



满江红金属元素含量的种间差异 及其富集特性研究

邓素芳^{1,2}, 杨有泉^{1,2}, 应朝阳^{1,2*}

(1 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013; 2 国家红萍种质资源圃, 福州 350013)

摘 要: 为揭示满江红属(*Azolla* Lam.)植物资源材料对金属元素吸收积累特性差异, 该研究采用 ICP-MS 的方法, 对 8 种 21 个满江红品系的 12 种金属元素含量进行测定分析, 比较不同种类满江红中金属元素含量的差异及富集特性, 通过主成分分析确定满江红属品系的特征金属, 并采用聚类法对供试材料进行分类。结果表明: (1) 满江红属植物中金属元素含量变异系数大于 30% 的有 8 种, 其中 Mo 含量在品系间差异最大(127.73%), Ca 含量在品系间差异最小(18.94%)。 (2) 满江红属植物对土壤中不同金属元素的富集能力不同, 富集系数大小依次为 $Mn > Mg > Mo > K > Cd > Ca > 1$ 。 (3) 不同种满江红对金属元素 K、Mg、Mn、Zn、Mo 的富集能力存在显著差异($P < 0.05$)。 (4) 满江红的特征金属元素为 Cd、Hg、Ca、Mn、Cu、Zn、K 和 Cr。 (5) 基于特征金属元素含量的聚类结果显示, 当遗传距离为 15 时, 可将 21 份满江红资源分为 3 类, 与传统分类基本吻合, 其中品系‘3006’和‘MH3-1’对重金属 Cd、Cr 和 Hg 的富集能力较强, 聚为一类。研究认为, 满江红对金属元素的富集存在种间差异, 且这种差异可以作为满江红品种分类的参考依据。

关键词: 满江红; 金属元素; 差异; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: Q948.8; Q948.116

文献标志码: A

Study on Interspecies Differences and Enrichment Characteristics of Metal Elements in *Azolla* Lam.

DENG Sufang^{1,2}, YANG Youquan^{1,2}, YING Zhaoyang^{1,2*}

(1 Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2 National *Azolla* Germplasm Resource Nursery, Fuzhou 350013, China)

Abstract: In order to reveal the differences in the absorption and accumulation characteristics of metal elements in *Azolla* Lam., we determined and analyzed the contents of 12 metal elements in 21 strains from 8 species of *Azolla*. by ICP-MS. The differences and enrichment characteristics of metal elements in different species of *Azolla*. were compared. The characteristic metals of *Azolla*. were determined by principal component analysis, and the tested resources were classified by clustering method. The results showed that: (1) the variation coefficient of metal element contents in 8 species of *Azolla* was greater than 30%. The difference of Mo content between strains was the largest (127.73%), and the difference of Ca content between strains was the smallest (18.94%). (2) The enrichment ability of different kinds of *Azolla* to

收稿日期: 2022-07-26; 修改稿收到日期: 2023-05-05

基金项目: 福建省自然科学基金(2021J01469); 国家绿肥产业技术体系(CARS-22); 福建省农业科学院英才项目(YC2021007); 福建省农业科学院科技创新团队建设项目(CXTD2021007-3)

作者简介: 邓素芳(1982 年—), 女, 农学博士, 副研究员, 主要从事植物资源评价与利用研究。E-mail: d.sufang@163.com

* 通信作者: 应朝阳, 研究员, 主要从事草业资源与生态研究。E-mail: eagleying@21cn.com

different metal elements in soil was different, and the enrichment coefficient was $Mn > Mg > Mo > K > Cd > Ca > 1$. (3) There were significant differences in the enrichment ability of different *Azolla* to metal element K, Mg, Mn, Zn and Mo among different species ($P < 0.05$). (4) The characteristic metal elements of *Azolla* are Cd, Hg, Ca, Mn, Cu, Zn, K and Cr. (5) The clustering results based on the contents of characteristic metal elements showed that when the genetic distance was 15, the 21 *Azolla* resources could be divided into 3 groups, which was basically consistent with the traditional classification. Among them, the strains '3006' and 'MH3-1' had strong enrichment ability for heavy metals Cd, Cr and Hg, and were clustered into one category. The study suggests that there are interspecific differences in the enrichment of metal elements in *Azolla*, and this difference could be used as a reference for the classification of *Azolla* varieties.

