

李明松,李金玲,赵致,等. 附丹霞石栽培金钗石斛矿质元素吸收与分配研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):119-126.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.16.017

# 附丹霞石栽培金钗石斛矿质元素吸收与分配研究

李明松<sup>1,2</sup>, 李金玲<sup>1,2</sup>, 赵致<sup>1,2</sup>, 罗春丽<sup>1,2</sup>, 罗夫来<sup>1,2</sup>, 王华磊<sup>1,2</sup>, 杨继勇<sup>3</sup>, 丁刚<sup>3</sup>, 邓浪<sup>3</sup>

(1. 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省药用植物繁育与种植重点实验室, 贵州贵阳 550025;

3. 赤水市信天中药产业开发有限公司, 贵州赤水 564700)

**摘要:**为明确附丹霞石栽培金钗石斛矿质元素吸收与分配特性。本研究以附丹霞石种植 3 年与 4 年的金钗石斛为研究对象,测定金钗石斛各部位干物质总量、矿质元素含量,丹霞石养分含量及伴生苔藓矿质元素含量,探究附丹霞石种植金钗石斛对矿质营养的吸收特性。结果表明,丹霞石富含多种矿质元素,主要以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主,占丹霞石质量的 91.40%,有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量总体处于中低等水平;金钗石斛各部位对 N、K、Ca、P 具有较强的富集能力;各器官中 N、K、Ca、P、Mg、Mn、B 等 7 个元素均以叶片中含量最高,幼嫩部位对 N、P、K 等植物生长必需营养元素需求较大;金钗石斛各部位干物质总量与矿质元素总量密切相关,根、2 年生茎、3 年生茎、2 年生叶中各元素总量占植株的 75.02%~94.62%;苔藓伴生促进了金钗石斛对大部分元素的吸收,各元素含量较无苔藓伴生提高了 1.42%~199.41%。本研究初步探讨了 N、P、K 等营养元素在金钗石斛不同部位中的吸收与分配特性,以期附丹霞石种植金钗石斛质量评价及栽培管理提供科学依据。

**关键词:**金钗石斛;丹霞石;苔藓;矿质元素;吸收;分配;富集系数

**中图分类号:**S567.23+9.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)16-0119-08

金钗石斛 (*Dendrobium nobile* Lindl) 为兰科 (Orchidaceae) 石斛属 (*Dendrobium*) 多年生附生草本植物,喜温暖潮湿,在我国贵州、云南、四川、广东、广西、海南等省均有分布<sup>[1]</sup>,以干燥茎入药。金钗石斛是《中华人民共和国药典》记载的我国传统名贵中药材,气微、味苦、生物碱含量高于其他石斛品种,具有保护心血管、抗疲劳、抗衰老、抗氧化、降血脂等作用<sup>[2-3]</sup>。

贵州省赤水市的金钗石斛人工栽培具有悠久的历史,依靠得天独厚的丹霞石地质条件与高温、高湿的气候影响,逐渐成为市场原料药材的主要来源,2006 年经原中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局批准,贵州省赤水市金钗石斛成为国家地理标志产品保护品种。中药材药效品质不仅与有机成分有关,且与无机元素的种类和含量也有着密

切关系<sup>[4]</sup>。近年来,随着生物无机化学的发展,中药材与矿质元素的关系越来越引起人们的广泛关注。矿质营养元素参与植物生长发育过程与生理代谢活动,调节植物生理功能,是植物产量和品质形成的物质基础<sup>[5]</sup>。目前,关于红花<sup>[6-7]</sup>、山药<sup>[4,8]</sup>、三七<sup>[9-10]</sup>、菊花<sup>[11-12]</sup>等中药材矿质元素的吸收规律已有较多研究,而关于金钗石斛对矿质营养吸收规律的研究鲜有报道。因此,为提高附丹霞石栽培金钗石斛药材的产量和品质,不仅需要了解金钗石斛微生态环境、丹霞石的养分供应水平,还必须深入研究金钗石斛植株对矿质营养的吸收与分配特性。本研究通过调查金钗石斛微生态环境,测定丹霞石、伴生植物及金钗石斛矿质元素含量,分析丹霞石养分供应状况、金钗石斛矿质元素吸收与分配规律,及苔藓伴生对金钗石斛养分吸收的影响,以期附丹霞石种植金钗石斛质量评价及栽培管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

旺隆镇 (105°90'E, 28°52'N), 隶属于贵州省赤水市,地处赤水市中部,是赤水金钗石斛主产区之一,也是赤水金钗石斛核心区。旺隆镇地处河谷半

收稿日期:2022-12-02

基金项目:国家重点研发计划(编号:2021YFD1601001);贵州省科技支撑计划项目(编号:黔科合支撑[2019]2962号);贵州大学人才项目[编号:贵大人基合字(2018)35号]。

作者简介:李明松(1996—),男,贵州桐梓人,硕士研究生,从事药用植物栽培研究。E-mail:1796614337@qq.com。

通信作者:李金玲,博士,副教授,从事药用植物营养生理研究。

E-mail:jllil@gzu.edu.cn。

高山丘陵地带,地势东南高、西北低,属亚热带季风气候,海拔 228 ~ 1 256 m,根据赤水市气象局查询旺隆镇 2011—2021 年年平均降水量为 785.11 ~ 1 658.37 mm,年平均气温为 17.37 ~ 18.79 ℃。本研究选取旺隆镇鸭岭村金钗石斛种植基地作为采样点,鸭岭村(105°91'E,28°51'N)金钗石斛种植基地是赤水市金钗石斛集中连片种植面积最大的基地(133 余万 km<sup>2</sup>),也是赤水市金钗石斛种植最悠久的基地。

