

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

罗绪强^{1,2}, 王世杰^{2,*}, 张桂玲³, 杜雪莲^{2,4}, 王程媛², 廖晶晶¹

(1. 贵州师范学院地理与旅游学院, 贵阳 550018; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 贵阳学院化学与材料工程学院, 贵阳 550005; 4. 贵州财经大学资源与环境管理学院, 贵阳 550004)

摘要:为探讨喀斯特地区植物根际土壤的养分含量特征及植物的适生机制,本文以茂兰喀斯特地区的专性钙生植物种、厌钙植物种和广布种三类对石灰土环境适应能力不同的蕨类植物为研究对象,采用剥落分离法收集根际和非根际土壤,分别对其氮、磷、钾元素进行测定分析。结果表明:(1)研究区土壤全氮含量无论是根际土还是非根际土均较高,根际土为专性钙生植物种>广布种>厌钙植物种,非根际土为石灰土>酸性土,不同种(类)植物根际土壤间差异显著($p<0.05$)。全磷和有机磷含量均是石灰土显著高于酸性土($p<0.05$);石灰土非根际土全P含量处于较高水平,有效P偏低,酸性土非根际土有效P处于极低水平;不同种(类)植物根际土各形态磷素含量变异特征与非根际土各形态磷素含量变异特征基本一致。全钾含量无论根际还是非根际均是酸性土稍高于石灰土,而速效钾含量却是石灰土显著高于酸性土($p<0.05$);各植物种根际土壤速效K含量多处于中等偏低水平,而在不同类植物根际土壤中,除厌钙植物种处于较低水平外均达到较高水平,在石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤中也达到高到极高水平;各类土壤全钾含量均处于较低水平。(2)专性钙生植物种根际土壤较厌钙植物种根际土壤对土壤全N、全P、全K、有机P、有效P和速效K的根际效应均要强,其中,专性钙生植物种根际土壤中的全N、全P、有机P和有效P含量均高于非根际土壤。专性钙生植物种和广布种对土壤P、K具有较强的活化能力,厌钙植物种的活化能力相对较弱,但对其需求、吸收的程度较高。(3)根际及非根际土壤各元素含量及变异特征主要受土壤类型、质地、水热条件、生物活动等因素的影响。厌钙植物种对土壤P、K活化能力较弱而需求较高可能是其在石灰土上生长受限的原因之一。

关键词:喀斯特;蕨类植物;根际土;营养元素

中图分类号:Q945.12;Q948.11 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2014)03-0269-10

土壤是陆地生态系统的基础,为地表生物的生长提供空间、养分、水分、热量等,是陆地生物作用的场所和能量库。土壤母质是影响土壤元素空间分布的主要因子^[1],同时,土壤形成过程受植被、气候、地形等生物和非生物因子的影响,且各因子间存在相互联系和制约^[2,3],因此,土壤系统是一个活的生态系统,土壤中元素与母岩元素组成有所不同^[4,5],在不同地质背景下,土壤的pH值、营养元素含量和空间分布、营养元素的植物可利用性等诸多情况存在较大差异^[6,7]。

根际土壤是指根际区域内的土壤,空间范围因土壤结构、微粒尺寸、含水量及土壤缓冲力的不同而不同,一般距离根系表面0~4 mm^[8,9]。根际土壤是土壤水分和矿物质进入根系参与生物链物质循环的门户,是根系自身生命活动和代谢影响最直接、最强烈的区域,同时也是植物所吸收养分的直接来源,对植物的营养生长起到至关重要的作用^[10-12]。由于受根系分泌物、养分吸收和微生物活动的影响,根际土壤的离子组成、有机质含量、pH、Eh、微生物量等都可能区别于非根际土壤^[13-15]。对根际土元素

收稿日期:2014-01-12;改回日期:2014-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(31100187;41203063);贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2010]2027号);贵州省教育厅自然科学基金重点项目(黔教科20090128号);贵州省高层次人才科研条件特助经费项目(TZJF2010065);贵州省优秀科技教育人才省长资金项目(黔省专合字[2012]80号);贵州省高等学校教学质量与教学改革工程项目(黔教高[2012]426号)。

第一作者简介:罗绪强(1976—),男,博士,副教授,研究方向为环境地球化学。E-mail: xuqianguo@163.com.

*通讯作者:王世杰(1966—),男,博士,研究员,研究方向为岩溶环境与地球化学。E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn.

含量特征的研究,特别是对不同环境适生植物根际土元素含量特征的研究,有助于更好地理解这一微生态场区的生物地球化学循环,在揭示植物间、植物与微生物、植物与环境之间的关系方面具有十分重要的意义^[11,16]。

本文选取生长在喀斯特地区的专性钙生植物种、厌钙植物种和广布植物种三类对石灰土环境适生能力不同的蕨类植物为研究对象,分别测定其根际土和非根际土氮、磷、钾营养元素含量,比较分析了不同环境条件下各蕨类植物根际土与非根际土氮、磷、钾营养元素含量特征,以期理解喀斯特地区植物的适生机制和退化生态系统植被恢复过程中的物种配置提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料来源

样本采自贵州茂兰喀斯特森林国家级自然保护区及其附近区域,地理位置 $107^{\circ} 52' 10'' \sim 108^{\circ} 05' 40''$ E, $25^{\circ} 09' 20'' \sim 25^{\circ} 20' 50''$ N, 平均海拔 850 m 左右。研究区内分布有地带性土壤黄壤和非地带性土壤石灰土,其中,石灰土的下伏基岩为中下石炭统灰岩,黄壤(酸性土)的下伏基岩为下石炭统砂岩、页岩。

1.2 试验设计

采样点按土壤类型进行设置,设置样点时尽量避免其它植物的干扰,共设置 14 个典型采样点^[17],其中,石灰土 10 个,黄壤 4 个。涉及 10 种蕨类植物,其中 5 种专性钙生植物柳叶蕨(*Cyrtogonellum fraxinellum*)、贯众(*Cyrtomium fortunei*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)和肿足蕨(*Hypodematium crenatum*)分布在石灰土样品采集点;2 种厌钙植物铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)和乌蕨(*Stenoloma chusanum*)分布在酸性土样品采集点;而肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)和凤尾蕨(*Pteris cretica* var. *nervosa*) 3 种广布植物在石灰土和酸性土样品采集点均有分布。供试土壤为这 10 种蕨类植物的根际与非根际土壤。