Key words: *Azolla*; metal elements; difference; principal component analysis; cluster analysis

提到植物金属元素,人们想到更多是重金属元素,它们大多在植物生长发育过程中扮演着有害的角色,如重金属元素 Cd、Pb 会抑制植物的光合作用^[1, 2],Cd 还会影响植物体内 Fe、Mn、Zn、Ca 的吸收^[3],对大多数植物的生长发育具有抑制作用。事实上,在植物正常生长发育所必需的 17 种元素中,有 8 种是金属元素,还有一些植物生长的有益元素也是金属元素,如 Na、Al 等,它们在植物的形态建成、生长代谢的过程中也发挥着重要的作用。比如:K 能促进蛋白质的合成,提高植物的抗性^[4];Ca 能稳定膜结构,参与信号转导^[5];Mg 参与碳水化合物转化、降解以及氮代谢^[6];Zn、Mn 是许多酶促反应的活化剂,对植物体内的生化反应、代谢产物的合成具有重要作用^[7-8]。科学研究发现,大部分植物都具有吸收金属矿物元素的本领,有的吸收能力还很强,而植物对金属元素的吸收积累,不仅能反映植物与环境之间的相互关系,还能揭示植物种的特性^[9-10]。了解植物对金属元素的吸收,不仅可以利用植物探索金属矿藏^[11],指示环境污染程度^[12],还可以用于研究作物生长发育,对于制定农业技术措施、提高作物产量和品质有一定意义^[13],对资源的开发利用具有重要作用。

水生植物满江红(俗称红萍)是蕨类满江红属(*Azolla*)植物体与共生在其叶腔中的固氮蓝细菌满江红鱼腥藻(*Anabaena azollae*)组成的共生体^[14-15],繁殖速度快,适宜条件下,3~5 d 产量可翻番,在绿肥利用、饲料利用及水体净化等方面发挥了重要的作用。在满江红蕨藻共生体中,蕨藻共生,相互依存,不同类型满江红资源中共生的藻类不尽相同^[16],鱼腥藻与其宿主满江红间有着遗传上的协同对应关系,也可能因地域来源不同发生变异^[15]。前人研究认为,不同藻类对金属元素的需求量不同,金属元素可影响水体生态系统的物种分布和生物多样性

性^[17]。而金属元素在满江红的生长^[18-19]、代谢^[20-21]及固氮作用的发挥^[21-22]中也具有重要的影响,满江红对金属元素也具有较好的吸收富集特性^[23-24],研究不同种满江红金属元素含量的差异对了解满江红蕨藻共生体对金属元素的吸收积累,满江红资源的分类及选育具有重要的意义。鉴于此,本研究采用 ICP-MS 的方法,对来自 8 大种 21 份满江红资源的 12 种金属元素含量进行了测定,以期通过供试资源金属元素含量的分析明确满江红资源的特征金属,评价不同种满江红的金属富集能力,并对供试资源进行分类,为全面了解满江红资源及其开发利用奠定数据基础。

1 材料和方法

1.1 供试满江红资源

供试材料为国家红萍种质资源圃(福州)中保存的 6 个生物种及自主选育的杂交种、回交种共计 21 个满江红品系(表 1),并以同科不同属不具固氮能力的水生蕨类植物人厌槐叶萍(*Salvinia natans*)为对照,于 2018 年 7—10 月在福建建阳溪口山试验基地(E118°8',N27°19',海拔 160 m)同步扩繁所得。