## 1.2 样品采集及处理

供试材料为种植 3、4 年的金钗石斛。于 2022 年 5 月采集金钗石斛样品,经贵州大学农学院赵致教授鉴定为金钗石斛。种植 4 年的金钗石斛样品采样步骤为:以 5 m × 5 m 划定样方,共设置 15 个样方,样方内丹霞石上附生的金钗石斛供样品采集,1 个样方选取长势基本一致的金钗石斛 10 丛,每丛金钗石斛整株取样,按部位分为根、1 年生茎、1 年生叶、2 年生茎、2 年生叶、3 年生茎、4 年生茎;丹霞石及苔藓样品:各样方内随机选取 3 个点,自丹霞石表面用地质锤凿开表层约 0.5 cm,得到块状和粉末状的丹霞石样品,去除根系和其他杂物,并采集丹霞石上的苔藓,3 个点的丹霞石和苔藓样品分别混合为 1 个样品,共 30 份样品。

苔藓伴生对金钗石斛矿质元素吸收影响的供试材料为种植 3 年的金钗石斛。采样步骤为:以 5 m × 5 m 划定样方,有、无苔藓伴生分别设置 10 个样方,1 个样方选取长势基本一致的金钗石斛 15 丛,每丛金钗石斛用剪刀分别剪掉 1 枝 1、2、3 年生假鳞茎,按部位分为 1 年生茎、1 年生叶、2 年生茎、2 年生叶、3 年生茎,各部位分别混合为 1 个样品。

样品处理:金钗石斛和苔藓样品先用自来水清洗植株表面杂质,然后用去离子水冲洗 3 遍,105 ℃ 杀青 20 min,60 ℃ 烘至恒质量,烘干样品用中药粉碎机进行粉碎,过 100 目筛后装袋,待测;丹霞石样品置于室内风干,用研钵研磨过 20、100、200 目筛后装袋,待测。

## 1.3 仪器与试剂

NexION 300D 型电感耦合等离子体质谱仪(PerkinElmer 公司,美国),ICP-OES Optima 8 000 型等离子体发射光谱仪(PerkinElmer 公司,美国),Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪(帕纳科公司,荷兰),HGK-55 全自动凯氏定氮仪(上海赫冠仪器有限公司)。钾(K/GSB04-1733—2004)、

钙(Ca/GSB04-1720—2004)、磷(P/GSB04-1741—2004)、镁(Mg/GSB04-1735—2004)、钠(Na/GSB04-1738—2004)、铁(Fe/GSB04-1726—2004)、铜(Cu/GSB04-1725—2004)、锌(Zn/GSB04-1761—2004)、锰(Mn/GSB04-1736—2004)、硼(B/GSB04-1716—2004)等各元素对照品均由国家有色金属及电子材料分析测试中心提供,所用试剂均为国产分析纯。

## 1.4 试验方法

1.4.1 丹霞石矿质元素检测 (1)用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Li(锂)、Be(铍)、Sc(钪)、V(钒)、Cr(铬)、Ni(镍)、Cu(铜)、Co(钴)、Zn(锌)、Ga(镓)、Rb(铷)、Sr(锶)、Y(钇)、Mo(钼)、Cd(镉)、In(铟)、Sb(锑)、Cs(铯)、Ba(钡)、La(镧)、Ce(铈)、Pr(镨)、Nd(钕)、Sm(钐)、Eu(铕)、Gd(钆)、Tb(铽)、Dy(镝)、Ho(钬)、Er(铒)、Tm(铥)、Yb(镱)、Lu(镥)、W(钨)、Tl(铊)、Pb(铅)、Bi(铋)、Th(钍)、U(铀)等 39 种元素含量。准确称取 50 mg 丹霞石样品置于消解罐中,加入 1 mL 氢氟酸和 0.5 mL 硝酸,将消解罐放入 185 ℃ 烘箱中加热 24 h;冷却后将消解罐置于电热板上加热至近干,再加入 0.5 mL 硝酸蒸发至干,重复操作此步骤 1 次;再次加入 5 mL 硝酸,密封,放入 130 ℃ 烘箱加热 3 h,冷却后取出消解罐,将溶液转移至塑料瓶中,用超纯水定容至 25 mL,备测。ICP-MS 仪器参数:功率为 1 400 W,冷却气流速为 13 L/min,雾化器流速为 0.9 L/min,辅助气流速为 0.8 L/min,扫描方式为跳峰,测量时间 60 s,扫描次数 3 次。(2)用 X 射线荧光光谱仪测定 Si(硅)、K(钾)、P(磷)、Ca(钙)、Al(铝)、Fe(铁)、Mg(镁)、Na(钠)、Mn(锰)、Ti(钛)等 10 种元素含量。称取 0.7 g 丹霞石样品,精确至 0.1 mg,置于 25 mL 瓷坩埚中,加入 5.2 g 无水四硼酸锂、0.4 g 氟化锂和 0.3 g 硝酸铵搅拌均匀,再加入 1 mL 溴化锂溶液,置于电热板上烘干;将坩埚置于自动火焰熔样机上,以丙烷为燃气,在 1 150 ~ 1 250 ℃ 熔融 10 ~ 15 min;将熔融物倾入至已加热至 800 ℃ 铸模中浇铸成型,取出样片在 X 射线荧光光谱仪上进行测量。X 射线荧光光谱仪测量条件:X 射线管电压为 50 kV,电流为 50 mA,粗狭缝,视野光栏直径为 30 mm。(3)用凯氏定氮仪测定氮(N)元素含量。按照 2020 年版《中华人民共和国药典》(通则 0731)中蛋白质含量测定法中的凯氏定氮法测定 N 元素含量<sup>[13]</sup>。

