85 <sup>a</sup>
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	0.67±0.19 <sup>b</sup>	0.35±0.10 <sup>b</sup>	1.02±0.40 <sup>a</sup>	34.25±6.10 <sup>b</sup>	3.22±0.62 <sup>b</sup>
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr.	0.36±0.08 <sup>c</sup>	0.20±0.04 <sup>c</sup>	0.56±0.11 <sup>b</sup>	33.78±6.23 <sup>b</sup>	3.13±0.66 <sup>b</sup>
Yellow soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	0.16±0.06 <sup>d</sup>	0.11±0.05 <sup>cd</sup>	0.27±0.09 <sup>bc</sup>	30.36±5.40 <sup>b</sup>	2.59±0.41 <sup>bc</sup>
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	0.24±0.10 <sup>cd</sup>	0.16±0.09 <sup>cd</sup>	0.40±0.10 <sup>b</sup>	31.07±4.11 <sup>b</sup>	3.04±0.39 <sup>b</sup>
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr.	0.08±0.02 <sup>d</sup>	0.06±0.03 <sup>d</sup>	0.14±0.05 <sup>c</sup>	22.67±3.89 <sup>c</sup>	1.99±0.30 <sup>c</sup>

Note: different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments at 0.05 level.

表 4 不同因素对蕨类植物生物量和氮磷养分吸收量影响的 F 检验

Table 4 F test of the effects of different factors on biomass, nitrogen and phosphorus nutrient uptake of ferns

因素 Factors	叶干物质质量 Leaf dry matter quality	根干物质质量 Root dry matter quality	总干物质质量 Total dry matter quality	氮素吸收量 N absorption	磷素吸收量 P absorption
Soil type	86.30 <sup>***</sup>	61.93 <sup>***</sup>	77.07 <sup>***</sup>	70.10 <sup>***</sup>	30.73 <sup>***</sup>
Plant specie	13.02 <sup>*</sup>	12.09 <sup>*</sup>	12.71 <sup>*</sup>	19.83 <sup>**</sup>	8.97 <sup>*</sup>
Soil type×Plant specie	24.04 <sup>*</sup>	37.87 <sup>**</sup>	23.95 <sup>*</sup>	26.38 <sup>*</sup>	13.52 <sup>*</sup>

Note: \* means significantly correlate at  $P < 0.05$  level, \*\* means significantly correlate at  $P < 0.01$  level, \*\*\* means extremely significantly correlate at  $P < 0.001$  level.

### 2.3 蕨类植物氮磷养分分配特征

由表 5 可知, 研究区石灰土上分布的蕨类植物地上部分氮含量均比对应的地下部分高出 1 倍, 而磷平

均含量高出 17.3%。黄壤上分布的蕨类植物地上部分氮、磷平均含量分别高出地下部分氮、磷平均含量的 34.3% 和 26.8%。石灰土上分布的蕨类植物地上

和地下部分磷平均含量均显著高于黄壤上对应的部分,分别高出 38.7% 和 50.0%;地上部分氮平均含量高出 59.3%,地下部分氮平均含量差异不显著。石灰土、黄壤上分布的蕨类植物地上部分 N/P 平均值