1.2 供试材料培养及取样方法

供试满江红资源培养在 14 口 5 m×2 m×0.5 m(长×宽×高)水泥池中,水池中加入充分混匀的等量水稻土(约 2.4 t),加水保持水深 8~10 cm,水层用铝合金网隔成 1 m×2 m(长×宽)的小区。每个品种(系)重复培养 3 个小区,小区随机区组排列,起始放萍量 250 g·m⁻²,均匀撒播在水中培养。供试土壤为水稻土,pH 为 4.89,金属元素含量分别为:钾(K)12.80 g·kg⁻¹,钙(Ca)5.90 g·kg⁻¹,镁(Mg)1.07 g·kg⁻¹,铁(Fe)32.20 g·kg⁻¹,锰(Mn)276.00 mg·kg⁻¹,铜(Cu)38.00 mg·kg⁻¹,锌(Zn)126.00 mg·kg⁻¹,钼(Mo)1.18 mg·kg⁻¹,

表 1 供试满江红资源
Table 1 Tested *Azolla* accessions

编号 Number	种名 Species	品系 Accessions	种的特性 Specific property	编号 Number	种名 Species	品系 Accessions	种的特性 Specific property
1	蕨状满江红	‘1001’	高产、耐寒、耐盐、不耐热	12	覆瓦状满江红/三角萍	‘500’	耐热、不耐寒、易感虫
2	/细绿萍	‘1007’	High yield, cold and salt tolerance,	13	<i>Azolla imbricata</i>	‘542’	Heat resistance, not cold and pest resistance
3	<i>Azolla filiculoides</i>	‘1020’	not heat resistance	14	羽叶满江红/羽叶萍	‘7001’	较耐热、耐低湿,耐寒性较差
4	墨西哥满江红	‘2002’	较耐热、不耐寒	15	<i>Azolla pinnata</i>	‘7017’	Heat and low humidity resistance, not cold tolerance
5	/墨西哥萍	‘2007’	Heat resistance, not cold tolerance	16	回交满江红/回交萍	‘MH2’	高产、优质、耐热、耐荫、耐盐
6		‘3001’	耐热、耐寒、耐荫、抗病虫藻害	17	Backcross azolla, <i>Azolla microphylla</i> × (<i>Azolla microphylla</i> × <i>Azolla filiculoides</i>)	‘MH3-1’	High yield and quality, heat resistance, shade and salt tolerance
7	卡州满江红/卡州萍	‘3006’	Heat resistance, cold tolerance, shade tolerance, disease, pest and algae damage resistance	18		‘MH4’	
8	<i>Azolla caroliniana</i>	‘3501’		19	杂交满江红/杂交萍	‘4087’	高产、优质、耐热、耐荫、耐盐
9	小叶满江红/小叶萍	‘4018’	耐热、不耐寒	20	Hybrid azolla, <i>Azolla microphylla</i> × <i>Azolla filiculoides</i>	‘4088’	High yield and quality, heat resistance, shade and salt tolerance
10	<i>Azolla microphylla</i>	‘4021’	Heat resistance, not cold tolerance	21		‘4089’	
11		‘4058’		22	人厌槐叶苹 <i>S. natans</i>	Sn	速生、不固氮 Fast-growing, not nitrogen fixation

镉(Cd)0.05 mg·kg⁻¹, 铅(Pb)41.40 mg·kg⁻¹, 铬(Cr)91 mg·kg⁻¹, 汞(Hg)0.19 mg·kg⁻¹。每培养 20 d 测产一次, 每次测产后重新放入鲜萍 250 g·m⁻², 并施过磷酸钙 10 g·m⁻²、氯化钾 4 g·m⁻²。测产获得的鲜萍 105℃杀青 0.5 h 后于 75℃下烘干至恒重, 粉碎过筛(0.25 mm 孔径)后用于金属元素的检测。

1.3 测定内容和方法

采用微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)的方法测定萍体各金属元素(K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Cd、Pb、Cr、Hg)的含量^[25]。

1.4 数据计算与分析处理

用 Excel 2016 进行数据计算和处理, 其中元素富集系数(enrichment factor, EF)为萍体中金属元素的含量与土壤金属元素含量比值; 用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 用最小显著性差异法(LSD)进行方差分析和品系间多重比较($P < 0.05$); 用 GraphPad Prism 9.0.0 进行主成分分析(PCA); 金属元素含量数据经 SPSS 19.0 标准化后根据平方欧氏距离(Square Euclidean distance)和组间联接的方法进行聚类, 并用 Heml 1.0 软件绘制数据标准化后的热图。