每个采样点每种植物按“S”型路线选择 4~5 株植物,取其根际与非根际土壤。将同一采样点同种植物的各植株根际土混合成一个样,作为该种植物在该采样点的根际土样。用各采样点同种植物的根际土元素含量的平均值作为该种植物的根际土元

素含量;用各采样点同类植物(专性钙生植物、厌钙植物、广布植物)的根际土元素含量的平均值作为该类植物的根际土元素含量。将石灰土同一采样点的各植株非根际土混合成一个样,作为该采样点石灰土非根际土样,用各采样点石灰土非根际土元素含量的平均值作为石灰土非根际土元素含量;将酸性土同一采样点的各植株非根际土混合成一个样,作为该采样点酸性土非根际土样,用各采样点酸性土非根际土元素含量的平均值作为酸性土非根际土元素含量。每个土样均由混合样四分法取一部分土壤,3 次重复后构成。

1.3 土样采集

根际土壤和非根际土壤按剥落法收集土样^[18-20]。即先用铁铲除去枯枝落叶层,然后在尽量不破坏植物根系条件下,用不锈钢土壤刀从植株基部向下挖出植株,将植株整体缓慢拔出土壤,轻轻抖动植株根部,使附着在根部不紧密的土壤全部掉落,收集抖落的土壤即为非根际土;然后将植株根部放入纸袋中剧烈摇晃,并用小毛刷将不能抖落的沾附在根上的土轻轻刷下,使附着在根上的土壤全部脱落,收集剧烈摇晃后根表脱落和小毛刷刷下的土壤即为根际土。样品带回实验室后剔除植物残根和其他可能杂物,风干土壤样品粉碎过 200 目筛,密封干燥保存,备用。

1.4 测定方法

土壤全磷采用混合酸($\text{HNO}_3\text{-HF}$)消解,钼锑抗比色法测定;有效磷采用 $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 溶液(pH 8.5)浸提,钼锑抗比色法测定;有机磷采用 550°C 灼烧, $0.2 \text{ mol/L (1/2) H}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提,钼锑抗比色法测定。土壤全钾采用混合酸($\text{HNO}_3\text{-HF}$)消解,电感耦合等离子体发射光谱仪(Vista MPX 2000, Varian Inc. Palo Alto, State of California, USA)测定;速效钾采用 $1 \text{ mol/L NH}_4\text{OAc}$ 溶液(pH 7.0)浸提,原子吸收分光光谱仪(PE-5100-PC AAS, Perkin Elmer Inc. Waltham, Massachusetts, USA)测定。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法测定。土壤全 N 采用元素分析仪(PE2400-II)测定,用标准物质胱氨酸($\text{N}\% = 11.7\%$)进行校对,测量误差为 $\pm 0.1\%$ 。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007、IBM SPSS Statistics 19 等软件对实验数据进行处理及统计分析。单因素方差分析(One-way ANOVA)部分,当数据

方差齐时采用 Duncan 多重比较检验结果, 方差不齐时采用 Games-Howell 多重比较检验结果。采用 Origin 8.0 及 Coreldraw 14.0 软件做图。利用土壤元素的有效量占全量的比率, 求取元素的有效度; 采用富集率表示根际土壤对土壤养分的富集程度: 富集率 = [(根际含量 - 非根际含量) / 非根际含量] × 100%。

2 结果与分析

2.1 植物根际土氮、磷、钾营养元素含量特征

2.1.1 各种植物根际土氮、磷、钾营养元素含量特征

10 种植物根际土壤与石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤的氮、磷、钾元素含量及 C/N 值结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 该 10 种蕨类植物根际土全 N 含量在 2.91~16.18 mg/g 之间变化, 平均值为 7.10 mg/g, 低于石灰土非根际土壤平均值, 高于酸性土非根际土壤平均值; 不同植物种间差异显著 ($p < 0.05$), 以酸性土生长的厌钙植物种铁芒萁和乌蕨最低, 石灰土生长的专性钙生植物种柳叶蕨最高。

植物根际土壤全 P、有机 P 及有效 P 含量分别在 0.16~1.57 mg/g、0.07~1.11 mg/g 和 0.89~15.92 mg/kg 之间变化, 平均值分别为 0.72 mg/g、0.48 mg/g 和 7.22 mg/kg。该 10 种植物根际土全 P 平均值和有机 P 平均值分别对应高于酸性土非根际土全 P 平均值和有机 P 平均值, 低于石灰土非根

际土全 P 平均值和有机 P 平均值, 而植物根际土有效 P 平均值不但高于酸性土非根际土有效 P 平均值, 同时也高于石灰土非根际土有效 P 平均值; 植物根际土壤 P 素含量除有效 P 外, 无论是全 P 还是有机 P, 种间差异均较显著 ($p < 0.05$), 且均以酸性土生长的厌钙植物种铁芒萁和乌蕨最低, 广布植物种肾蕨最高。

根际土全 K 和速效 K 含量分别在 4.01~6.19 mg/g、32.99~248.85 mg/kg 之间变化, 平均值分别为 4.96 mg/g 和 103.81 mg/kg; 10 种植物根际土全 K 含量平均值不但低于酸性土非根际土全 K 含量平均值, 同时也低于石灰土非根际土全 K 含量平均值, 速效 K 含量平均值除稍高于酸性土非根际土速效 K 含量平均值外, 同样低于石灰土非根际土速效 K 含量平均值; 不同植物根际土壤全 K 含量种间无显著差异, 但速效 K 含量在不同植物种间差异较显著 ($p < 0.05$)。植物根际土壤全 K 含量和速效 K 含量均以广布植物种肾蕨最高, 而最低值分别出现在石灰土生长的专性钙生植物种肿足蕨和铁线蕨。