1.4.2 金钗石斛与苔藓矿质元素检测 N 元素含量采用凯氏定氮仪测定;K、Ca、P、Mg、Na、Al、Fe、Cu、Zn、Mn、B、Sr 等元素含量采用等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

1.4.3 丹霞石养分含量测定 土壤养分指标测定均采用常规土壤农化分析法<sup>[14]</sup>。土壤 pH 采用水浸提电位法;有机质含量测定采用重铬酸钾容量法;碱解氮含量测定采用碱解扩散法;速效磷含量测定采用 0.05 mol/L HCl-0.025 mol/L 1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法;速效钾含量测定采用醋酸铵浸提火焰光度法。

1.5 数据分析

使用 SPSS 25.0 和 Excel 2019 软件分析获得的数据。

2 结果与分析

2.1 丹霞石矿质元素及有效养分含量特征分析

2.1.1 丹霞石矿质元素含量分析 由于土壤中的矿物质来自于岩石的风化,因此土壤矿物质的化学组成与岩石的化学组成有相似之处,但也存在一定的差别。本研究测定了丹霞石中主量、微量和稀土

元素等共 50 种元素含量。由表 1 可知,丹霞石中各元素含量表现为 Si > Al > Fe > K > Na > Mg > Ti > Ca > N > Mn > P > Ba > Cr > Sr > Zn > Ce > V > Rb > La > Pb > Nd > Li > Ni > Cu > Y > Ga > Co > Th > Pr > Sc > Sm > Mo > Gd > Dy > Cs > U > W > Yb > Er > Be > Cd > Eu > Sb > Tb > Ho > Tl > Tm > Lu > Bi > In。其中,丹霞石的化学成分以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主,Si、Al、Fe 的含量分别为 807.73、79.23、27.07 g/kg,分别占丹霞石质量的 80.77%、7.92%、2.71%,三者共占 91.40%。

2.1.2 丹霞石有效养分含量分析 由丹霞石速效养分含量统计结果(表 2)可知,丹霞石 pH 值为 6.86,碱解氮、速效磷、速效钾平均含量分别为 67.14、31.12、34.57 mg/kg,而有机质在丹霞石中未检测出。根据全国第二次土壤普查养分分级标准可知,丹霞石的有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为六级、四级、二级、五级<sup>[15]</sup>。总体来看,按照土壤养分分级标准,丹霞石有效养分含量处于中低等水平。

表 1 丹霞石矿质元素含量( $\bar{x} \pm s$ )

元素	含量(g/kg)	元素	含量(mg/kg)	元素	含量(mg/kg)	元素	含量(mg/kg)	元素	含量(mg/kg)
N	1.24 ± 0.37	Zn	71.30 ± 5.09	Tb	0.52 ± 0.21	Li	21.57 ± 4.15	W	1.67 ± 0.45
P	0.64 ± 0.26	Cu	16.30 ± 1.81	Dy	2.58 ± 1.05	Be	1.10 ± 0.32	Tl	0.36 ± 0.04
K	15.30 ± 3.29	Mo	3.39 ± 1.11	Ho	0.48 ± 0.17	V	65.23 ± 18.48	Pb	26.20 ± 4.27
Ca	2.86 ± 0.21	Ni	16.90 ± 6.10	Er	1.43 ± 0.48	Co	7.79 ± 2.81	Bi	0.21 ± 0.01
Mg	11.68 ± 3.27	La	32.50 ± 11.71	Tm	0.26 ± 0.08	Ga	9.84 ± 2.02	Th	7.18 ± 1.98
Si	807.73 ± 34.27	Ce	68.37 ± 21.77	Yb	1.62 ± 0.53	Rb	49.73 ± 11.58	U	2.05 ± 0.52
Na	13.97 ± 0.99	Pr	6.60 ± 2.80	Lu	0.23 ± 0.08	Sr	73.10 ± 4.97		
Al	79.23 ± 12.42	Nd	23.70 ± 10.10	Sc	5.57 ± 2.06	In	0.03 ± 0.01		
Fe	27.07 ± 7.05	Sm	4.10 ± 1.98	Y	11.65 ± 4.11	Sb	0.58 ± 0.16		
MnO	0.93 ± 0.46	Eu	0.80 ± 0.35	Cd	0.88 ± 0.90	Cs	2.12 ± 0.54		
Ti	7.06 ± 2.68	Gd	3.38 ± 1.46	Cr	138.33 ± 25.42	Ba	359.33 ± 47.38		

表 2 丹霞石有效养分含量

pH 值	含量(mg/kg)				有机质
	碱解氮	速效磷	速效钾		
6.86 ± 0.51	67.14 ± 18.79	31.12 ± 9.62	34.57 ± 8.52	—	

注:“—”表示未检出。

2.2 伴生苔藓矿质元素含量分析

由金钗石斛伴生苔藓 12 种矿质元素含量统计结果(表 3)可知,苔藓各元素含量存在差异,表现为 N > Ca > Al > Mg > K > Na > P > Fe > Sr > Mn > B >