分别为 13.17 和 11.35(表 5)。研究区域蕨类植物氮磷分配特征受植物种类与土壤类型交互作用的显著影响(表 6)。

表 5 2 种喀斯特土壤类型下常见蕨类植物氮磷养分分配特征

土壤类型 Soil type	植物种 Plant specie	地上部分氮含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Above ground part N content/ (mg · g <sup>-1</sup> )	地下部分氮含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Under ground part N content/ (mg · g <sup>-1</sup> )	地上部分磷含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Above ground part P content/ (mg · g <sup>-1</sup> )	地下部分磷含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Under ground part P content/ (mg · g <sup>-1</sup> )	地上部分 N/P Above ground part N/P
Lime soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	29.47 ± 5.12 <sup>a</sup>	13.47 ± 2.10	2.50 ± 0.22 <sup>a</sup>	2.09 ± 0.34 <sup>a</sup>	11.80 ± 1.64
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	23.85 ± 4.90 <sup>a</sup>	10.4 ± 1.67	1.79 ± 0.29 <sup>b</sup>	1.43 ± 0.20 <sup>b</sup>	13.32 ± 1.41
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr	23.46 ± 4.43 <sup>a</sup>	10.32 ± 1.83	1.62 ± 0.11 <sup>b</sup>	1.51 ± 0.33 <sup>b</sup>	14.40 ± 1.26
Yellow soil	<i>C. interruptus</i> (Willd.) H. Ito	17.59 ± 4.39 <sup>b</sup>	12.77 ± 1.45	1.52 ± 0.14 <sup>b</sup>	1.07 ± 0.22 <sup>c</sup>	11.57 ± 2.23
	<i>P. ensiformis</i> Burm.	18.75 ± 4.32 <sup>b</sup>	12.32 ± 1.23	1.71 ± 0.19 <sup>b</sup>	1.33 ± 0.21 <sup>b</sup>	10.96 ± 2.10
	<i>O. siliculosum</i> (Desv.) C. Chr	11.86 ± 3.01 <sup>c</sup>	10.81 ± 1.99	1.03 ± 0.11 <sup>c</sup>	0.96 ± 0.19 <sup>c</sup>	11.51 ± 2.55

Note: different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments at 0.05 level.

表 6 不同因素对蕨类植物氮磷养分分配特征影响的 F 检验

Table 6 F test of the effects of different factors on distribution characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients of ferns

因素 Factors	地上部分氮含量 Above ground part N content	地下部分氮含量 Under ground part N content	地上部分磷含量 Above ground part P content	地下部分磷含量 Under ground part P content	地上部分 N/P Above ground part N/P
Soil type	129.51 <sup>***</sup>	3.97	31.19 <sup>***</sup>	30.75 <sup>***</sup>	35.35 <sup>***</sup>
Plant specie	16.71 <sup>**</sup>	27.82 <sup>***</sup>	16.44 <sup>**</sup>	3.97 <sup>*</sup>	5.85 <sup>*</sup>
Soil type × Plant specie	25.17 <sup>**</sup>	13.68 <sup>*</sup>	15.71 <sup>*</sup>	18.34 <sup>*</sup>	17.57 <sup>*</sup>

Note: \* means significantly correlate at  $P < 0.05$  level, \*\* means significantly correlate at  $P < 0.01$  level, \*\*\* means extremely significantly correlate at  $P < 0.001$  level.

## 2.4 根际与非根际土壤养分含量特征

由图 2 和图 3 可知,研究区域两种生境下蕨类植物根际土壤有效磷、碱解氮平均含量均显著低于非根际土壤。石灰土上分布的蕨类植物根际土壤有效磷、碱解氮平均含量分别为 9.16 和 221.07 mg · kg<sup>-1</sup>,黄壤上分别为 2.68 和 128.03 mg · kg<sup>-1</sup>,石灰土上分布的蕨类植物根际土壤的有效磷、碱解氮平均含量均明显高于黄壤上分布的。

石灰土上毛蕨、金粉蕨根际土壤有效磷和碱解氮平均含量均显著低于非根际,而剑叶凤尾蕨差异不显著。黄壤上,毛蕨、剑叶凤尾蕨根际土壤有效磷平均含量较非根际均显著降低,而金粉蕨差异不显著;3 种植物根际土壤碱解氮平均含量则均显著低于非根际。