从表 1 还可得知, 该 10 种蕨类植物根际土壤的 C/N 比值在 7.16~21.33 范围变化, 平均值为 11.23, 低于石灰土非根际土壤平均值, 高于酸性土非根际土壤平均值; 不同植物根际土壤的 C/N 比值除个别种间差异显著外, 整体差异并不显著 ($p < 0.05$), 以酸性土生长的厌钙植物种乌蕨最低, 石灰土生长的专性钙生植物种肿足蕨最高。

表 1 不同种植物根际土与石灰土非根际土和酸性土非根际土氮、磷、钾含量及 C/N 值 (平均值 ± 标准偏差)

Table 1 N, P and K contents and C/N ratios in rhizosphere soil under different plants and non-rhizosphere soil of calcareous soil and acidic soil (mean ± SD)

植物	植物类别	样本数	土壤全氮 (mg/g)	土壤全磷 (mg/g)	土壤全钾 (mg/g)	土壤有机磷 (mg/g)	土壤有效磷 (mg/kg)	土壤速效钾 (mg/kg)	土壤 C/N
肾蕨	广布种	4	12.91±3.66 ^{cd}	1.57±0.70 ^d	6.19±2.13 ^a	1.11±0.42 ^d	15.92±2.35 ^a	248.85±72.28 ^d	10.22±0.48 ^a
金星蕨	广布种	8	4.03±1.06 ^{ab}	0.50±0.16 ^{ab}	4.67±1.60 ^a	0.23±0.09 ^{ab}	9.48±14.50 ^a	44.98±22.85 ^a	12.40±5.43 ^a
凤尾蕨	广布种	3	7.87±2.16 ^{abc}	0.81±0.25 ^{ab}	4.32±0.74 ^a	0.81±0.30 ^{cd}	6.16±3.29 ^a	94.81±47.79 ^{ab}	10.18±0.47 ^a
蜈蚣草	专性钙生种	6	4.35±2.04 ^{ab}	0.72±0.63 ^{ab}	5.47±1.32 ^a	0.42±0.41 ^{abc}	2.88±2.08 ^a	78.36±35.50 ^{ab}	13.83±9.66 ^{ab}
柳叶蕨	专性钙生种	6	16.18±6.44 ^d	1.12±0.33 ^{cd}	4.54±1.70 ^a	0.81±0.24 ^{cd}	14.76±9.66 ^a	220.38±60.78 ^{cd}	11.65±2.05 ^a
肿足蕨	专性钙生种	2	7.35±0.30 ^{ab}	0.76±0.22 ^{ab}	4.01±1.83 ^a	0.64±0.02 ^{bcd}	6.03±0.17 ^a	75.34±47.84 ^{ab}	21.33±1.51 ^b
贯众	专性钙生种	5	9.06±3.81 ^{bc}	1.06±0.65 ^{cd}	5.10±1.57 ^a	0.67±0.36 ^{bcd}	5.57±3.56 ^a	156.46±82.70 ^{bc}	9.60±1.48 ^a
铁线蕨	专性钙生种	2	3.45±0.28 ^{ab}	0.35±0.21 ^{ab}	4.65±0.97 ^a	0.21±0.08 ^{ab}	9.28±12.01 ^a	32.99±30.87 ^a	10.13±2.25 ^a
铁芒萁	厌钙种	3	2.91±0.75 ^a	0.16±0.08 ^a	5.38±2.81 ^a	0.07±0.06 ^a	1.27±0.64 ^a	44.66±14.88 ^a	7.97±3.67 ^a
乌蕨	厌钙种	3	2.92±0.40 ^a	0.17±0.06 ^a	5.26±1.87 ^a	0.07±0.03 ^a	0.89±0.57 ^a	41.25±20.52 ^a	7.16±1.93 ^a
石灰土非根际土		10	8.21±4.11	0.87±0.44	5.08±1.85	0.56±0.34	6.97±4.44	195.61±111.40	11.54±4.68
酸性土非根际土		4	3.26±1.51	0.25±0.18	6.01±2.48	0.13±0.12	1.13±0.64	102.77±84.86	8.13±3.53

注: 同列数据后不同字母表示经 Duncan 或 Games-Howell 多重比较检验差异显著 ($p < 0.05$)。下同

2.1.2 三类植物根际土与非根际土元素含量比较分析

专性钙生植物种、厌钙植物种和广布植物种三类植物根际土壤的氮、磷、钾元素含量及 C/N 值结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,三类植物根际土壤中的全 N、全 P、有机 P、速效 K 含量和 C/N 值均有专性钙生植物种>广布种>厌钙植物种的变化趋势,有效 P 含量为广布种>专性钙生植物种>厌钙植物种的变化趋势,而全 K 含量的变化趋势则为厌钙植物种>广布种>专性钙生植物种。其中,厌钙植物种与广布植物种和专性钙生植物种之间的全 N、全 P、有机 P 和有效 P 含量差异均较显著,且厌钙植物种和专性钙生植物种之间的速效 K 含量和 C/N 值也存在较显著差异,全 K 含量在三类植物间的差异不显著 ($p<0.05$)。

由表 1、表 2 可见,广布种根际土壤中的全 N、全 P、速效 K 含量和 C/N 值均高于酸性土非根际土壤,低于石灰土非根际土壤,有机 P、有效 P 含量较石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤均要高,而全 K 含量较石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤均要低。方差分析结果显示,广布种根际土壤中的有效 P、全 P、全 N 含量与酸性土非根际土壤中对应元素含量间的差异较显著,速效 K 含量则与石灰土非根际土壤间的差异较显著 ($p<0.05$)。

专性钙生植物种根际土壤中的全 N、全 P、有机 P、有效 P 含量和 C/N 值较石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤均要高,全 K 含量较石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤均要低,而速效 K 含量则高于酸性土非根际土壤,低于石灰土非根际土壤。方差分析结果显示,专性钙生植物种根际土壤中的有效 P、全 P、全 N、速效 K 含量与酸性土非根际土壤中对应元素含量间的差异较显著,C/N 值与酸性土非根际土壤和石灰土非根际土壤间的差异均较显著 ($p<0.05$)。