2 结果与分析

2.1 满江红中金属元素的含量差异

对供试 21 份满江红资源的金属元素含量进行统计分析, 结果(表 2)表明, 满江红各资源中 Mo 元

素的含量差异最大, 变异系数达 127.73%, 平均含量是人厌槐叶苹的 6.7 倍, 其中含量最高的资源是‘1001’, 最低的资源是‘1020’, 它们都属于蕨状满江红, Mo 元素却相差 33.08 倍。其次是 Pb 含量的差异, 变异系数达 70.08%, 最高和最低的资源分别为‘4018’和‘4021’, 均属于小叶满江红, 它们的 Pb 含量相差 9.32 倍。可见, 不同种各品系间的金属元素含量也具有显著差异。此外, 各资源中 Cr、Mn 和 Fe 含量的变异系数均大于 50%。含量变异系数大于 30% 以上的金属元素有 8 种, 占 66.67%。各供试满江红资源的 12 种金属元素含量高低为: K>Ca>Mg>Mn>Fe>Zn>Cr>Cu>Pb>Mo>Cd>Hg。

2.2 满江红植物对金属元素的富集特性

本试验用富集系数(EF)来反映萍体对金属元素富集程度的高低或富集能力的强弱, 富集系数在一定程度上反映着土壤-植物系统中元素迁移的难易程度, 富集系数越大表明植物对该元素的富集能力越强, 越容易从土壤中吸收该元素^[26]。由图 1 可知, 供试满江红属植物对土壤中不同金属元素的富集能力不同, 富集系数表现出 Mn>Mg>Mo>K>Cd>Ca>1 的规律。不同品系对这 6 种金属元素的富集能力也不同, 其中‘3501’对 Mn 元素的富集能力在供试资源中最强, ‘4058’对 Mg 的富集能力最强, ‘542’对 Mo 的富集能力最强, ‘4018’对 K 的富集能力最强, ‘3006’对 Ca 和 Cd 的富集能力最强。重金属元素中, 满江红资源对 Cd 的富集能力较强, 对 Pb、Cr 和 Hg 的富集能力均较弱, 因此栽培过程

表 2 供试资源各金属元素含量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of the contents of metal elements in the tested accessions

指标 Index	最小值 Min	含量最少的品系 The strain with the least amount	最大值 Max	含量最多的品系 The strain with the most amount	满江红平均含量 Average content in <i>Azolla</i> (Mean±SD, <i>n</i> = 36)	变异系数 Coefficient of variation /%	槐叶苹平均含量 Average content in <i>S. natans</i> (Mean±SD, <i>n</i> = 3)
K/(g·kg ⁻¹)	26.19	‘7001’	66.20	‘4018’	37.01±7.47	20.20	34.52±2.74
Ca/(g·kg ⁻¹)	5.98	‘4021’	16.99	‘3006’	8.24±1.56	18.94	7.41±1.41
Mg/(g·kg ⁻¹)	2.73	‘4087’	7.76	‘4088’	4.75±1.04	21.81	4.52±0.46
Fe/(g·kg ⁻¹)	0.54	‘2007’	4.92	‘2002’	1.69±0.87	51.11	2.34±0.34
Mn/(g·kg ⁻¹)	0.62	‘500’	5.55	‘3006’	2.08±1.12	54.13	1.71±0.12
Cu/(mg·kg ⁻¹)	2.91	‘3501’	17.04	‘3006’	8.94±3.29	36.79	17.89±1.55
Zn/(mg·kg ⁻¹)	50.02	‘2002’	169.49	‘4018’	92.02±24.28	26.38	95.48±18.97
Mo/(mg·kg ⁻¹)	0.78	‘1020’	26.58	‘1001’	3.62±4.62	127.73	0.54±0.17
Cd/(μg·kg ⁻¹)	33.88	‘4021’	218.06	‘3006’	85.73±32.27	37.64	145.48±13.76
Pb/(mg·kg ⁻¹)	1.69	‘4021’	17.44	‘4018’	3.62±2.54	70.08	5.63±1.26
Cr/(mg·kg ⁻¹)	1.71	‘7017’	36.78	‘3001’	10.00±6.60	65.94	10.21±1.37
Hg/(μg·kg ⁻¹)	0.92	‘3001’	27.33	‘3006’	10.83±4.59	42.40	14.58±4.52