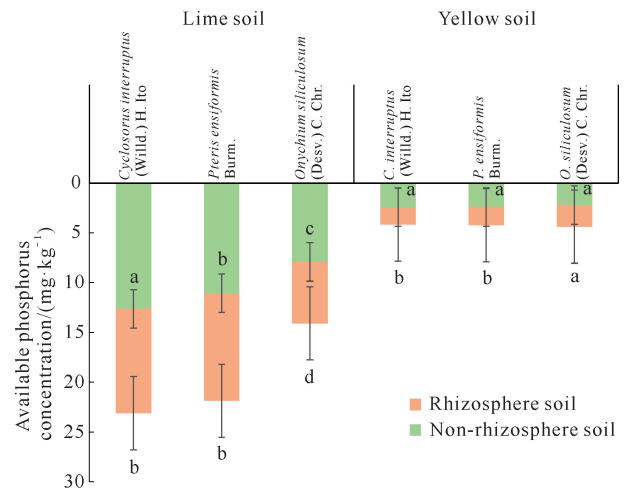


图 2 2 种喀斯特土壤类型下蕨类植物根际和非根际土壤有效磷

Fig. 2 Available phosphorus in the rhizosphere and non-rhizosphere of ferns under 2 types of karst soil

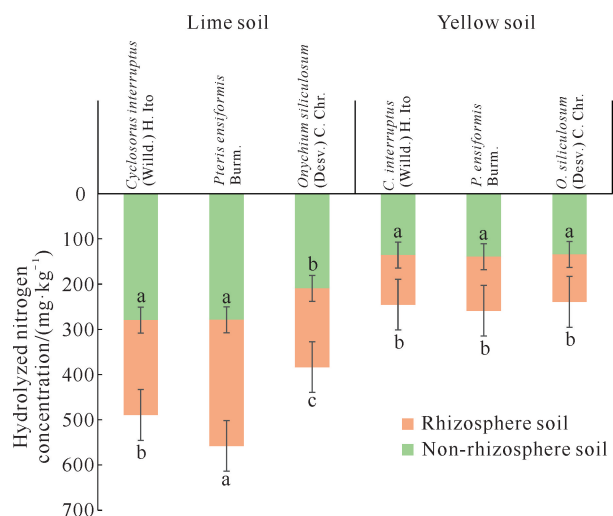


图3 2种喀斯特土壤类型下蕨类植物根际和非根际土壤碱解氮

Fig. 3 Hydrolyzed nitrogen in the rhizosphere and non-rhizosphere of ferns under 2 types of karst soil

## 2.5 蕨类植物氮磷养分特征与根际土壤养分含量的相关性

由表7可知,石灰土上分布的蕨类植物生物量与

表7 石灰土上分布的蕨类植物氮磷养分特征与土壤养分的相关性

Table 7 Correlation between fern's nitrogen and phosphorus nutrient and soil nutrients under lime soil condition

	生物量 Biomass	地上部分 磷含量 Above ground part P content	地下部分 磷含量 Under ground part P content	地上部分 氮含量 Above ground part N content	地下部分 氮含量 Under ground part N content	地上部分 N/P Above ground part N/P	磷素吸 收量 P absorp- tion	氮素吸 收量 N absorp- tion	土壤有效 磷含量 Soil available P content	土壤碱解 氮含量 Soil hydrolyzed N content	有机酸 总量 Organic acids total amount
Biomass	1										
Above ground part P content	0.938 *	1									
Under ground part P content	0.721	0.785	1								
Above ground part N content	0.906 *	0.927 *	0.910 *	1							
Under ground part N content	0.735	0.651	0.944 *	0.954 **	1						
Above ground part N/P	-0.531	-0.947 *	-0.546	0.758	0.685	1					
P absorption	0.876 *	0.901 *	0.976 ***	0.908 *	0.950 **	-0.714	1				
N absorption	0.875 *	0.899 *	0.929 *	0.931 *	0.953 **	0.712	0.950 **	1			
Soil available P content	0.963 **	0.979 **	0.643	0.805	0.768	-0.943 *	0.961 **	0.899 *	1		
Soil hydro- lyzed N con- tent	0.885 *	0.859	0.358	0.831	0.517	0.963 **	0.712	0.892 *	0.945 *	1	
Organic acids total amount	0.892 *	0.902 *	0.947 *	0.874 *	0.918 *	-0.733	0.941 *	0.915 *	0.976 **	0.902 *	1

Note: \* means significantly correlate at  $P < 0.05$  level, \*\* means significantly correlate at  $P < 0.01$  level, \*\*\* means extremely significantly correlate at  $P < 0.001$  level.