厌钙植物种根际土壤中的全 N、全 P、有机 P、有效 P、速效 K 含量和 C/N 值较石灰土非根际土壤

和酸性土非根际土壤均要低,而全 K 含量高于石灰土非根际土壤,低于酸性土非根际土壤。方差分析结果显示,厌钙植物种根际土壤中的全 N、全 P、速效 K 含量和 C/N 值与石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤间的差异均较显著,有效 P 含量则与石灰土非根际土壤间的差异较显著 ($p<0.05$)。

2.2 植物根际土磷、钾有效度特征

2.2.1 各种植物根际土磷、钾有效度特征

由图 1 表明,10 种植物根际土壤中的 P 素有效度为金星蕨>铁线蕨>柳叶蕨>肾蕨>肿足蕨>铁芒萁>凤尾蕨>贯众>乌蕨>蜈蚣草,平均值为 1.03%,以金星蕨最高,为 1.97%,蜈蚣草最低,为 0.49%,根际土壤 P 素有效度在不同植物种间无显著差异 ($p<0.05$);K 素有效度为柳叶蕨>肾蕨>贯众>凤尾蕨>肿足蕨>蜈蚣草>铁芒萁>金星蕨>铁线蕨>乌蕨,平均值为 2.19%,以柳叶蕨最高,为 5.44%,乌蕨最低,为 0.79%,根际土壤 K 素有效度在不同植物种间差异显著 ($p<0.05$)。

2.2.2 三类植物根际土与非根际土磷、钾有效度比较分析

专性钙生植物种、厌钙植物种和广布植物种三类植物根际土与石灰土非根际土和酸性土非根际土的 P、K 元素有效度见图 2。由图 2 可以看出,三类植物根际土壤中的 P 素有效度为广布植物种>专性钙生植物种>厌钙植物种,以广布植物种最高,为 1.51%,厌钙植物种最低,为 0.67%,其中,除厌钙植物种根际土壤中的 P 素有效度低于石灰土非根际土壤中的 P 素有效度外,三类植物根际土壤中的 P 素有效度均高于石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤中的 P 素有效度。三类植物根际土壤间的 P 素有效度差异不显著,与石灰土非根际土壤间和酸性土非根际土壤间也无显著差异 ($p<0.05$)。

根际土壤中的 K 素有效度为专性钙生植物种>广布植物种>厌钙植物种,以专性钙生植物种最高,为 3.00%,厌钙植物种最低,为 0.91%,三类植物根际土壤中的 K 素有效度仅专性钙生植物种高

表 2 不同类型植物根际土氮、磷、钾含量及 C/N 值 (平均值±标准偏差)

Table 2 N, P and K contents and C/N ratios in the rhizosphere soil under different types of plants (mean ± SD)

植物类别	样本数	土壤全氮 (mg/g)	土壤全磷 (mg/g)	土壤全钾 (mg/g)	土壤有机磷 (mg/g)	土壤有效磷 (mg/kg)	土壤速效钾 (mg/kg)	土壤 C/N
广布种	15	7.16±4.39 ^{ab}	0.85±0.59 ^b	5.00±1.70 ^a	0.58±0.46 ^b	10.53±10.99 ^b	109.31±98.39 ^{ab}	11.37±4.02 ^{ab}
专性钙生种	21	9.05±6.30 ^b	0.88±0.53 ^b	4.90±1.45 ^a	0.59±0.35 ^b	7.83±7.60 ^{ab}	132.92±86.17 ^b	12.56±6.03 ^b
厌钙种	6	2.92±0.54 ^a	0.17±0.06 ^a	5.32±2.13 ^a	0.07±0.04 ^a	1.08±0.58 ^a	42.96±16.14 ^a	7.57±2.66 ^a

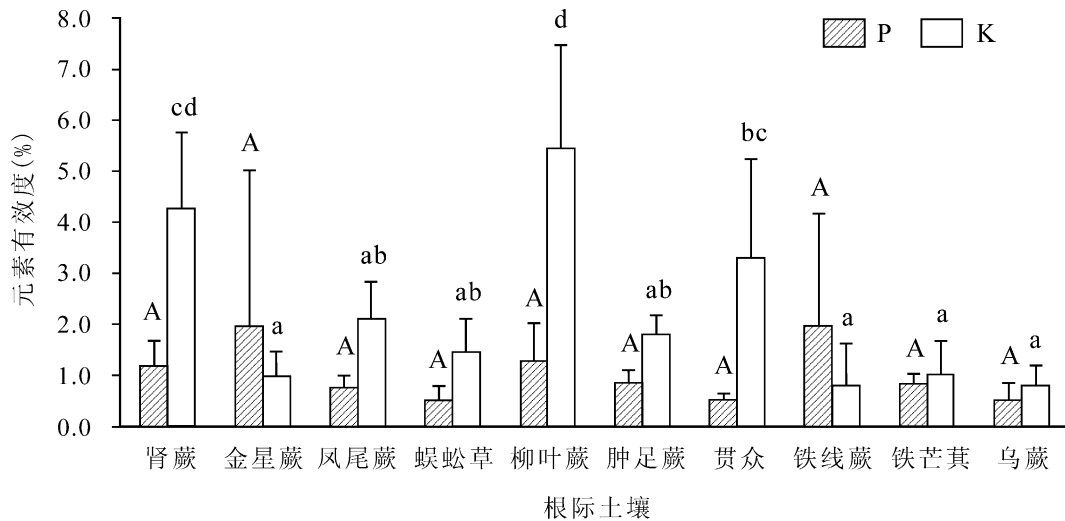


图 1 不同种植物根际土壤磷、钾元素有效度(平均值±标准偏差)。同一元素, 各比较项中不同字母表示经 Duncan 或 Games-Howell 多重比较检验差异显著 ($p < 0.05$)。下同

Fig. 1 P and K availabilities in rhizosphere soil under different plants (mean ± SD). As for the same element, different letters of each item for comparison show significant differences ($p < 0.05$) according to Duncan multiple comparison test. The same below