Cu,其中,N 与 Ca 元素在苔藓中含量较高,分别为 22.67、14.89 g/kg,Cu 元素含量最小,为 4.60 mg/kg。

2.3 金钗石斛不同部位干物质总量差异分析

由金钗石斛不同部位干物质总量及分配率(表 4)可知,金钗石斛各部位干物质总量存在差异,干物质总量表现为 2 年生茎 > 3 年生茎 > 根 > 2 年生叶 > 4 年生茎 > 1 年生叶 > 1 年生茎。2 年生茎、3 年生茎、根 3 个部位干物质总量较大,分别为 4.73、2.62、2.51 g/丛,占植株干物质总量的 74.09%。1 年生茎与 1 年叶干物质总量较小,分别为 0.39、0.42 g/丛,

表 3 苔藓矿质元素含量( $\bar{x} \pm s$ )

含量(g/kg)								含量(mg/kg)			
N	K	Ca	P	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Mn	B	Sr
22.67±2.75	1.84±0.68	14.89±4.28	1.27±0.29	2.13±0.57	1.64±0.18	3.35±0.56	1.26±0.24	4.60±1.08	50.62±11.56	11.32±6.77	55.32±10.07

表 4 金钗石斛干物质总量( $\bar{x} \pm s$ )

部位	干质量 (g/丛)	分配率 (%)
根	2.51±0.91b	20.00
1 年生茎	0.39±0.16d	2.86
2 年生茎	4.73±1.88a	34.90
3 年生茎	2.62±1.13b	19.19
4 年生茎	1.21±0.54c	9.12
1 年生叶	0.42±0.18d	3.14
2 年生叶	1.46±0.58c	10.79

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),表 5、表 7 同。

表 5 金钗石斛不同年生茎矿质元素含量( $\bar{x} \pm s$ )

年限	含量(g/kg)						含量(mg/kg)					
	N	K	Ca	P	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
1 年生茎	13.49±1.84a	25.00±1.21a	9.26±0.68a	1.54±0.11a	1.67±0.21a	1.20±0.12a	47.78±19.03b	5.76±0.53b	17.46±2.92b	52.16±5.42a	15.18±0.87a	
2 年生茎	5.84±0.60c	6.37±1.14b	7.57±0.33b	0.61±0.05b	0.84±0.04b	0.55±0.04b	67.21±6.76a	10.48±0.81a	16.17±4.54b	16.91±3.88b	11.76±0.81b	
3 年生茎	7.54±1.22b	6.08±1.18b	9.21±0.90a	0.55±0.05c	0.78±0.06b	0.45±0.06c	43.28±7.70b	6.43±1.48b	21.16±3.06a	10.79±1.79c	9.10±0.52c	
4 年生茎	5.73±0.32c	6.23±0.67b	6.92±0.98b	0.47±0.01d	0.64±0.05c	0.38±0.02c	28.19±2.52c	3.75±0.30c	17.28±1.68b	7.55±1.12d	7.21±0.18d	
变异系数(%)	38.84	74.45	12.39	54.82	41.07	50.55	29.88	37.02	10.44	81.54	27.7	

2.4.2 不同年生金钗石斛叶片矿质元素含量差异分析 由表 6 可知,金钗石斛 1 年生叶片与 2 年生叶片矿质元素含量存在差异。K 元素在叶片中含量最高,1 年生叶片与 2 年生叶片分别为 22.88、17.07 g/kg,Cu 元素含量最小,分别为 6.30、6.17 mg/kg。N、K、P、Cu 等 4 种元素含量均表现为 1 年生叶片>2 年生叶片,1 年生叶片 N、K、P、Cu 等 4 种元素含量较 2

占植株干物质总量的 6.00%。

2.4 金钗石斛矿质元素含量差异分析

2.4.1 不同年生金钗石斛茎矿质元素含量差异分析 由表 5 可知,金钗石斛不同年生茎中矿质元素含量存在差异,N、K、Ca、P、Mg、Na、Mn、B 等 8 个元素在 1 年生茎中含量最高,显著高于 2、3、4 年生茎( $P<0.05$ );Fe 和 Cu 元素在 2 年生茎中含量最高,均显著高于 1、3、4 年生茎( $P<0.05$ );Zn 元素含量以 3 年生茎最高,均显著高于 1、2、4 年生茎( $P<0.05$ )。各元素含量的变异系数为 10.44%~81.54%,其中,Mn 元素含量变异系数最大,K 元素含量次之,Zn 元素含量最小。

年生叶片高出 8.60%~34.43%;Ca、Mg、Na、Fe、Zn、Mn、B 等 7 种元素含量表现为 2 年生叶>1 年生叶,Mn 元素含量在 1 年生叶与 2 年生叶中变化幅度最大,2 年生叶 Mn 元素含量较 1 年生叶 Mn 元素含量高出 238.75%,Fe 元素含量次之,变幅为 144.98%,Zn 元素含量变幅最小,为 23.12%。

表 6 金钗石斛不同年生叶矿质元素含量( $\bar{x} \pm s$ )

年限	含量(g/kg)						含量(mg/kg)					
	N	K	Ca	P	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
1 年生叶	16.00±3.55	22.88±1.00	7.67±0.59	1.27±0.22	1.38±0.23	0.78±0.37	53.85±5.12	6.30±1.16	15.18±2.34	48.59±9.27	17.66±2.61	
2 年生叶	14.73±1.73	17.07±3.89	16.68±1.40	0.94±0.04	2.29±0.39	0.97±0.10	131.92±36.68	6.17±0.97	18.69±2.59	164.60±50.71	24.11±2.86	

2.4.3 金钗石斛不同器官矿质元素含量差异分析 由表 7 可知,金钗石斛各器官对矿质元素的吸收存在不同程度的差异,除 Zn 元素在茎和叶片间含量差异不显著外,其余元素含量在根、茎、叶间均存

