

魏兴琥, 雷俐, 刘淑娟, 等. 粤北岩溶峰林植物钙吸收、转运、返还能力及适应性分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 368-376.
DOI: 10.11932/karst20170311

粤北岩溶峰林植物钙吸收、转运、返还能力及适应性分析

魏兴琥¹, 雷俐², 刘淑娟¹, 关共凑¹

(1. 佛山科学技术学院/广东省西江北江流域生态文明建设与可持续发展研究中心, 广东 佛山 528000;

2. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘要:选择粤北岩溶峰林30种典型植物种,系统测定了不同植物的根际土、根、茎干、叶片、枯落物全钙含量,采用吸收系数、转运率、返还率指标分析了不同植物对钙利用、储存及返还土壤的特征,并以各样本全钙含量为指标进行不同植物钙适应性的聚类分析,结果表明:(1)峰林植物对岩溶土壤富钙环境具有良好的适应性,其全钙含量与土壤根际全钙含量之间呈显著的正相关关系,但不同植物的钙吸收系数差异较大,攀援灌木的钙吸收系数分别是乔木、小灌木和草本植物的1.21倍、1.22倍和1.30倍;(2)不同生活型植物的叶片、茎干、根系全钙含量差异较大,各类灌木的叶片、茎干、根系全钙含量平均值分别是乔木全钙含量的1.08倍、1.07倍、1.17倍,是草本植物叶片和根系全钙含量的1.39倍、1.82倍,全钙含量总体上呈现:根系>叶片>茎干的趋势;(3)30种峰林植物的钙返还率在22.06%~103.84%之间,草本植物钙返还率最大,为67.18%,其次为乔木的58.72%,灌木最小,为55.90%,但3种生活型类型之间无显著性差异;(4)根据聚类分析结果可以将30种峰林植物对富钙环境的适应性分为富钙高吸收低返还型、少钙低吸收高返还型、多钙高吸收中返还型、多钙中吸收中返还型4种类型,30种植物中有26种属于多钙中吸收中返还型,这证明岩溶峰林植物对土壤富钙环境有良好适应性。

关键词:岩溶;植物;钙;粤北

中图分类号:Q945; P642.25

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)03-0368-09

0 引言

钙循环与碳循环、氮循环等一样是地球生态系统的重要组成部分,岩溶生态系统受碳酸盐岩富钙地质背景的影响,其植物吸收钙含量远高于非岩溶区植物,如贵州茂兰岩溶区植物叶片钙含量平均高达0.12%,比非岩溶区高出58.45%^[1],岩溶区生长的榿木(*Loopetalum chinense*)叶片钙含量是非岩溶区的31.2倍^[2],在贵州茂兰森林公园保护区,8种石灰岩植物植株全钙含量平均在0.8%左右^[3]。不同岩溶植物、同一植物不同部位钙含量也有差异,如贵州花江峡谷查尔岩小流域植物全钙含量平均在1.2%~3.2%之间,且藤本植物>乔木≥灌木>草本^[4];叶片钙含量:叶片>茎>根^[5],但岩溶地区常见的几种蕨类植物

中钙含量的变化趋势却是:根>成熟叶>幼叶^[2]。由此可见,不同岩溶植物对富钙环境有不同的适应机制。

关于岩溶植物与富钙环境的关系研究,早在1954年,侯学煜就根据植物对土壤钙质的依赖程度,将植物定性划分为好钙性植物(Calciphile)、亚好钙性植物(Calccole)、嫌钙植物(CalCIFuge)、亚嫌钙植物和中间性植物^[6]。屠玉麟^[7]以土壤-基质条件作为重要指标,按喀斯特灌丛植物与其土壤环境及基质条件的生态关系,将其区系成分划分为专性钙土植物(Exclusive calciphytes)、喜钙植物(CalciPhilous plants)、随遇植物(Indiferent plants)和厌钙植物(CalCIFuge plants)4个生态类型。周运超^[8]选择贵州喀斯特地貌上的30种植物,按叶片Ca、Mg含量进行聚类分析,对植物钙适应类型进行量化分类,嗜

基金项目:国家自然科学基金项目(41571091);中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-EW-ST5-092)

第一作者简介:魏兴琥(1964-),男,研究员,博士,主要从事退化土地过程、机理及生态恢复技术研究。E-mail:weixinghu1964@163.com。

收稿日期:2016-07-06

钙型:Ca+Mg含量在4.0%以上,喜钙型:Ca+Mg含量在3.0%~4.0%之间,随遇型:Ca+Mg含量在1.4%~2.5%之间,厌钙型:Ca+Mg含量在1.3%以下。姬飞腾等^[9]也根据14种不同石漠化程度区域的优势小灌木和草本植物植株钙含量与土壤交换态钙含量的关系,将植物分为三种类型:随遇型、高钙型和低钙型。