于石灰土非根际土壤中的 K 素有效度, 但除厌钙植物种外, 均高于酸性土非根际土壤中的 K 素有效度, 厌钙植物种根际土壤中的 K 素有效度不但低于石灰土非根际土壤中的 K 素有效度, 同时也低于酸性土非根际土壤中的 K 素有效度。三类植物根际土壤间的 K 素有效度差异显著, 且除广布植物种根际土壤与石灰土非根际土壤间、厌钙植物种根际土壤与酸性土非根际土壤间的差异不显著外, 三类植物根际土壤与石灰土非根际土壤间和酸性土非根际土壤间的土壤 K 素有效度差异均较显著 ($p < 0.05$)。

2.3 专性钙生植物种和厌钙植物种根际土壤对土壤养分的富集程度

专性钙生种和厌钙种两类植物根际土壤对土壤养分的富集程度(富集率)如图 3 所示, 由图 3 可以看出, 专性钙生植物种根际土壤对土壤全 N、全 P、全 K、有机 P、有效 P 和速效 K 的富集程度均高于厌钙植物种根际土壤对相应元素的富集程度。专性钙生植物种根际土壤对土壤养分的富集率为有效 P > 全 N > 有机 P > 全 P > 全 K > 速效 K, 厌钙植物种为有效 P > 全 N > 全 K > 全 P > 有机 P > 速效 K。专性钙生植物种根际土壤对土壤有效 P、全 N、有机 P 和全 P 的富集率均为正直, 表明这些元素在根际土壤中有较强的富集效应; 而厌钙植物种根际土壤

对土壤养分的富集率均为负值, 表明这些元素在根际土壤中没有富集效应。两类植物根际土壤对土壤养分的富集程度均以有效 P 最高, 速效 K 最低。

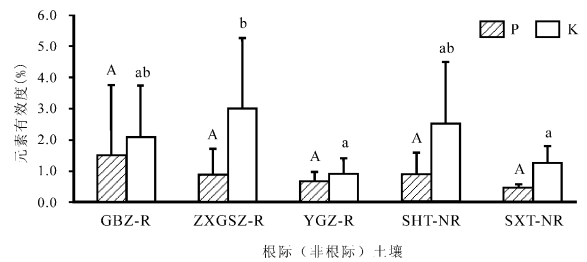


图 2 不同类植物根际土与石灰土非根际土和酸性土非根际土磷、钾元素有效度(平均值±标准偏差)。

GBZ-R: 广布种根际土; ZXGSZ-R: 专性钙生种根际土; YGZ-R: 厌钙种根际土; SHT-NR: 石灰土非根际土; SXT-NR: 酸性土非根际土

Fig. 2 P and K availabilities in rhizosphere soil under different types of plants and non-rhizosphere soil of calcareous soil and acidic soil (mean ± SD). GBZ-R: rhizosphere soil of dispersed species; ZXGSZ-R: rhizosphere soil of exclusive calciphytes; YGZ-R: rhizosphere soil of calcifuges; SHT-NR: non-rhizosphere soil of calcareous soil; SXT-NR: non-rhizosphere soil of acidic soil

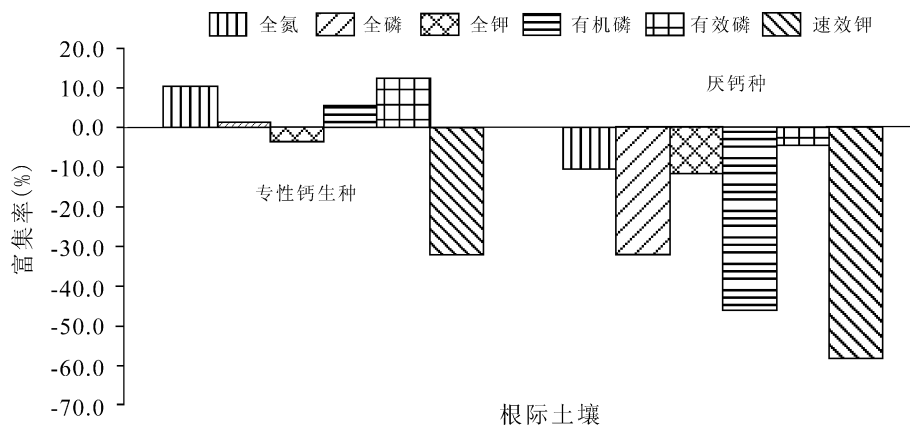


图3 专性钙生植物种和灰钙植物种根际土壤对土壤养分的富集率

Fig. 3 The nutrient enrichment rates in rhizosphere soil of exclusive calciphytes and calcifuges

3 讨论及结论

3.1 讨论

土壤全氮是衡量土壤氮素供应状况的重要指标,也是体现土壤肥力的重要指标之一^[21]。土壤氮素含量受土壤类型、水热条件、有机质含量、质地、耕作措施和化学氮肥的施用等多种因素的影响^[22, 23]。自然土壤中的氮基本上是成土过程中生物积累的结果,由于成土条件的不同,不同类型及同一类型中的不同土壤之间,全氮含量差异很大。已有研究表明,矿质土壤的全氮含量约在 0.1~5 mg/g 之间变化,有机土壤的含量则达 10 mg/g 或更高。我国除少数类型土壤外,一般含氮量都在 2 mg/g 以下,很多土壤含氮量不足 1 mg/g^[24]。

本研究区的土壤全氮含量无论是根际土还是非根际土均较高,这主要与其上覆植被多以草本为主的植被类型有关。植被类型和生长状况既影响到氮的生物积累,又影响到氮的流失速率。一般来说,草本植被下的土壤全氮含量高于木本植被下的土壤全氮含量。研究区石灰土非根际土壤全氮含量明显高于酸性土非根际土壤全氮含量,且三类植物根际土壤中的全氮含量呈现出石灰土区的专性钙生植物种 > 石灰土区和酸性土区均有分布的广布种 > 酸性土区的灰钙植物种的显著变化趋势,这主要是因为两类土壤的质地和水热条件明显不同所致。石灰土和黄壤质地一般都较粘重,但由于石灰土在成土过程中,石灰岩的主要成分碳酸钙被淋失,真正的成土物质是石灰岩中夹杂的一些铝硅酸盐粘土矿物,因此,在相同植被类型和生长状况及同等气候条件下,石灰土质地较黄壤更加粘重^[25]。质地粘重的土壤通透性常较差导致有机氮的分解较慢,且粘粒对土壤