在显著差异( $P<0.05$ )。金钗石斛叶片中 N、K、Ca、P、Mg、Mn、B 等 7 种元素含量最高,是其他部位的 1.23~9.90 倍;Na、Fe、Zn、Cu 等 4 种元素在根中含量最大,根中 Fe 元素含量分别是茎与叶片中的

5.21、2.47 倍,Na、Zn、Cu 等 3 种元素含量是茎与叶片中的 1.10~2.00 倍;N、Mg、Na、Fe、Zn、Mn、B 等 7 种元素在茎中含量最小,分别为 6.67、0.21、0.51 g/kg 和 54.05、17.82、15.38、10.48 mg/kg。

表 7 金钗石斛不同器官中矿质元素含量( $\bar{x}\pm s$ )

部位	含量(g/kg)						含量(mg/kg)				
	N	K	Ca	P	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B
根	9.34±0.18b	4.02±0.11c	4.79±0.12c	0.47±0.01c	1.69±0.04b	1.02±0.08a	281.55±14.83a	11.32±0.23a	23.91±1.95a	29.58±0.70b	14.10±0.18b
茎	6.67±0.15c	7.01±0.21b	8.03±0.12b	0.61±0.02b	0.21±0.00c	0.51±0.01c	54.05±2.82c	8.09±0.47b	17.82±0.37b	15.38±0.84c	10.48±0.34c
叶	15.02±0.08a	18.40±0.36a	14.62±0.56a	1.02±0.02a	2.08±0.06a	0.93±0.01b	114.09±4.83b	6.20±0.01c	17.89±0.22b	138.11±7.18a	22.64±0.40a

2.5 矿质元素在金钗石斛不同部位间的分配

由表 8 可知,各元素在根、2 年生茎、3 年生茎、2 年生叶中总量较大,分配率为 75.02%~94.62%;在 1 年生茎、4 年生茎、1 年生叶中总量较小,分配率为 5.38%~24.98%,这与各部位干物质总量变化

差异一致。N、K、Ca、P、Cu、Zn、B 等 7 种元素在 2 年生茎中总量最大,分配率为 24.44%~42.72%,Mg、Na、Fe 等 3 种元素在根中总量最大,分配率为 28.40%~50.55%,Mn 元素在 2 年生叶中总量最大,分配率为 50.87%。

表 8 金钗石斛不同部位矿质元素总量与分配率

矿质元素	含量(mg/丛)						
	根	1 年生茎	2 年生茎	3 年生茎	4 年生茎	1 年生叶	2 年生叶
N	23.46(22.24%)	5.22(4.61%)	27.68(24.44%)	19.89(17.45%)	6.89(6.26%)	6.79(5.99%)	21.54(19.01%)
K	10.08(10.24%)	9.68(8.91%)	29.66(27.26%)	15.83(14.58%)	7.45(7.13%)	9.71(8.94%)	24.96(22.94%)
Ca	12.03(11.74%)	3.58(3.19%)	35.81(31.67%)	24.13(21.29%)	8.35(7.65%)	3.25(2.90%)	24.38(21.56%)
P	1.17(14.71%)	0.60(6.89%)	2.88(33.08%)	1.44(16.52%)	0.57(6.78%)	0.54(6.19%)	1.38(15.83%)
Mg	4.24(28.40%)	0.64(4.06%)	3.96(24.89%)	2.05(12.92%)	0.77(5.00%)	0.59(3.70%)	3.34(21.03%)
Na	2.56(29.97%)	0.46(5.15%)	2.51(27.80%)	1.12(12.43%)	0.47(5.31%)	0.33(3.67%)	1.42(15.67%)

矿质元素	含量(μg/丛)						
	根	1 年生茎	2 年生茎	3 年生茎	4 年生茎	1 年生叶	2 年生叶
Fe	707.08(50.55%)	18.49(1.32%)	317.80(22.46%)	113.38(7.98%)	33.99(2.45%)	22.85(1.61%)	192.87(13.63%)
Cu	28.42(26.52%)	2.23(1.95%)	49.07(42.72%)	16.50(14.40%)	4.66(4.21%)	2.67(2.34%)	9.02(7.86%)
Zn	60.04(24.89%)	6.76(2.63%)	76.46(29.76%)	55.44(21.31%)	20.83(8.27%)	6.44(2.51%)	27.32(10.64%)
Mn	74.29(15.70%)	20.18(4.27%)	79.97(16.91%)	28.26(5.97%)	9.11(1.92%)	20.61(4.36%)	240.66(50.87%)
B	35.42(21.86%)	5.87(3.37%)	55.59(31.70%)	23.64(13.54%)	8.65(5.12%)	7.49(4.30%)	35.25(20.10%)

注:括号中数据为分配率。

2.6 金钗石斛与苔藓对矿质元素的富集能力

富集系数表示植物对某种营养元素的吸收特点,反映了特定植物中某营养元素含量与其基质中同一元素含量对比相对富集和贫化的程度<sup>[16]</sup>。富集系数<0.1 时表示强烈贫化,0.1≤富集系数<0.5 时表示相对贫化,0.5≤富集系数<1.5 时表示二者属同一水平,1.5≤富集系数≤3.0 时表示相对富集,富集系数>3.0 时表示强烈富集<sup>[17]</sup>。由表 9 可知,金钗石斛对 N、K、Ca、P 元素具有一定的富集能力,对其他元素的富集能力较低,但不同部位对各元素的富集能力有明显差异。其中,各部位对 N 元素的富集能力表现为 1 年生叶>2 年生叶>1 年