其地上部分磷含量、地上部分氮含量、磷素吸收量、氮素吸收量、土壤有效磷和碱解氮含量均显著相关。蕨类植物地上部分磷含量与地上部分氮含量、磷素吸收量、氮素吸收量、土壤有效磷含量显著正相关。磷素吸收量与氮素吸收量、土壤有效磷含量呈显著正相关,氮素吸收量与土壤有效磷、土壤碱解氮含量呈显著正相关。土壤有效磷含量与土壤碱解氮含量呈显著正相关。有机酸总量与土壤有效磷含量、土壤碱解氮含量呈显著性正相关。由表8可知,黄壤上分布的蕨类植物生物量与地上部分磷含量、地下部分磷含量、地上部分氮含量、磷素吸收量、氮素吸收量、土壤有效磷含量、土壤碱解氮含量显著正相关。氮素吸收量与磷素吸收量、土壤有效磷含量呈显著正相关。有机酸总量与土壤有效磷含量、土壤碱解氮含量呈显著正相关。

表 8 黄壤上分布的蕨类植物氮磷养分特征与土壤养分的相关性

Table 8 Correlation between fern's nitrogen and phosphorus nutrient and soil nutrient under acid soil condition

	生物量 Biomass	地上部分 磷含量 Above ground part P content	地下部分 磷含量 Under ground part P content	地上部分 氮含量 Above ground part N content	地下部分 氮含量 Under ground part N content	地上部分 N/P Above ground part N/P	磷素吸 收量 P absorp- tion	氮素吸 收量 N absorp- tion	土壤有效 磷含量 Soil available P content	土壤碱解 氮含量 Soil hydrolyzed N content	有机酸 总量 Organic acids total amount
Biomass	1										
Above ground part P content	0.863*	1									
Under ground part P content	0.897*	0.807	1								
Above ground part N content	0.880*	0.877*	0.834	1							
Under ground part N content	0.513	0.628	0.562	0.929*	1						
Above ground part N/P	-0.341	-0.145	-0.358	0.558	0.212	1					
P absorption	0.927**	0.925*	0.952**	0.893*	0.789	-0.786	1				
N absorption	0.908*	0.902*	0.779	0.955**	0.956**	0.489	0.909*	1			
Soil available P content	0.939**	0.966**	0.809	0.632	0.245	-0.588*	0.934**	0.919*	1		
Soil hydro- lyzed N con- tent	0.895*	0.718	0.713	0.852	0.173	0.956**	0.824	0.567	0.512	1	
Organic acids total amount	0.899*	0.927*	0.950**	0.902*	0.921*	-0.710	0.948**	0.878*	0.960**	0.897*	1

Note: \* means significantly correlate at  $P < 0.05$  level, \*\* means significantly correlate at  $P < 0.01$  level.

### 3 讨论

根系分泌行为是植物对外界环境长期适应而形成的一种生理响应机制,根系分泌物对土壤养分循环、植物营养吸收具有显著的影响,其中有机酸分泌与土壤养分状况、植物养分需求密切相关,尤其是在养分贫瘠的生境下<sup>[22,23]</sup>。罗绪强等<sup>[24]</sup>研究表明,茂兰喀斯特地区蕨类植物对土壤磷、钾较强的活化能力与根系吸收利用养分等根际效应有关。本研究结果表明,研究区石灰土上蕨类植物根系分泌的有机酸总量远高于黄壤上的,而石灰土上分布的蕨类植物根际土壤有效磷、碱解氮平均含量显著高于黄壤上分布的。相关性分析表明,石灰土和黄壤上土壤有效磷、碱解氮含量均与根系分泌的有机酸总量呈显著正相关。可见,蕨类植物能够通过调控根系有机酸的分泌以适应不同的喀斯特土壤环境。另外,本研究表明石灰土上蕨类植物分泌的有机酸主要为酒石酸、草酸、苹果酸等,黄壤上为酒石酸、苹果酸、柠檬酸等。董艺