有机氮的分解具有保护作用,故含氮量多高于同一类型中质地较轻的土壤^[22]。

磷是植物生长发育不可缺少的大量营养元素之一。植物所利用的磷素,主要来源于土壤^[26, 27]。土壤全磷量是土壤中各种形态磷素的总和,其含量的高低,受土壤母质、成土作用和耕作施肥的影响,与土壤质地和有机质含量关系密切^[27]。已有研究表明,粘土含磷高于砂性土,有机质丰富的土壤含磷亦较多^[28]。本研究结果表明,无论是根际还是非根际,石灰土全磷和有机磷含量均要显著高于酸性土,这主要受土壤母质和成土作用的影响,也与土壤质地、生物活动等因素有关^[29, 30]。

由于土壤中的磷大部分成难溶性化合物存在,因此全磷含量较高的土壤不一定有足够的有效磷供应植物生长所需^[31]。本研究中,石灰土非根际土壤全 P 含量处于较高水平,但有效 P 含量却处于中等偏低层次^[28],这主要是由于土壤中含有的大量游离碳酸钙使大部分磷形成难溶性的磷酸钙盐所致^[30],酸性土非根际土壤有效 P 含量处于极低水平,应主要与其全 P 含量较低有关^[32, 33]。不同种(类)植物根际土壤各形态磷素含量变异特征与非根际土基本一致,表明根际土中各形态磷素含量主要由原土体基本性质决定。

钾在土壤中以 KCl 、 K_2SO_4 等盐类形式存在,在土壤溶液或水中解离成 K^+ 而被植物根系吸收^[34]。土壤全钾含量受成土母质、土壤类型和气候条件等多种因素的影响,不同母岩母质上发育的土壤和不同土壤类型中钾元素的丰度不同,尽管如此,从岩石矿物的风化过程到成土过程中,钾元素的分异或重新分配并不显著^[28, 35]。本研究结果表明,土壤全钾含量在石灰土与黄壤两类土壤非根际土壤间,不同

种(类)植物根际土壤间,甚至在根际土壤与非根际土壤间均无显著差异($p < 0.05$),这与不同母岩母质上发育的土壤中钾素的分异不大密切相关,同时表明了根际土壤中的全钾含量主要决定于原土体的含量。无论根际土还是非根际土,酸性土(黄壤)的全钾含量均稍高于石灰土的全钾含量,这是因为不同母质上土壤钾元素的丰度为沉积页岩(1.93%)>沉积砂岩(1.89%)>沉积石灰岩(1.75%),不同土类钾元素的丰度为黄壤(1.76%)>石灰土(0.99%)的缘故^[35]。

全钾含量只能说明土壤钾素的潜在肥力,而速效钾能很快被植物吸收利用,是快速判断土壤供钾能力的常用肥力指标^[36]。本研究结果表明,速效钾含量在石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤间存在显著差异,在不同种(类)植物根际土壤间的差异也较显著($p < 0.05$),除专性钙生种铁线蕨和广布种金星蕨外,无论根际土壤还是非根际土壤,土壤速效钾含量均是石灰土区显著高于黄壤(酸性土)区,表明土壤速效钾含量与土壤质地、水热条件和植物吸收等因素有关,这与前人的研究结果一致^[28,35]。研究植物种根际土壤速效 K 含量多处于中等偏低水平,仅肾蕨、柳叶蕨和贯众为高到极高水平,不同类植物根际土壤中,除厌钙种处于较低水平外,专性钙生种和广布种均达到较高水平,石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤速效钾含量也达到高到极高水平,而研究区各类土壤全钾含量均处于较低水平,表明土壤速效 K 含量的高低受土壤全钾含量的影响不大,二者之间没有直接的对应关系^[36]。

元素有效度可以用来反映土壤中该元素呈生物有效性部分的多寡,有效度越高,元素活化能力越强,越易被植物吸收^[37]。本研究结果显示,尽管土壤 P 素有效度在各根际土壤和(或)非根际土壤间均无显著差异($p < 0.05$),但整体趋势依然是广布种根际土>专性钙生种根际土>石灰土非根际土>厌钙种根际土>酸性土非根际土,表明专性钙生植物种和广布种对土壤 P 素可能有相对较高的活化能力,而厌钙植物种对土壤 P 素的需求、吸收较高,但其活化能力却相对较弱;同时,P 素有效度在石灰土和酸性土区均体现出根际土高于非根际土的情况,说明根际效应对土壤 P 素有一定的活化作用。土壤 K 素有效度呈现出专性钙生种根际土>石灰土非根际土>广布种根际土>酸性土非根际土>厌钙种根际土的变化趋势,且各土壤间差异较显著(p

< 0.05),表明专性钙生植物种和广布种对土壤 K 素的活化能力显著高于厌钙植物种,而厌钙植物种对 K 素的需求和吸收可能比专性钙生植物种要高得多。同时,K 素有效度在石灰土和酸性土区均出现根际土普遍低于非根际土的情况,说明根际效应对土壤 K 素的活化作用较弱。从此角度看,石灰土全 K 含量较低,厌钙植物种对土壤 P 素、K 素活化能力较弱而吸收能力较强可能是其在石灰土上生长受限的原因之一。