土壤中的Ca²⁺通过质流转移至根表面,进入植物根系细胞,进入木质部,并借助蒸腾作用运至植物的茎干、叶片、花、果实等器官中,在此过程中,钙与有机酸、果胶、酶等各种化合物结合形成植物组成部分或以不同形态储存于不同器官中。不同植物钙吸收、转移、储存的差异是对岩溶环境长期适应进化形成的,是植物与环境长期协调共存的基础,正如岩溶植物多旱生、多石生、多藤本物种一样,而富钙是岩溶土壤的显著特征,岩溶钙不仅是植物生长必须的元素,钙及附生藻类生物还共同影响生物岩溶作用^[10],钙还是影响土壤吸收重金属的关键要素^[11]。掌握不同岩溶植物对土壤钙的适应策略不仅对于掌握岩溶生态系统中钙循环必不可少,而且对于石漠化土地治理中物种选择至关重要。但由于岩溶环境的非均质特点,使不同岩溶环境土壤钙差异较大,即使在同一区域的土壤钙含量、钙形态也不同,从而影响植物叶片、根系等钙含量,造成采用叶片、根系、根际土壤钙为指标划分植物钙适应类型的偏差,而粤北岩溶区作为中国南方岩溶区的东延区域,其湿度、温度都有区域代表性,也是岩溶生态研究的薄弱区,因此,该研究选择粤北典型岩溶峰林区物种分布丰富的坡麓为样区,该区域地层为泥盆系,岩性为灰岩,坡麓下沿与耕地相连,局部有石漠化现象,为减少岩溶环境非均质性造成的差异,选择相对均质的坡麓为样地,采集典型植物根、茎、叶、枯落物及根际土壤,分析不同器官及土壤钙含量差异,基于生物循环理论,选择吸收系数、转运率与返还率来比较不同植物对岩溶环境钙的适应性,力求从小区域、小误差、多样本角度分析岩溶

峰林植物对富钙环境的适应特征和差异,拟通过多个钙指标对植物的适应机制细化分析,了解不同岩溶植物的适应性,以为石漠化治理提供生物资源与技术。

1 研究区概况

研究区位于广东省英德市九龙镇石角村一座孤峰的坡麓(N24°08.113',E112°51.855'),坡麓海拔高度121 m,山体相对高度80 m左右,东西走向,长约120 m,南北宽约50 m。地貌属于粤北山地丘陵区的连江岩溶高原及盆地亚区,是九龙—明迳盆地的组成部分^[12]。气候为南亚热带季风气候区,年均气温20.7℃,年均降雨量1 879 mm,主要集中在4—9月,占全年降雨量的70%以上。峰林上部裂隙土为黑色石灰土,但坡麓厚土层为红色石灰土。植被属石灰岩灌丛^[13],低洼处或土层较厚处有少量乔木,如黄连木(*Pistacia chinensis*)、八角枫(*Alangium chinense*)等,其余多为灌木,尤其以攀援灌木和藤本居多。

2 研究方法

2.1 植物种调查及样品采集

选择峰底平缓坡麓为研究区,样地的岩石裸露率在5%以下,土层覆盖基本均一,植被盖度90%以上,生境相对一致。该孤峰为2000年左右设立的生态公益林,除与耕地接壤部分受人类轻度干扰外,其他均处于自然生长状态。采样前先设置3个3 m×8 m样方,系统调查各样方的植物种、个体密度、高度、生物量、频度。根据样方调查结果,最终选定坡麓石灰岩灌丛群落30个主要的优势种和伴生种植物为研究对象(表1)。采集30种植物的根、茎、叶、枯落物,枯落物采集已枯黄凋落的叶片和枝条,采集根系样品时同时剥取根际及周围1~5 cm范围的土样作为根际土样。每种植物至少保证3个样本。

表1 样地植物种的特征

Table 1 Features of sampling plants in the field

植物种类	拉丁名	科	属	生态型
秋枫	<i>Bischofia javanica</i>	大戟科	重阳木属	常绿乔木
菜豆树	<i>Radermachera sinica</i>	芸香科	菜豆树属	落叶小乔木
八角枫	<i>Alangium chinense</i>	八角枫科	八角枫属	落叶小乔木
黄连木	<i>Pistacia chinensis</i>	漆树科	黄连木属	落叶乔木
石岩枫	<i>Mallotus repandus</i>	大戟科	野桐属	常绿半攀援灌木

续表 1

植物种类	拉丁名	科	属	生态型
龙须藤	<i>Bauhinia championii</i>	苏木科	羊蹄甲属	常绿攀援藤本
单叶铁线莲	<i>Clematis spp.</i>	毛茛科	铁线莲属	常绿攀援藤本
鸡血藤	<i>Millettia reticulata</i>	豆科	崖豆藤属	大型常绿攀援灌木
雀梅藤	<i>Sageretia thea</i>	鼠李科	雀梅藤属	常绿攀援灌木
小果蔷薇	<i>Rose cymosa</i>	蔷薇科	蔷薇属	常绿攀援灌木
藤金合欢	<i>Acacia sinuata</i>	含羞草科	金合欢属	常绿攀援藤本
悬钩子	<i>Rubus macilentus</i>	蔷薇科	悬钩子属	落叶攀援藤本
檵木	<i>Loopetalum chinense</i>	金缕梅科	檵木属	常绿小灌木
石山棕榈	<i>Trachycarpus fortunei</i>	棕榈科	棕榈属	常绿小灌木
灰白毛莓	<i>Rubus tephrodes</i>	蔷薇科	悬钩子属	落叶攀援灌木
竹叶椒	<i>Zanthoxylum armatum</i>	芸香科	花椒属	落叶刺灌木
黄荆	<i>Vitex negundo</i>	马鞭草科	牡荆属	落叶小灌木
红背山麻杆	<i>Alchornea trewioides</i>	大戟科	山麻杆属	落叶小灌木
乌莓莓	<i>Cayratia japonica</i>	葡萄科	乌莓莓属	草质攀援藤本
三裂叶葛藤	<i>Pueraria phaseoloides</i>	豆科	葛藤属	草质攀援藤本
绿叶地锦	<i>Parthenocissu laetevirens</i>	葡萄科	地锦属	草质匍匐藤本
苕麻	<i>Boehmeria longispicata</i>	荨麻科	苕麻属	半灌木
粉单竹	<i>Lingnania chungii</i>	禾亚科	单竹属	多年生草本
野菊	<i>Dendranthema jndicum</i>	菊科	菊属	多年生草本
白茅	<i>Imperata cylindrica</i>	禾本科	白茅属	多年生草本
沿阶草	<i>Ophiopogon reversus</i>	百合科	沿阶草属	多年生草本
纤毛鸭嘴草	<i>Ischacmum aristatum</i>	禾本科	鸭嘴草属	多年生草本
四季报春	<i>Primula obconica</i>	报春花科	报春花	多年生草本
华南毛蕨	<i>Cyclosorus parasiticus</i>	金星蕨科	毛蕨属	多年生草本
卷柏	<i>Selaginella tamariscina</i>	卷柏科	卷柏属	多年生草本