表 3 不同种满江红金属元素富集系数的方差分析

Table 3 Variance analysis of enrichment factor of metal elements in different varieties of *Azolla*

种 Species	富集系数 Enrichment factor											
	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	Cd	Pb	Cr	Hg
蕨状满江红 <i>A. filiculoides</i>	2.78ab	1.30a	4.46abc	0.05a	8.13ab	0.23a	0.65a	3.63bc	1.54a	0.08a	0.12a	0.06a
墨西哥满江红 <i>A. mexicana</i>	2.50a	1.29a	4.65bc	0.07a	7.52ab	0.22a	0.63a	2.12b	1.65a	0.07a	0.08a	0.06a
卡州满江红 <i>A. caroliniana</i>	3.19bc	1.49a	4.70bc	0.06a	9.93b	0.20a	0.68ab	1.99b	1.74a	0.11a	0.12a	0.06a
小叶满江红 <i>A. microphylla</i>	3.34c	1.36a	5.15c	0.04a	7.36ab	0.21a	0.85b	2.35b	1.80a	0.10a	0.11a	0.05a
覆瓦状满江红 <i>A. imbricata</i>	2.52a	1.41a	4.27abc	0.05a	7.11ab	0.22a	0.76ab	6.13c	1.51a	0.08a	0.11a	0.06a
杂交满江红 Hybrid azolla	3.19bc	1.44a	4.05ab	0.05a	6.96ab	0.26a	0.71ab	3.21b	1.79a	0.07a	0.10a	0.06a
羽叶满江红 <i>A. pinnata</i>	2.51a	1.55a	3.58a	0.04a	4.99a	0.29a	0.70ab	2.24b	1.52a	0.08a	0.10a	0.05a
回交满江红 Backcross azolla	2.57a	1.37a	4.41abc	0.06a	7.59ab	0.27a	0.83b	3.47bc	2.02a	0.10a	0.11a	0.07a
人厌槐叶苹 <i>S. natans</i>	2.44a	1.26a	4.22abc	0.08a	6.26ab	0.47b	0.76ab	0.46a	2.91b	0.14a	0.11a	0.08a

注:同列不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)

Note: Different normal letter after the data indicate the significant difference at 0.05 level

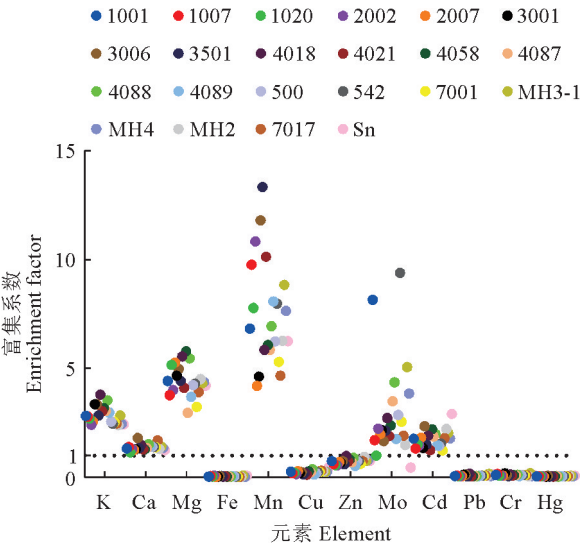
中要注意防控 Cd 的污染。

方差分析(表 3)结果表明,不同种满江红对金属元素 K、Mg、Mn、Zn、Mo 的富集能力存在显著差异。其中小叶满江红对 K 的富集显著高于除卡州满江红和杂交满江红以外的满江红($P<0.05$),对 Mg 的富集显著高于杂交满江红和羽叶满江红($P<0.05$),对 Zn 的富集能力显著高于蕨状满江红和墨西哥满江红($P<0.05$);卡州满江红对 Mn 的富集显著高于羽叶满江红($P<0.05$);覆瓦状满江红对 Mo 的富集显著高于其他满江红资源($P<0.05$)。