植物根际是植物与土壤环境接触的重要界面^[5],根际土壤是植物与土壤直接进行物质交换最活跃的场所^[12],由于植物根系表面的物理化学过程以及根系生理代谢活动,分泌或泄漏一些物质以及微生物的活动和根系脱落物的降解,根际土壤中的元素组成和浓度可能会与非根际土壤存在差异^[10,13,14,38]。富集率的大小可以反映根际效应的强弱^[39,40]。本研究结果表明,专性钙生植物种根际土壤较厌钙植物种根际土壤对土壤全 N、全 P、全 K、有机 P、有效 P 和速效 K 的根际效应均要强。其中,专性钙生植物种根际土壤中的全 K 和速效 K 含量、厌钙植物种根际土壤中的全 N、全 P、全 K、有机 P、有效 P 和速效 K 含量均较非根际土壤低,这主要是由于根系对养分的吸收作用所致^[10,11,35],专性钙生植物种根际土壤中的全 N、全 P、有机 P 和有效 P 含量高于非根际土壤,主要受土壤类型、质地、水热条件和植物吸收利用等因素的影响^[23]。土壤中的氮素绝大部分以有机态氮的形态存在,虽然植物能够直接吸收某些简单的有机氮,但是绝大部分有机态氮必须经过矿化作用分解成无机态氮后才能被植物吸收利用^[41]。由于有机氮在质地粘重的石灰土中的分解速率较慢^[42,43],导致土壤氮素被植物吸收利用的程度相对较低而使其在根部富集。土壤中有 20%~80%的磷以有机形式存在,但有机磷只有在水解转化为无机磷后才能大量被植物利用^[44]。石灰土全钙和有效钙含量普遍较酸性土高^[45,46],而磷在高钙土壤中易形成难溶性的磷酸钙盐而被固定,移动性较差,其有效性也随之下降^[47],限制了植物对 P 的吸收利用,这是导致专性钙生植物种根际土壤中的全 P 和有机 P 含量高于非根际土壤的主要原因。有效 P 通常被认为是植物可以吸收利用的 P,在根际常表现亏缺。专性钙生植物种根际土壤中的有效 P 含量不但没有因根系吸收而减少,反而表现增加,说明 P 在专性钙生植物种根际发生了

活化,可能由于活化作用大于植物对P的吸收作用使得有效P浓度增加^[47, 48]。

3.2 结论

研究区常见蕨类植物根际与非根际土壤全氮含量均较高,且在不同种(类)植物间差异显著($p < 0.05$),植物根际土壤全氮含量变化趋势为专性钙生植物种>广布种>厌钙植物种,以铁芒萁和乌蕨最低,柳叶蕨最高。全磷和有机磷含量均是石灰土显著高于酸性土($p < 0.05$)。石灰土非根际土全P含量处于较高水平,但有效P含量却处于中等偏低层次,酸性土非根际土有效P处于极低水平。不同种(类)植物根际土各形态磷素含量变异特征与非根际土各形态磷素含量变异特征基本一致。植物根际土壤中的全P和有机P含量均有专性钙生植物种>广布种>厌钙植物种的变化趋势,有效P含量为广布种>专性钙生植物种>厌钙植物种,全磷、有机磷、有效磷含量均以铁芒萁和乌蕨最低,柳叶蕨和肾蕨最高。无论根际土还是非根际土,全钾含量均是酸性土稍高于石灰土,而速效钾含量却是石灰土显著高于酸性土($p < 0.05$),三类植物根际土壤中的速效K含量有专性钙生植物种>广布种>厌钙植

物种的变化趋势,而全K含量的变化趋势则为厌钙植物种>广布种>专性钙生植物种,全K含量和速效K含量均以肾蕨最高,最低值分别出现在肿足蕨和铁线蕨。研究植物种根际土壤速效K含量多处于中等偏低水平,但广布种肾蕨和专性钙生种柳叶蕨却达到极高水平,在不同类植物根际土壤中,除厌钙植物种处于较低水平外均达到较高水平,石灰土非根际土壤和酸性土非根际土壤也达到高到极高水平,各类土壤全钾含量均处于较低水平。

专性钙生植物种根际土壤较厌钙植物种根际土壤对土壤全N、全P、全K、有机P、有效P和速效K的根际效应均要强,且两类植物根际土壤对土壤养分的富集程度均以有效P最高,速效K最低。其中,专性钙生植物种根际土壤中的全N、全P、有机P和有效P含量均高于非根际土壤。专性钙生植物种和广布种对土壤P、K具有较强的活化能力,厌钙植物种的活化能力相对较弱,但对其需求、吸收的程度却相对较高。石灰土全K含量较低,厌钙植物种对土壤P、K活化能力较弱而需求较高可能是其在石灰土上生长受限的原因之一。

参 考 文 献

- [1] 徐尚平,陶澍,徐福留,等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 337-345.
- [2] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-6.
- [3] 贺学礼,耿晓进,赵丽莉,等. 金银花根围AM真菌多样性的季节性变化研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 90-94.
- [4] 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441-449.
- [5] 弋良朋,马健,李彦. 荒漠盐生植物根际土壤酶活性的变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 500-505.
- [6] 陈怀满,郑春荣,周东美,等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 46-134.
- [7] 杨成,刘丛强,宋照亮,等. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 503-508.
- [8] Nye P H. On estimating the uptake of nutrients solubilized near roots or other surfaces[J]. Journal of Soil Science, 1984, 35: 439-446.
- [9] Bertin C, Yang X, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere[J]. Plant Soil, 2003, 256: 67-83.
- [10] 杨守军,刘德玺,孙玉波,等. 根剪对冬枣根际土壤理化性状及生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 215-218.
- [11] 李晓月,郑险峰,周建斌. 不同质地小麦根际土壤有机碳、氮含量及特性研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 610-613.
- [12] 李金娟,张雪霞,王平,等. 多金属硫化物矿区不同品种水稻根际土壤酶活的变化[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1830-1836.
- [13] Wang X P, Zabowski D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions[J]. Plant and Soil, 1998, 200: 13-20.
- [14] 陈苏,孙铁珩,孙丽娜,等. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在根际和非根际土壤中的吸附-解吸行为[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 843-851.