2.2 样品处理与分析

采集的植物和土壤样品在实验室烘干,土壤过筛—研磨,植物粉碎—过筛备用。土壤全钙采用硝酸、高氯酸消煮—盐酸溶解—硼酸溶液过滤—硝酸和氯化锶溶液定容后用原子吸收分光光度计测定吸收值。植物全钙采用浓硝酸消煮—硝酸和氯化锶溶液定容后用原子吸收分光光度计测定吸收值。

参考谢丽萍^[4]、宋永昌^[14]的研究方法,选择以下指数分析钙的吸收与迁移变化:

钙的植物吸收系数 = 植物全钙含量(g/kg)/根际土壤全钙含量(g/kg)

植物全钙含量(g/kg) = 茎全钙含量(g/kg) + 叶全钙含量(g/kg) + 根全钙含量(g/kg)

钙的转运率(%) = (地下部分钙含量—地上部分钙含量)/地下部分钙含量 × 100%

钙的返还率(%) = 枯落物全钙含量/植物全钙含量 × 100%

3 结果与讨论

3.1 岩溶峰林不同植物的全钙吸收系数差异

从图 1 看出,30 种峰林植物虽然生长于相同生境,范围不超过 100 m²,但根际土壤全钙含量差异从最小的 8.82 g/kg(白茅)到最大的 64.91 g/kg(竹叶椒),平均值为 28.05 g/kg,而同区域 0~20 cm 土壤的全钙平均含量为 20.83 g/kg,小于根际土壤平均值,有 10 种植物的根际土壤全钙含量小于 20.83 g/kg,其余 20 种植物的根际土壤全钙含量大于 20.83 g/kg,证明不同岩溶植物对富钙岩溶土壤中 Ca²⁺ 吸收程度在根系就出现了适应策略的差异,这种差异可

能与不同植物根系分泌物有关,也可能与根际微生物有关,正如王明月等^[15]研究证明石漠化地区豆科植物的根瘤菌代谢产生的酸性物质(有机酸、氨基酸)对碳酸钙和碳酸镁有降解作用,由于土壤矿物态钙占全钙含量的 40%~90%^[16],土壤中碳酸钙和碳酸镁的降解会使交换态 Ca^{2+} 流失,两种豆科植物鸡血藤与三裂叶葛藤根际土全钙含量均低于土壤全钙平均值可能与此有关。

植物全钙总量在 11.73 g/kg(白茅)~44.56 g/kg(黄连木)之间,平均值为 24.73 g/kg。植物全钙含量与土壤根际全钙含量之间是显著的正相关关系(皮尔逊相关系数为 0.454,显著度系数为 0.012)。土壤根系是植物吸收土壤钙的主要途径,按平均值计,根际钙中有 88.16%全钙被植物吸收利用。

30 种峰林植物全钙吸收系数在 0.47~2.22 之间。按照岩溶植物生活型,占岩溶峰林植物种最大比

例的攀援植物(11 种)全钙吸收系数平均值最高达 1.22,次为 6 种乔木植物,平均值为 0.96,小灌木(6 种)平均值为 0.95,草本植物(7 种)最小,平均值为 0.86。对 4 种生活型植物全钙吸收系数的单因素方差分析结果表明,它们之间并未达到显著性差异(显著性系数在 0.12~0.97 之间),这一结果和谢丽萍等^[4]在广西地区的实验结果相似,说明岩溶峰林地区主要植被类型——灌丛草坡是长期适应岩溶富钙环境而进化演替的优势群落,在该植被类型中占优势地位的攀援灌木比其他物种更适应富钙土壤与岩溶地表的土-石非均质特征。受岩溶环境地表裸露石芽影响,土壤空间有限,而攀援灌木不仅有效的利用有限的空间进行光合作用,而且其旺盛的生命力更能获取土壤中的钙,同样,在姬飞腾等^[9]的研究中,唯一的一种攀援植物乌莓无论是地上部分还是地下部分全钙含量均在 14 种供试物种中最高。