生茎>根>3 年生茎>2 年生茎>4 年生茎;对 K 元素的富集能力表现为 1 年生茎>1 年生叶>2 年生叶,其余部位对 K 元素的富集能力较差;对 Ca 元素的富集能力表现为 2 年生叶>1 年生茎>3 年生茎>1 年生叶>2 年生茎>4 年生茎>根;对 P 元素的富集能力表现为 1 年生茎>1 年生叶>2 年生叶,其余部位对 P 元素的富集能力较差。总体来看,金钗石斛幼嫩部位对元素的富集能力大于成熟部位。苔藓对 N、Ca、P 元素的富集能力较强,富集系数分别为 18.32、5.21、1.98,而对 K、Mg、Na、Fe、Cu、Mn 的富集能力较差。

表 9 金钗石斛与苔藓矿质元素的富集系数

元素	富集系数							
	根	1 年生茎	2 年生茎	3 年生茎	4 年生茎	1 年生叶	2 年生叶	苔藓
N	7.550	10.910	4.730	6.140	4.620	12.930	11.910	18.32
K	0.260	1.630	0.410	0.390	0.400	1.500	1.120	0.12
Ca	1.680	3.240	2.650	3.220	2.420	2.690	5.840	5.21
P	0.730	2.420	0.950	0.860	0.740	1.980	1.470	1.98
Mg	0.140	0.140	0.070	0.070	0.050	0.120	0.200	0.18
Na	0.070	0.090	0.040	0.030	0.030	0.060	0.070	0.12
Fe	0.010	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.005	0.05
Cu	0.694	0.353	0.637	0.386	0.237	0.386	0.379	0.28
Zn	0.335	0.245	0.227	0.297	0.242	0.213	0.262	
Mn	0.032	0.056	0.018	0.012	0.008	0.052	0.176	0.05

注：苔藓中未检测 Zn 元素。

2.7 苔藓伴生对金钗石斛养分吸收的影响

由图 1 可知,苔藓伴生对金钗石斛大部分矿质元素的吸收具有促进作用,52.73% 的元素含量为苔藓伴生明显高于无苔藓伴生,32.73% 的元素含量为苔藓伴生明显低于无苔藓伴生,二者含量差异不大的元素占 14.55%,但不同部位存在差异。其中,苔藓伴生促进了 1 年生茎(Mg、Zn、Mn、B)、2 年生茎(Mg、Cu、Zn、B)、3 年生茎(N、Mg、Fe、Cu、Zn、B)、1 年生叶(K、P、Mg、Cu、Zn、Mn、B)、2 年生叶(K、P、Mg、Fe、Cu、Zn、Mn、B)中共 29 个元素的吸收,各元素含量较无苔藓伴生提高了 1.42% ~ 199.41%。1 年生茎的 N、K、Ca、Na、Fe、Cu,2 年生茎的 N、K、Ca、Fe,3 年生茎的 K、Ca、Mn,1 年生叶中的 N、Ca、Na、Fe 与 2 年生叶中的 Ca 共 18 个元素含量较无苔藓伴生下降了 1.23% ~ 72.28%;而苔藓伴生对 1 年生茎中的 P,2 年生茎中的 P、Na、Mn,3 年生茎中的 P、Na 与 2 年生叶中的 N、Na 共 8 个元素含量影响不大。

3 讨论

矿质元素吸收和分配规律与植株干物质积累密切相关,植株养分吸收积累是产量与品质形成的基础,是合理施肥的重要依据<sup>[18]</sup>。研究表明,金钗石斛植株中矿质元素含量分布较为复杂,在各部位具有不同吸收特性,这与金钗石斛各组织器官的生长发育和对不同矿质元素的生理需求有关。茎与叶片中矿质元素含量均值大小比较,除 Cu 元素以外,其余 10 个元素(N、K、Ca、P、Mg、Na、Fe、Zn、Mn、B)均为叶片含量高于茎。叶片是作物制造同

化物的主要器官,作物的产量取决于光合生产能力和光合产物的运转和分配,N、P、K 为作物生长必需的营养元素,对作物生长发育极其重要,而 Mg、Fe 和 Mn 元素在光合作用过程中也承担着重要的作用<sup>[19]</sup>。因此,在整个生长发育阶段,这些营养元素的含量与金钗石斛产量、品质有密切的关系。金钗石斛矿质元素分配方向主要向新生器官运转,每年 3 月上旬到 4 月上旬,2 年生假鳞茎基部开始抽发新芽,常以 1 母带 1 笋/2 笋的生长发育方式来形成株丛。研究表明,N、K、Ca、P、Mg、Na、Mn、B 等 8 个元素在 1 年生茎中含量最高,均显著高于 2、3、4 年生茎( $P<0.05$ ),而 2、3、4 年生茎矿质元素含量差异不大,矿质元素含量积累趋于稳定;1 年生叶中 N、K、P、Cu 等 4 个元素含量较 2 年生叶片高出 8.60% ~ 34.43%。可见,金钗石斛幼嫩部位对 N、P、K 等植物生长必需营养元素需求较大,矿质元素逐渐向新生器官转移。不同器官中矿质元素积累量能反映该元素在植株体内的分布及其在各器官间迁移的规律<sup>[20]</sup>。在金钗石斛生长过程中,不同部位各矿质元素的总量存在差异,其中,在根、2 年生茎、3 年生茎、2 年生叶中总量较大,占植株总量的 75.02% ~ 94.62%,这与各部位干物质总量相关。金钗石斛 2 年生茎、3 年生茎与根的干物质总量分别为 4.73、2.62、2.51 g/丛,占植株干物质总量的 73.90%。因此,矿质元素的积累对金钗石斛干物质的增加具有重要的作用。