- [15] 杨威,周卫军,包春红,等. 茶树根际土壤磷的解吸特性[J]. 应用生态学报, 2013, 4(7): 1843—1848.
- [16] Morgan J A W, Bending G D, White P J. Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere [J]. *Journal of experimental botany*, 2005, 56(417): 1729—1739.
- [17] 王程媛,王世杰,容丽,等. 茂兰喀斯特地区常见蕨类植物的钙含量特征及高钙适应方式分析[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1061—1069.
- [18] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean root-soil interface[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1969, 33, 905—908.
- [19] 苏宝玲,韩士杰,王建国,等. 根际微域研究中土样采集方法的研究进展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 477—480.
- [20] 毛达如,申建波. 植物营养研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 143—149.
- [21] 朱兆良. 中国土壤的氮肥力与农业中的氮素管理[A]. 见: 沈善敏主编. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 160—211.
- [22] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992, 37—59.
- [23] 林昌虎,涂成龙,陆晓辉,等. 贵州西部喀斯特石漠化地区退耕弃荒地土壤氮素变异特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 14—17, 88.
- [24] 朱海燕. 重庆石灰岩地区石漠化过程中水分与氮素对土壤-构树系统氮、磷元素营养的影响[D]. 重庆: 西南大学博士学位论文, 2007: 3—10.
- [25] 刘超,翟欣,许自成,等. 贵州乌蒙烟区清甜香烤烟风格形成的农业地质背景特征[J]. 生态学杂志, 2014, 3(1): 105—111.
- [26] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展[J]. 土壤学进展, 1990, 18(6): 1—5.
- [27] 李博,赵斌,彭容豪,等. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 43—186.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 70—114.
- [29] 李祖荫. 石灰性土壤中粘粒与碳酸钙的固磷作用[J]. 土壤肥料, 1983, (2): 13—17.
- [30] 吕家珑,李祖荫. 石灰性土壤固磷机制的探讨[J]. 土壤通报, 1991, 22(5): 204—206.
- [31] 向万胜,黄敏,李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663—670.
- [32] Tyler G. Inability to solubilize phosphate in limestone soils—key factor controlling calcifuge habit of plants[J]. *Plant and Soil*, 1992, 145: 65—70.
- [33] Solaiman Z, Marschner P, Wang D M, *et al.* Growth, P uptake and rhizosphere properties of wheat and canola genotypes in an alkaline soil with low P availability[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44: 143—153.
- [34] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 92—93.
- [35] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 367—371.
- [36] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 112—448.
- [37] 陈富荣,陈永宁,贾十军,等. 合肥市土壤重金属元素异常及其生态效应[J]. 岩矿测试, 2007, 26(4): 275—280.
- [38] 马义兵,鄢来斌,张福锁. 根际土壤化学研究进展[J]. 土壤, 1993, 25(5): 231—233.
- [39] 马斌,周志宇,张彩萍,等. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征[J]. 草业学报, 2005(03): 106—110.
- [40] 董兆佳,孟磊. 海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 309—312.
- [41] 罗绪强,王世杰,刘秀明. 陆地生态系统植物的氮源及氮素吸收[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1094—1100.
- [42] 田茂洁. 土壤氮素矿化影响因子研究进展[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 298—300.
- [43] 王艳杰,邹国元,付桦,等. 土壤氮素矿化研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 203—208.
- [44] 宋勇春,李晓林,冯固. 菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草生境中土壤有机磷亏缺的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1130—1135.
- [45] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37—44.
- [46] 罗绪强,王世杰,张桂玲,等. 钙离子浓度对两种蕨类植物光合作用的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 258—262.
- [47] 张彦东,白尚斌,王政权,等. 落叶松根际土壤磷的有效性研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 31—34.
- [48] 杨君,周卫军,杨威,等. 茶树根际与非根际土壤磷形态变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 216—220.

Characteristics of N, P and K Contents in Rhizosphere Soil of Common Pteridophyte in the Maolan Karst Area

LUO Xu-qiang^{1,2}, WANG Shi-jie², ZHANG Gui-Ling³,
DU XUE-lian^{2,4}, WANG Cheng-yuan², LIAO Jing-Jing¹

(1. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. College of Chemistry and Materials Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 4. Department of Resources and Environment Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550004, China)

Abstract: To investigate the characteristics of nutrient contents in rhizosphere soil of plant and the adaptive mechanism of plant in the karst area, three types of pteridophytes including exclusive calciphytes, calcifuge and dispersed species were selected as the research objects, which have different adaptive abilities in the calcareous soil environment from the Maolan karst area. Rhizosphere soil and non-rhizosphere soil were collected by the spalling separation method and the N, P and K contents were measured, respectively. The results showed that: (1) The contents of total N in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil were both high, in rhizosphere soil there is shown such an increasing order as to be exclusive calciphytes > dispersed species > calcifuges, and there is a significant difference between rhizosphere soils ($p < 0.05$), whether under different plant species or under different plant types. In non-rhizosphere soil, total N contents in calcareous soil are higher than in acidic soil. The contents of total P and organic P in calcareous soil are higher than in acidic soil ($p < 0.05$). In non-rhizosphere soil, the contents of total P in calcareous soil are at a higher level, but the available P is low, and it is extremely low in acidic soil. Either under various plant species or under various plant types, the variation characteristics of P contents are basically identical between in rhizosphere soil and in non-rhizosphere soil. The contents of total K in acidic soil are slightly higher than in calcareous soil both in rhizosphere and non-rhizosphere, but the available K in calcareous soil is significantly higher than in acidic soil ($p < 0.05$). The contents of available K in rhizosphere soil under various plant species are at the medium low level, but at a higher level under various plant types except the calcifuges. As for the contents of available K in non-rhizosphere soil, calcareous soil and acidic soil are both at high level. In addition, the contents of total K are at low level in all kinds of soils. (2) The rhizosphere effect of rhizosphere soil under exclusive calciphytes is stronger than under calcifuges in total N, P, K and organic P, available P, available K. Among them, the contents of total N, P, organic P and available P in rhizosphere soil are higher than in non-rhizosphere soil under exclusive calciphyte. Exclusive calciphytes and dispersed species have strong ability of activation to K and P. The activation ability of calcifuges to K and P is relatively weak, but the demand and the extent of absorption are higher. (3) The contents of each element and variation characteristics in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil mainly depend on soil type, texture, water and heat condition, biological activity and so on. These results suggested that one reason for the growth restriction of calcifuges on calcareous soil may be their weak activation ability and the high demand for P and K.

Key words: karst; pteridophyte; rhizosphere soil; nutrient element