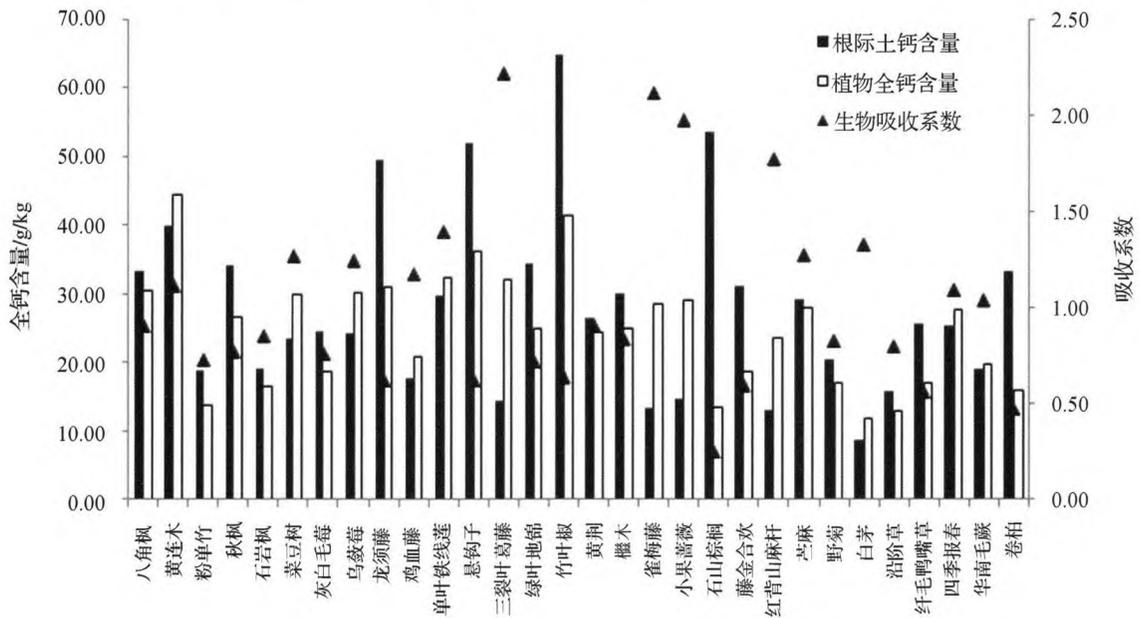


图 1 根际土与植物全钙含量及钙的生物吸收系数

Fig. 1 Total calcium content in rhizosphere soil and Ca bio-absorption coefficients

3.2 植物钙转运能力分析

从图 2 看出,30 种峰林植物全钙含量转运率差异很大,根据植物地上部分和根系钙含量的差异可分为三类:一类为地上部分钙含量大于地下部分,我们可以称之为茎叶储存型转运;有 15 种植物属于此类型,其中:乔木的秋枫、菜豆树和黄连木,草质藤本乌莓和多年生草本野菊及华南毛蕨的转运率较高;木质藤本三裂叶葛藤、藤金合欢、单叶铁线莲和小灌木

红背山麻杆、竹叶椒的转运率低于前者。这类植物根系持续不断的从土壤中吸收钙,并将钙储存于植物地上茎干部分,根是输送组织;第二类为地上部分钙含量小于地下部分钙,钙的吸收转运属于根储存型转运,包括乔木的石岩枫,藤本的鸡血藤、灰白毛莓、龙须藤、小果蔷薇、绿叶地锦,小灌木石山棕榈、黄荆,草本的粉单竹、白茅、卷柏,这类植物根系吸收钙之后并非全部转运至地上部分的茎叶中,其中一部分则以钙

化根等形式储存在根系中而成为植株的主要钙库,根不仅是输送组织也是储存组织。第三类为地上部分钙含量与根系钙含量基本平衡,表现为均衡储存型转运,包括乔木的八角枫,藤本的悬钩子、雀梅藤,小灌木檵木、苕麻,草本植物沿阶草、鸭嘴草,这些植物的各器官全钙含量相对均衡分布。再从叶片、茎干、根系全钙含量看,30种植物也差异较大,5种乔木种的叶片、茎干、根系全钙含量分别是 25.46 g/kg、22.66 g/kg 和 23.58 g/kg,钙含量:叶片>根系>茎干;17种灌木种的叶片、茎干、根系全钙含量分别是 27.45 g/kg、24.15 g/kg 和 29.86 g/kg,钙含量:根>叶片>茎干;其他草本植物种的叶片、根系全钙含量分别是 19.77 g/kg 和 16.40 g/kg,钙含量:叶片>根系,这一结果和邓艳等^[5]的钙含量:叶片>茎>根的研究结果略有差异,根据周卫等^[17]和井大炜等^[18]的研究,植物钙的长距离运输主要发生在木质部,蒸腾作用是其运输的主要动力,钙由蒸腾液流从木质部输送

至树梢、幼叶、花、果及顶端分生组织后多数变得相对稳定,几乎不发生再分配与运输。蒸腾强度越大和生长时间越长的器官,经木质部运入的 Ca^{2+} 就越多。岩溶区的乔木和灌木具有更大的叶面积和更长的生长时间,因而其地上部钙含量远大于草本植物,不同岩溶植物叶片、茎干、根系全钙含量的差异应该和叶面积指数有关。蒋廷惠等^[19]的研究也证实了植物生长组织中的钙在植物体内的再利用能力很弱,新生组织的生长必须依靠土壤中钙的持续供应,而岩溶土壤具有更强的钙供应能力,使得岩溶植物叶片中积累了更多的钙,曹建华等^[1]的研究结果也证实了这一点。30种植物的叶片、茎干、根系全钙含量有差异,说明不同植物有各自的适应策略,比如,通过对植株地上部分 Ca^{2+} 浓度的不同调节方式及控制适应高钙的环境^[9,20-21],也可以通过不同形态钙的存在方式适应高钙环境等^[1]。但它们吸收的钙含量均高于非岩溶区,证明这些植物都适应了岩溶环境。