博<sup>[25]</sup>研究了构树[*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hér. ex Vent.]在喀斯特黄壤、石灰土上的有机酸分泌特征,结果表明黄壤上构树根系主要分泌草酸、酒石酸、苹果酸等,石灰土上分泌酒石酸、苹果酸、乙酸、丁二酸等,该结果与本研究结果相似。樊卫国等<sup>[26]</sup>利用喀斯特植物有机酸分泌特性,通过施加外源草酸提高了石灰性土壤的养分有效性。因此,本研究结果也可作为外施有机酸提高贵州喀斯特地区石灰土和黄壤两类土壤养分的有效性提供参考。

植物氮、磷化学计量特征反映了有机体元素平衡和养分限制状况,是植物对生态环境长期适应的结果<sup>[27,28]</sup>。张亚冰等<sup>[29]</sup>研究表明,贵州月亮山5个优势树种叶片N/P为15.93,推测该区域森林植物的生长主要受磷限制。皮发剑等<sup>[30]</sup>对黔中优势乔灌木叶片化学计量特征研究表明,该区域植物叶片N/P为13.13,植物生长受氮限制。吴鹏等<sup>[31]</sup>研究表明,茂兰喀斯特地区蕨类植物的N/P均值为10.33,认为该区域蕨类植物的生长易受氮限制。本研究结果

表明,研究区域石灰土和黄壤上生长的蕨类植物地上部分 N/P 分别为 13.17 和 11.35,说明该区域蕨类植物的生长可能受氮限制。然而,本研究分析表明,两种生境下蕨类植物氮素、磷素的吸收量均与土壤有效磷含量呈显著正相关,说明蕨类植物对土壤氮素的吸收受土壤有效磷含量的限制,即 2 种土壤条件下蕨类植物的生长均受到土壤氮磷养分的共同限制。另外,本研究结果表明不同种蕨类植物生长对土壤养分限制的反应存在差异。生长季由于根系对根际养分的大量吸收,2 种土壤类型下苗木根际土壤有效磷、碱解氮平均含量均显著低于非根际。然而,石灰土上生长的剑叶凤尾蕨、黄壤上生长的金粉蕨,根际土壤有效磷、碱解氮含量较非根际差异不明显,说明剑叶凤尾蕨和金粉蕨对根际土壤氮磷养分有活化或富集作用。罗绪强等<sup>[24]</sup>研究表明,不同种类的蕨类植物对土壤磷素的活化能力有差异,与本研究结果相似。

植物养分分配特征能够反映土壤养分供给状况与植物养分需求间的动态平衡<sup>[32-34]</sup>。本研究表明,研究区石灰土和黄壤上生长的蕨类植物地上部分氮、磷平均含量均显著高于地下部分,而石灰土上蕨类植物地上部分氮平均含量均显著高于黄壤上。这可能与两种生境下土壤养分的供给有关,石灰土上分布的蕨类植物根际土壤有效磷、碱解氮平均含量显著高于黄壤上分布的。郭旭曼等<sup>[35]</sup>研究表明,喀斯特地区桢楠(*Phoebe zhennan* S. K. Lee & F. N. Wei)幼苗以牺牲对茎生物量的分配投资为代价,通过提高对根系或叶片的生物量投资来适应岩溶裂隙。李小飞等<sup>[36]</sup>研究表明,蕨类植物芒萁 [*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakaike]自坡上向坡下分布时,其地上生物量升高,而地下生物量降低,即当芒萁生长在光照偏弱的下坡时,其以地上部分生长为主,从而获得更多的地上生长空间。该现象与地形因子对群落内部光照强度和水分蒸发的影响有关。本研究采样区域为地势较平坦的喀斯特灌草丛,土壤养分浅薄,土壤质量较差,蕨类植物为了保障和满足光合作用的养分需要,形成了优先将氮磷养分分配到地上部分的适应策略。

#### 4 结论

蕨类植物通过采取不同的养分利用策略,以适应贵州喀斯特地区地带性黄壤和非地带性石灰土环境。2 种土壤类型下蕨类植物均采取了优先将氮素和磷素分配到地上部分,以保障和满足光合作用对养分需