金钗石斛养分的吸收利用与所处的环境密切相关。有研究者从生物地球化学元素的角度研究道地药材,指出引起道地药材形态和品质变异的重

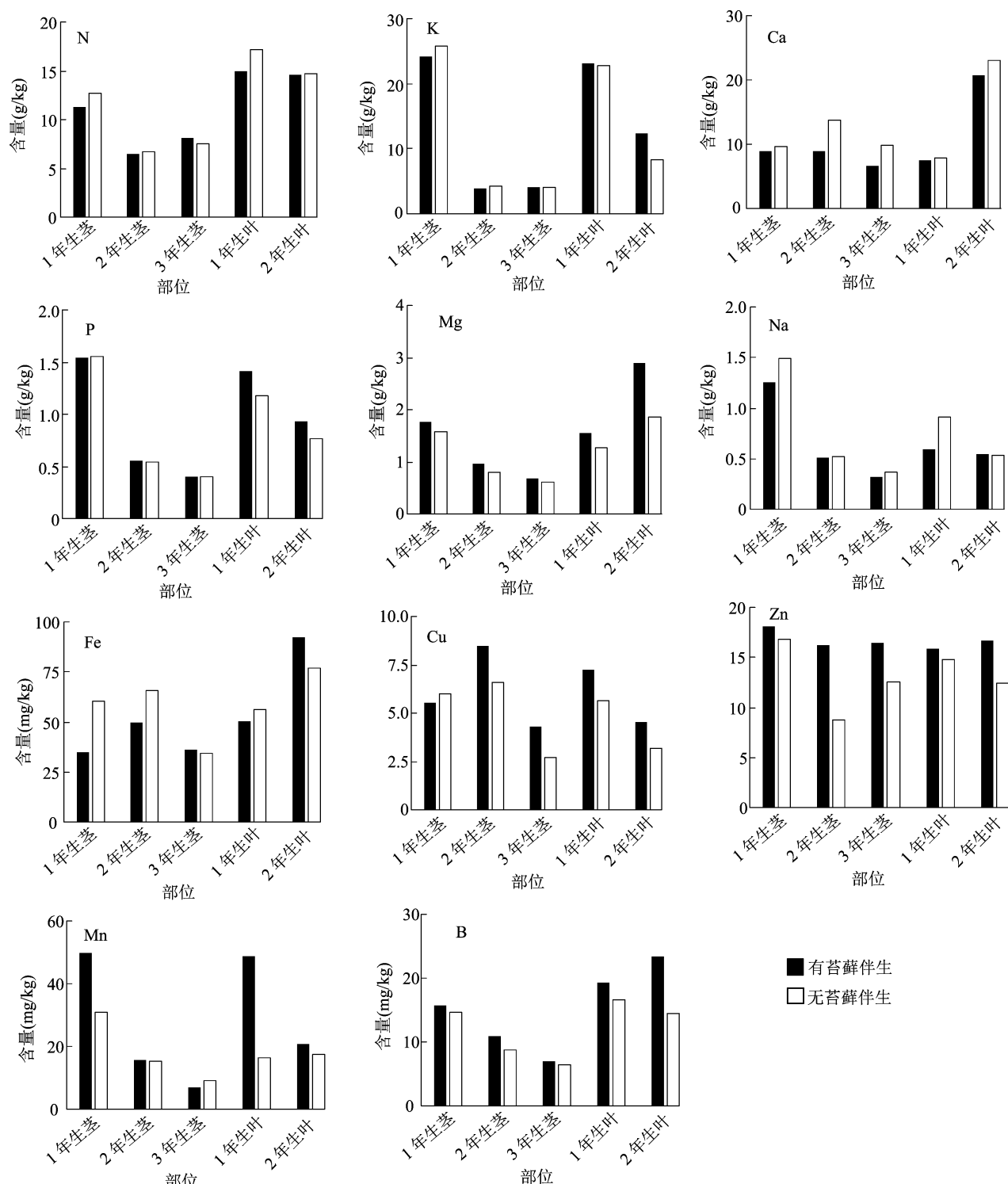


图1 有、无苔藓伴生金钗石斛中矿质元素含量比较

要因素是地质环境、土壤背景和土壤中各种元素的组成、含量及其存在形态,土壤中元素的缺少或不足都影响着道地药材的产量和品质,进而影响道地药材的药性<sup>[21-22]</sup>。丹霞石作为金钗石斛的附生基质,到目前为止还未有研究报道丹霞石与金钗石斛之间养分的供给关系,本研究通过测定丹霞石中多

种元素含量和部分元素的有效含量,结果表明,丹霞石富含多种矿质元素,主要以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为主,占丹霞石质量的 91.40%;碱解氮、速效磷、速效钾养分含量分别为 67.14、31.12、34.57 mg/kg,属于中低等土壤肥力水平,证实了丹霞石可为金钗石斛提供部分的矿质营养。通过丹霞石与金钗石斛