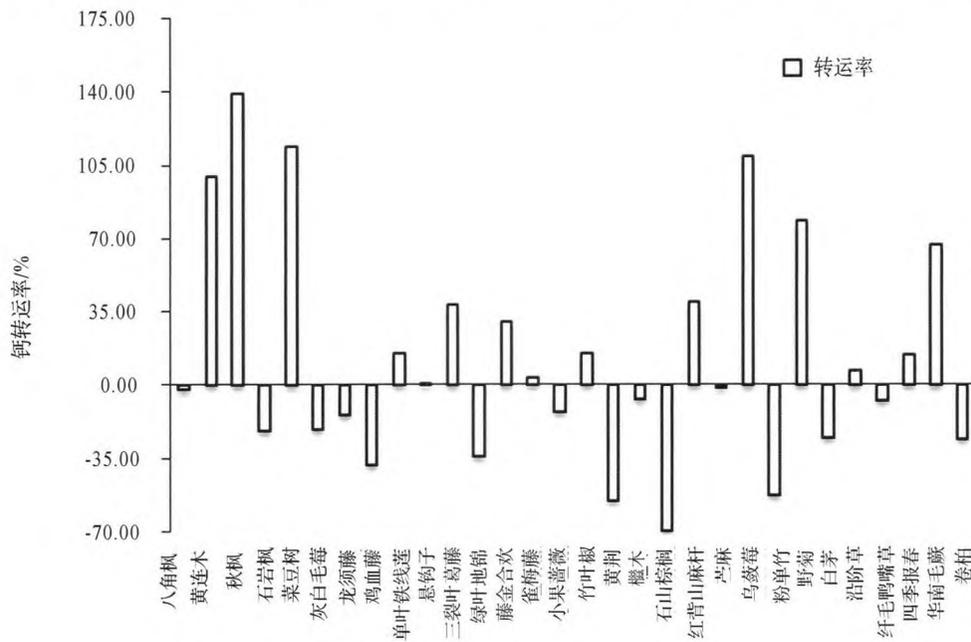


图2 岩溶峰林植物全钙含量的转运率

Fig. 2 Transfer rates of total calcium in typical karst plants

3.3 植物钙返还能力变化

根据图 3,5 种乔木种的根系、地上茎叶和枯落物中的全钙含量平均分别是 22.09 g/kg、33.11 g/kg 和 29.60 g/kg,17 种灌木种的根系、地上茎叶和枯落物中的全钙含量平均分别是 28.47 g/kg、25.55 g/kg 和 28.85 g/kg,8 种草本植物的根系、地上茎叶和枯落物中的全钙含量平均分别是 17.36 g/kg、16.45 g/kg

和 21.61 g/kg,除了草本植物野菊和沿阶草的枯落物全钙含量略高于植物生长组织中的全钙含量外,其余植物的枯落物全钙含量均低于植物生长组织中的全钙含量,说明钙元素单向迁移特征使得植物衰老器官中的钙不能返回至幼叶及茎干和根系中,只能通过枯落物返回土壤。不同生长组织全钙含量均是乔木>灌木>草本,这一结果和谢丽萍等^[4]的结果基本

一致。枯落物不仅是微生物生存的物质基础,更是生物循环和保持土壤系统健康及稳定的关键^[22],枯落物不仅影响到土壤中各种元素的有效态含量,同时也可促进碳酸盐岩的成土速率^[5]。与曹建华等研究测定的非岩溶区乔木老叶中全钙含量平均值 0.78 g/kg^[1]比较,5 种乔木枯落物全钙含量 29.60 g/kg 是非岩溶区乔木老叶全钙含量的 37.95 倍。岩溶植物枯落物钙同样具有高钙含量特征。30 种植物的钙返还率在 22.06%~103.84% 之间,悬钩子的返还率最低,野菊的返还率最高。乔木、灌木和草本植物返还率分别为 58.72%、55.90% 和 67.18%,单因子方差分析结果表明,三种生活型之间的钙返还率无显著性差异($F=0.54, Sig. = 0.59$)。由于缺少类似群落钙

循环研究的文献,只能和其他类型森林群落的钙循环系数进行比较,蒙古栎林、油松林、马尾松林、落叶松林、红松阔叶林混交林的钙循环系数分别是 57.6%、41.7%、75.9%、60.0%、73.0%^[23],粤北岩溶峰林植被乔木种的钙返还率低于马尾松林、红松阔叶林混交林和落叶松林的钙循环系数,但高于油松林和蒙古栎林。但由于其枯落物中全钙含量远高于非岩溶区,所以,返还到地表的钙含量依然远高于非岩溶区,总体而言,岩溶峰林大多数植物对土壤钙具有高吸收和高返还的特征。此外,岩溶峰林裸露或非裸露的碳酸盐岩溶蚀可以供给土壤中被植物吸收或被雨水携带走的 Ca^{2+} ,保持岩溶富钙土壤生态系统的平衡。