求的策略。石灰土和黄壤上蕨类植物根际土壤有效磷、碱解氮含量均与根系有机酸分泌量呈显著正相关,且研究区域石灰土上根系有机酸分泌量远高于黄壤上,说明蕨类植物能够通过调控根系有机酸分泌以适应不同的喀斯特土壤环境。石灰土上蕨类植物分泌的有机酸主要为酒石酸、草酸、苹果酸等,黄壤上为酒石酸、苹果酸、柠檬酸等。该研究结果可以为外施有机酸提高贵州喀斯特地区石灰土和黄壤 2 种类型土壤养分的有效性提供参考。由于生长在石灰土上的剑叶凤尾蕨、分布于黄壤上的金粉蕨对根际土壤氮磷养分有活化或富集作用,可以考虑将其作为喀斯特生态系统恢复的草本植物。

#### 参考文献

- [1] 陈伏生,曾德慧,何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126-133.
- [2] 赵琼,曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163.
- [3] ZHANG Z, GUO W, WANG J, et al. Extraradical hyphae alleviate nitrogen deposition-induced phosphorus deficiency in ectomycorrhizal-dominated forests [J]. The New Phytologist, 2023, 239(5): 1651-1664.
- [4] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [5] 陈祖拥,刘方,王世杰,等. 喀斯特山区植被退化过程中的土壤质量变化及评价[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 639-648.
- [6] 张倩,韩贵琳,柳满,等. 贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 321-328.
- [7] HU L N, SU Y R, HE X Y, et al. Response of soil organic carbon mineralization in typical karst soils following the addition of <sup>14</sup>C-labeled rice straw and CaCO<sub>3</sub> [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1112-1118.
- [8] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [9] 郑永春,王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.
- [10] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 周旭. 不同程度石漠化环境中植物功能性状研究: 以重庆巫山县为例[D]. 重庆: 西南大学, 2015.



- [12] 杜有新. 退化喀斯特生态系统植被群落特征及氮磷养分有效性:以贵州省普定县为例[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [13] 张珍明, 张家春, 贺红早, 等. 喀斯特地区无籽刺梨产地土壤与植株的碳、氮和磷分布特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 618-622.
- [14] HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [15] 潘复静, 张伟, 梁月明, 等. 喀斯特不同植被恢复阶段土壤有机酸季节变化与有效氮磷的关系[J]. 生态学报, 2020, 39(4): 1112-1120.
- [16] 张雅洁, 刘云根, 王妍, 等. 岩溶地区典型蕨类植物卷柏根系分泌有机酸特征[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(4): 52-55, 61.
- [17] 彭旭东, 戴全厚. 西南石漠化区地表侵蚀/地下漏失的侵蚀环境特征[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(4): 150-158.
- [18] 刘文景, 涂成龙, 郎赞超, 等. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面化学组成变化与风化成土过程[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 271-279.
- [19] 陆树刚, 陈凤. 论蕨类植物生态类型的划分问题[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 407-415.
- [20] 沈宏, 施卫明, 王校常, 等. 不同作物对低磷胁迫的适应机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 172-177, 210.
- [21] 俞乐, 彭新湘, 杨崇, 等. 反相高效液相色谱法测定植物组织及根分泌物中草酸[J]. 分析化学研究简报, 2002, 30(9): 1119-1122.
- [22] 袁远爽, 黄泽曦, 陈丽娟, 等. 根系分泌物不同组分对西南亚高山云杉人工林土壤微生物和胞外酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1079-1087.
- [23] 赵宽, 吴沿友. 根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 466-471.
- [24] 罗绪强, 王世杰, 张桂玲, 等. 茂兰喀斯特地区常见蕨类植物根际土氮、磷、钾营养元素含量特征[J]. 地球与环境, 2014, 42(3): 269-278.
- [25] 董艺博. 干旱胁迫对构树幼苗根际环境及根系有机酸组成影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [26] 樊卫国, 潘学军, 陈红, 等. 草酸对刺梨立地石灰性土壤及叶片养分和果实产量、品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(7): 1113-1122.
- [27] 巴格登, 王文栋, 许仲林, 等. 喀纳斯天然林乔灌草叶片及土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8749-8758.
- [28] ZHANG W, ZHAO J, PAN F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1): 77-91.
- [29] 张亚冰, 吕文强, 周传艳, 等. 贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 182-188.
- [30] 皮发剑, 舒利贤, 喻理飞, 等. 黔中喀斯特 10 种优势树种根茎叶化学计量特征及其关联性[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 628-634.
- [31] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 等. 茂兰喀斯特区 68 种典型植物叶片化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5063-5080.
- [32] 李金华, 李志辉, 刘球, 等. 湘西喀斯特地区三种优良乡土树种人工林养分吸收、积累和分配特性[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 902-909.
- [33] LIU C N, HUANG Y, WU F, et al. Plant adaptability in karst regions [J]. *Journal of Plant Research*, 2021, 134(5): 889-906.
- [34] ZHANG Q, XIONG G, LI J, et al. Nitrogen and phosphorus concentrations and allocation strategies among shrub organs: the effects of plant growth forms and nitrogen-fixation types [J]. *Plant and Soil*, 2018, 427(1): 305-319.
- [35] 郭旭曼, 王佳敏, 杜浩瀚, 等. 桢楠幼苗适应喀斯特岩溶裂隙生境及降雨时间格局变化的方式[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 379-387.
- [36] 李小飞, 陈志彪, 陈志强, 等. 南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及其对环境因子的响应[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 33-37.