元素含量比值表明,金钗石斛对 N、K、Ca、P 元素具有一定的富集能力,但不同部位对各元素的富集能力有明显的差异,其中,金钗石斛幼嫩部位对元素的富集能力大于成熟部位,这可能与同化物优先供应新生器官及矿质元素从成熟部位向幼嫩部位转移有一定的关系。此外,苔藓的伴生显著提高了金钗石斛对养分的吸收利用。苔藓植物在岩面生长,其从毛细管系统吸水,可改善岩面持水性及周围环境的水湿条件,还能将尘土、枯落物等蓄积在群落之内,以及截留降雨带来的养分,有效提高岩石表面的肥力。此外,苔藓代谢分泌的酸性物质可降低岩面硬度加快溶蚀速率,形成生物微环境,为其他高等植物的殖居创造有利条件<sup>[23-26]</sup>。本研究通过比较有、无苔藓伴生对金钗石斛矿质营养吸收利用的情况,结果表明,苔藓伴生促进了金钗石斛对 52.73% 元素的吸收,各元素含量较无苔藓伴生提高了 1.42% ~ 199.41%。而 1 年生茎中的 N、K、Ca、Na、Fe、Cu,2 年生茎中的 N、K、Ca、Fe,3 年生茎中的 K、Ca、Mn,1 年生叶中的 N、Ca、Na、Fe 与 2 年生叶中的 Ca 共 18 个元素含量较无苔藓伴生下降了 1.23% ~ 72.28%,通过比较金钗石斛与苔藓对各元素的富集能力,发现苔藓对 N、Ca、Fe 元素的富集能力要明显大于金钗石斛。因此,推测在苔藓与金钗石斛的伴生过程中,苔藓会制约金钗石斛对这类元素的吸收。

目前,赤水金钗石斛附丹霞石种植以仿野生栽培为主,经过多年种植,形成了金钗石斛、丹霞石、苔藓三者和谐生长的模式。本研究初步探讨了丹霞石的养分供给,苔藓与金钗石斛矿质营养状况,以及苔藓伴生对金钗石斛养分吸收的影响,但还未能系统地阐明三者之间养分吸收与利用的关系。因此,在后续研究中应加强对丹霞石、苔藓、金钗石斛三者间养分供需关系的研究,深入探讨三者微环境形成的机制,以期对金钗石斛的矿质养分吸收利用及下一步栽培管理提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 黄志琦,钟可,韩楷,等. 不同产地金钗石斛的性状及显微特征统计研究[J]. 中草药,2020,51(8):2226-2231.
- [2] 张成宸,吴芹,石京山,等. 金钗石斛生物碱成分分析及其对 AB<sub>1-42</sub>所致 PC12 细胞凋亡的抑制作用[J]. 中国药学杂志,2021,56(13):1059-1067.
- [3] 饶丹,郑世刚,赵庭梅,等. 金钗石斛农艺性状与品质指标的相关性分析及育种应用[J]. 中国中药杂志,2021,46(13):3330-

- 3336.
- [4] 明鹤,杨太新. 不同品种山药各器官矿质元素含量及积累量的分析[J]. 中药材,2015,38(10):2048-2052.
- [5] 张静,丁博,肖国生,等. 三峡库区栽培重楼药材和土壤中营养元素的相关性分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2016,22(4):32-38.
- [6] 简在友,孟丽,许桂芳,等. 红花对土壤矿质元素的吸收和积累[J]. 广西植物,2014,34(4):557-560.
- [7] 胡喜巧,黄玲,陈红芝,等. 红花吸收矿质元素及其在器官中分配研究[J]. 土壤通报,2020,51(2):398-403.
- [8] 杨雪贞,许华森,张月萌,等. 河北省主栽山药品种矿质养分累积及矿质营养品质差异[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(9):1734-1744.
- [9] 林洁,赵致,罗春丽,等. 三七矿质营养元素的分布特征[J]. 山地农业生物学报,2020,39(2):69-74.
- [10] 欧小宏,金航,郭兰萍,等. 三七营养生理与施肥的研究现状与展望[J]. 中国中药杂志,2011,36(19):2620-2624.
- [11] 刘引,戴蒙,鲍五洲,等. 麻城不同产地菊花中矿质元素含量特征及其与土壤养分和有效成分的相关性研究[J]. 中国中药杂志,2021,46(2):281-289.
- [12] 徐扬,刘引,彭政,等. 不同种植时期对麻城菊花生长、产量及其品质的影响[J]. 中国中药杂志,2020,45(9):2057-2062.
- [13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:四部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:106.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:30-109.
- [15] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998:860-934.
- [16] 俞年军,于娇,张伟,等. ICP-MS 法测定毫菊不同部位及其土壤中微量元素[J]. 中药材,2014,37(12):2136-2139.
- [17] 严辉,段金彪,钱大玮,等. 不同产地当归药材及其土壤无机元素的关联分析与探讨[J]. 中药材,2011,34(4):512-516.
- [18] 杨苞梅,姚丽贤,李国良,等. 粉蕉矿质元素吸收积累与分配特征[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1471-1476.
- [19] 王忠. 植物生理学[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,2009.
- [20] 蒋高明,韩荣庄,孙建中. 闪电河流域 6 种农作物磷元素含量动态变化规律研究[J]. 植物生态学报,1995,19(4):329-336.
- [21] 朱梅年,曹素元,柴立,等. 名贵地道药材的生物地球化学特征及微量元素研究[J]. 微量元素,1990,7(3):35-41.
- [22] 钟霞军,谈远锋. 土壤因素对道地药材品质影响的研究进展[J]. 南方农业学报,2012,43(11):1708-1711.
- [23] 徐杰,白学良,杨持,等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报,2003,27(4):545-551.
- [24] Belnap J, Harper K T, Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: nitrogenase activity, chlorophyll content, and chlorophyll degradation[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1994,8(1):1-8.
- [25] 曹建华,袁道先. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水性及生态意义[J]. 地球化学,1999,28(3):248-256.
- [26] 张朝晖,王智慧,祝安. 黄果树喀斯特洞穴群苔藓植物岩溶的初步研究[J]. 中国岩溶,1996,15(3):224-232.