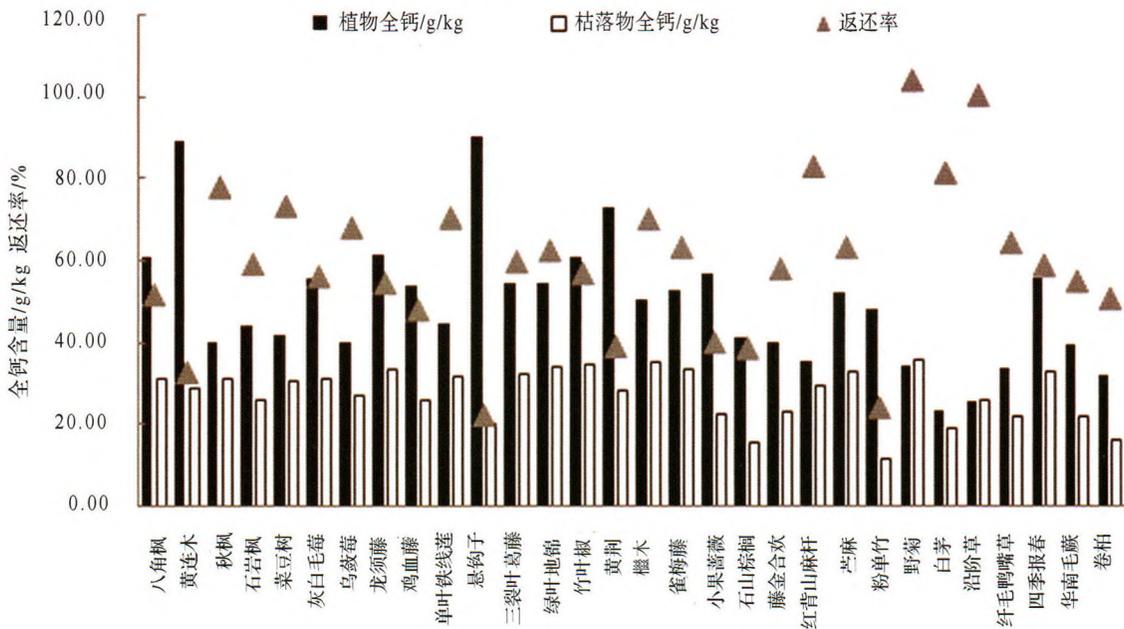


图 3 不同植物生长组织和枯落物全钙及返还率变化

Fig. 3 Total calcium in plants and litters and transfer rates of typical plants

3.4 岩溶峰林植物对富钙环境的适应性差异

从上述可以看出,峰林植物对富钙环境适应机制多样,已有的研究也采用不同指标对岩溶植物富钙环境的适应机制进行了量化分类,如屠玉麟^[7]以土壤一基质条件为指标、周运超^[8]按叶片 Ca、Mg 含量为指标、姬飞腾等^[9]根据石漠化程度及优势小灌木和草本植物植株钙含量与土壤交换性态钙含量为指标等进行的分类。这些分类使我们从不同的角度认识了岩溶植物的适应特征。分类指标选取对于准确分析植物的适应机制至关重要,多指标、少误差有助于分类

的科学化,基于上述已有分类研究结果,本文拟尝试在岩溶峰林小区域尺度下,采用根际土全钙含量、茎全钙含量、叶全钙含量、根系全钙含量及枯落物全钙含量 5 个指标,采用欧氏距离最短系数作为分类依据,对 30 种植物进行系统钙适应机制的聚类分析。这样既可以减少因基质土壤的差异造成的样本误差,又通过植物不同器官钙含量的系统指标,并增加了供试样本的种类数量,从多方面来增加分类的准确性。聚类结果见图 4,将每类植物种不同器官、枯落物及根际土全钙含量列于表 2。

表2 各类植物不同部位及根际土壤钙含量指标统计

Table 2 Statistics of calcium content of each plant part and soil under different plants (mean±SE)

指标	第一类	第二类	第三类	第四类
根系全钙含量/g/kg	36.76 ±11.81	31.69	50.34	22.55±7.82
茎全钙含量/g/kg	33.47±6.85	10.02	20.56	21.98±7.75
叶全钙含量/g/kg	44.67±11.27	9.04	27.76	24.05±6.85
枯落物全钙含量/g/kg	27.31±10.36	15.85	28.38	27.83±6.19
根际土全钙含量/g/kg	54.82±14.28	53.65	26.62	24.54±9.64
根系钙/根际土钙	0.67	0.59	1.89	0.92
枯落物钙/根际土钙	0.50	0.30	1.07	1.13
枯落物钙返还率/%	35	83	59	60

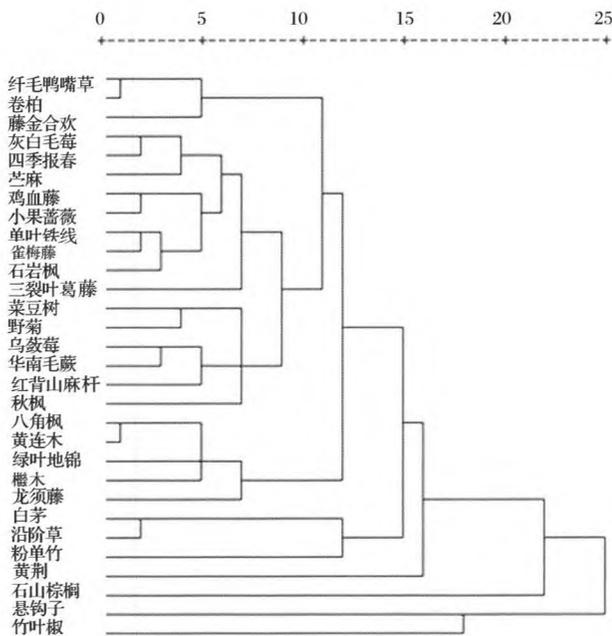


图4 植株钙含量特征的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of calcium content in plants