# Differences in Nitrogen and Phosphorus Nutrients Strategies of Common Ferns under Different Karst Soil Types and Their Relationship with Soil Nutrient Supply

PANG Li<sup>1</sup>, ZOU Qiongli<sup>1</sup>, WU Xia<sup>1</sup>, LI Jiabin<sup>1</sup>, ZHANG Minghao<sup>1</sup>, ZHANG Hongxia<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Anshun University, Anshun, Guizhou, 561000, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Anshun University, Anshun, Guizhou, 561000, China)

**Abstract:** Ferns are pioneer plants in karst ecosystems. It is of great significance for the restoration and reconstruction of degraded ecosystems to study their adaptation strategies to barren karst soils. In this study, the common fern plants, *Cyclosorus interruptus* (Willd.) H. Ito, *Pteris ensiformis* Burm. and *Onychium siliculosum* (Desv.) C. Chr., distributed on both zonal yellow soil and non-zonal calcareous soil in Guizhou Botanical Garden, were used as test materials. The differences of nitrogen and phosphorus nutrient strategies of three common ferns in two karst soil types and their relationship with soil nitrogen and phosphorus nutrient supply were studied. The results showed that: ① Tartaric acid, oxalic acid and malic acid were the main organic acids secreted by the roots of ferns on calcareous soil, while tartaric acid, malic acid and citric acid were the main organic acids secreted by the roots of ferns on yellow soil. The total amount of organic acids secreted by roots on calcareous soil was much higher than that on yellow soil. ② Compared with the ferns growing on yellow soil, the dry matter accumulation, nitrogen and phosphorus uptake of ferns on calcareous soil were higher, which were 2.7 times, 30.8% and 43.8% higher than those on yellow soil, respectively. ③ The average contents of nitrogen and phosphorus in the aboveground part of ferns were higher than those in the underground part under the two soil conditions. The N/P ratio of the aboveground part of ferns on calcareous soil was 13.17, and that on yellow soil was 11.35. ④ The nitrogen uptake of ferns under the two soil conditions was significantly positively correlated with the soil available phosphorus content, indicating that the absorption and utilization of soil nitrogen by ferns was limited by the content of available phosphorus in soil. In summary, there were significant differences in the utilization and distribution strategies of nitrogen and phosphorus nutrients in ferns on the two soil types, and their effects on soil nutrient cycling were greater on calcareous soil than on yellow soil.

**Key words:** karst areas; different soil types; the common ferns; N and P nutrient characteristics; nutrient adaptation strategies

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkxyxb/ch>