根据聚类分析结果,将粤北岩溶峰林地区30个植物种对富钙环境的适应机制分为4种类型:

第一类为富钙高吸收低返还型,包括悬钩子、竹叶椒2种灌木种,该类植物种根、茎、叶全钙含量高于114 g/kg,根际土钙含量较高(54.82 g/kg),地下根系对土壤中钙的吸收率为67%,吸收进入植物体后各部位(根系、茎、叶)钙含量差异不大,枯落物中全钙含量低,从茎叶到枯落物钙回归率较低(35%)。这2种植物通常分布在岩溶坡麓或峰顶平缓且岩石裸露率较高处,根系多扎深于岩石裂隙,与岩石表面密切接触,根系、叶、茎钙吸收转运能力强,但枯落物中全

钙含量远低于叶片,与钙单向运输的特征不太一致,这两种植物都是落叶小灌木,有可能在叶片衰老、枯黄、脱落过程中发生了钙转移,还需要进一步研究。

第二类为少钙低吸收高返还型,代表植物是小灌木石山棕榈,根、茎、叶全钙含量50.7 g/kg,不到第一类植物根、茎、叶全钙含量的一半,根际土中钙含量处于较高水平(53.65 g/kg),地下根系对土壤中钙的吸收率为59%,吸收进入植物体后地下根系钙含量高于茎叶及枯落物钙含量,枯落物全钙含量高于茎、叶,枯落物钙返还率高达83%。生长于峰壁陡峭土壤浅薄处的石山棕榈通常植株矮小,高度不超过1 m,而在坡麓土层较厚处生长的石山棕榈有明显的主干,高度超过3 m,其吸收钙能力低应该与茎干的组织结构有关,石山棕榈有发达的纤维组织和维管束,但木质部不发达是影响其钙向茎叶运输的主要原因,而叶片大而厚实,生长周期长,老叶中会积累较多的钙。

第三类为多钙高吸收中返还型,仅有落叶小灌木黄荆1种,根茎叶全钙含量98.7 g/kg,接近于第一类植物,但植物根系全钙含量远高于其他器官,说明其根系对土壤中钙具有明显的富集作用,根系钙是土壤钙的1.89倍,吸收进入植物体后地下根系钙含量与茎叶钙含量接近,枯落物全钙含量略高于茎、叶,枯落物钙返还率为59%。

第四类为多钙中吸收中返还型,除上述4种植物外,其余26种植物都属于此类型,植物类别涵盖乔木、灌木和草本,根、茎、叶全钙总含量为68.6 g/kg,根、茎、叶全钙含量差异不大,但植物根系对土壤中钙具有高吸收率(92%)。从茎叶到枯落物钙返还率为60%,处于中等水平。这类植物生长组织中枯落物钙

含量最高,枯落物钙与根际土钙比值在 4 类植物中最高,尽管根系钙含量是 4 类植物中最低的一类,但叶片、枯落物中的高钙含量说明钙从土壤中持续不断地运输至叶片中,又通过枯落物返还至土壤中。根系与根际土壤钙含量接近,证明大多数岩溶峰林植物适应了富钙土壤环境,尽管现在不能从钙总量上判断钙循环的数量平衡程度,但这类植物根—茎—叶—枯落物钙含量说明其吸收、转运、返还过程是相对稳定而均衡的,这对于岩溶环境生态系统的稳定和平衡至关重要。

4 结 论

(1)30 种峰林植物全钙含量与土壤根际全钙含量之间显著的相关关系,表明峰林植物适应了岩溶土壤富钙环境,但不同峰林植物的全钙吸收系数差异较大。攀援植物、乔木、小灌木和草本植物之间的平均植物全钙吸收系数尽管未达到显著性差异水平,但在岩溶峰林群落中占多数的攀援植物的钙吸收系数仍然最高,证明了攀援灌木具有更强的适应富钙环境能力,并在岩溶峰林群落中占据优势地位。

(2)不同生活型植物的叶片、茎干、根系全钙含量平均值差异较大,灌木>乔木>草本;30 种植物的叶片、茎干、根系全钙含量差异较大,总体上呈现根系全钙含量>叶片全钙含量>茎干全钙含量趋势。

(3)钙元素单向迁移特征使得岩溶峰林植物衰老器官中的钙不能返回至幼叶及茎干和根系中,只能通过枯落物使钙返回土壤并保持植物—土壤矿物养分的平衡。30 种峰林植物的钙返还率差异较大,在 22.06%~103.84%之间,草本植物全钙返还率大于乔木,乔木大于灌木。

(4)基于根际土、茎、叶、根系、枯落物全钙含量 5 个指标聚类分析,将 30 种峰林植物对富钙环境的适应机制分为富钙高吸收低返还型、少钙低吸收高返还型、多钙高吸收中返还型和多钙中吸收中返还型 4 种类型。26 种岩溶峰林植物属于多钙中吸收中返还型,它们和土壤富钙环境保持了较好的平衡和适应性。

参考文献

[1] 曹建华,朱敏洁,黄芬,等.不同地质条件下植物叶片中钙形态对比研究:以贵州茂兰为例[J].矿物岩石地球化学通报,2011,30(3):251-260.

- [2] 李小方.岩溶环境中土壤—植物系统钙元素形态分析及生态意义[D].桂林:广西师范大学,2006.
- [3] 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.
- [4] 谢丽萍,王世杰,肖德安.喀斯特小流域植被—土壤系统钙的协变关系研究[J].地球与环境,2007,35(1):26-32.
- [5] 邓艳,蒋忠诚,覃星铭,等.岩溶生态系统中不同植被枯落物对土壤理化性质的影响及岩溶效应[J].生态学报,2009,29(6):3307-3314.
- [6] 侯学煜.贵州省南部植物群落[J].植物学报,1952,1(1):65-106.
- [7] 屠玉麟.贵州喀斯特灌丛区系与生态特征分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),1995,13(3):1-8.
- [8] 周运超.贵州喀斯特植被主要营养元素含量分析[J].贵州农学院学报,1997,16(1):11-16.
- [9] 姬飞腾,李楠,邓馨.喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J].植物生态学报,2009,33(5):926-935.
- [10] 唐宇宏,潘鸿.贵州马岭河瀑布钙华藻类群落特征及生物岩溶作用[J].中国岩溶,2013,32(3):280-286.
- [11] 朱丹尼,邹胜章,周长松,等.岩溶区典型土壤对 Cd^{2+} 的吸附特性[J].中国岩溶,2015,34(4):402-409.
- [12] 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队.广东山区地貌[M].广州:广东科技出版社,1991.
- [13] 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队.广东山区植被[M].广州:广东科技出版社,1991.
- [14] 宋永昌.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2001:234-237.
- [15] 王明月,刘邵雄,熊志,等.石漠化地区豆科植物根瘤菌降解碳酸钙、镁能力研究[J].生态环境学报,2014,23(10):1581-1585.
- [16] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- [17] 周卫,林葆.苹果幼果组织钙运输途径与激素调控[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):214-219.
- [18] 井大伟,邢尚军,马丙尧,等.土壤与植物中钙营养研究进展[J].生物灾害科学,2012,35(4):447-451.
- [19] 蒋廷惠,占新华,徐阳春,等.钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义[J].应用生态学报,2005,16(5):971-976.
- [20] 印莉萍,黄勤妮,吴平.植物营养分子生物学及信号传导(第二版)[M].北京:科学出版社,2006.
- [21] 罗绪强,王程媛,杨鸿雁,等.喀斯特优势物种干旱和高钙适应性机制研究进展[J].中国农学通报,2012,28(16):1-5.
- [22] 杨吉华,张永涛,李红云,等.不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2003,17(2):141-144.
- [23] 陈灵芝,黄建辉,严昌荣.中国森林生态系统养分循环[M].北京:气象出版社,1997.

Analysis on the absorbing, transfer, restoration and adaptation mechanism of calcium in different peak forest plants in northern Guangdong Province, China

WEI Xinghu¹, LEI Li², LIU Shujuan¹, GUAN Gongcou¹

(1. Foshan University, Research Center of Ecological Civilization Construction and Sustainable Development
in the Xijiang and Beijiang River Basin, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China)

Abstract Thirty kinds of karst peak forest plants in the Shijiao village, Jiulong town, Yingde City, Guangdong Province (N24°08.113', E112°51.855', altitude, 121 m, height of hill 80 m) were selected as the object of quantitative analysis to reveal their adaptation to the karst soil environment rich in calcium. The measured variable included the total calcium content of rhizosphere soil, and root, stem, leaf and litter in different plants. The characteristics of utilization, store, and returning soil of calcium in different plants were analyzed based on the absorption coefficient, transfer rate, and return rates. In addition, adaptation mechanism for karst soil in different plants was classified based on the result of cluster analysis. The results show that, (1) The significant positive correlation between the total calcium content in plants and in rhizosphere soil shows the plants in karst peak forest have a good adaptation to karst soil. But the absorption coefficients have large differences among the different plants. The total calcium absorption coefficient of climbing plants is 1.21 times, 1.22 times, and 1.30 times of trees, small shrubs and herbs, respectively. It means the climbing plants have a better adaptability to the karst environment. (2) There are large differences of total calcium in different living types of plants in the leaf, stem, and root, of which the average total calcium content are 1.08 times, 1.07 times, 1.17 times of trees, respectively, and 1.39 times and 1.82 times of herbs in leaf and root, respectively. The total calcium content has a tendency of root > leaf > stem. (3) The litter is the main way through which calcium in plants returns to the soil. The rates of 30 kinds of karst peak forest plants are between 22.06%—103.84%, among which herbs has the biggest rate, and tree has the second, and shrubs has the smallest, which are 67.18%, 58.72%, 55.90%, respectively. (4) The results of cluster analysis based on the total calcium content of rhizosphere soil, root, stem, leaf, and litter show different adaptation ways of plants to karst soil, which are classified into four categories, abundant calcium-high absorption-low restoration, few calcium-low absorption-high restoration, more calcium-high absorption-medium restoration, and more calcium-medium absorption-medium restoration. There are 26 kinds of plants belong to the last one, implying that the most of plants in karst peak forests have a good adaptation to the karst high-calcium environment through continual absorption, steady accumulation and high-rate restoration.

Key words karst, plant, calcium, northern of Guangdong Province

(编辑 黄晨晖)