此外,所有供试满江红对 Mo 的富集都显著高于人厌槐叶苹($P<0.05$)。

2.3 满江红金属元素含量的相关性分析

对 12 个金属元素变量进行相关分析,获得 12 个变量之间的相关系数矩阵(图 2),相关系数 ≥ 0.3 ($P<0.05$)占 30.3%。相关性分析表明,萍体 Cd 含量与其他金属元素的含量相关性最强,相关系数 ≥ 0.3 ($P<0.05$)占 63.6%;其次是 Ca 和 Hg,与其他金属元素显著相关的占 54.5%和 45.5%;Mo 与其他金属元素的相关性最差,与其他金属元素均未达到



图中数据为 3 次重复的平均值

图 1 供试资源材料金属元素富集系数

The data in the figure are the average of three replicates

Fig. 1 The enrichment factor of metal elements in tested accessions

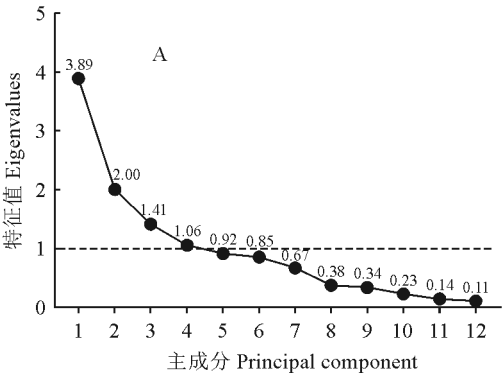


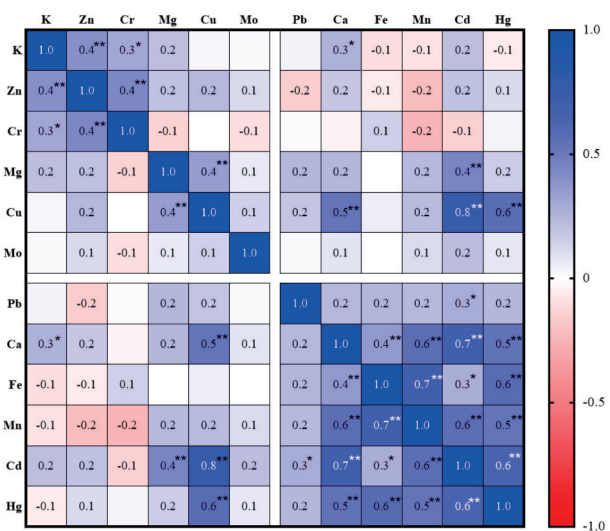
图 3 各因子特征值及方差贡献率

Fig. 3 Eigenvalues and variance contribution rate of each factor

显著相关($P<0.05$)。其中,K、Zn、Cr 3 个变量互为显著正相关($P<0.05$);Ca、Fe、Mn、Cd、Hg 5 个变量之间,除了 Fe 和 Cd 为显著正相关($P<0.05$),其余元素均互为极显著正相关($P<0.01$);Mg 的含量与 Cd 的含量呈极显著正相关($P<0.01$),Cu 与 Mg、Ca、Cd、Hg 的含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

2.4 主成分分析

经 PCA 分析,特征值大于 1 的成分有 4 个(图 3,A),这 4 个成分累积的方差贡献率达 69.70%(图 3,B)。主成分分析得出的双标图(图 4)中,不同颜色的圆点代表不同取样时间测得的金属元素含量在 PCA 分析中的得分,可以看出,在第 1 主成分(PC1)这个水平方向上,可以较好地地区分不同取样时间下

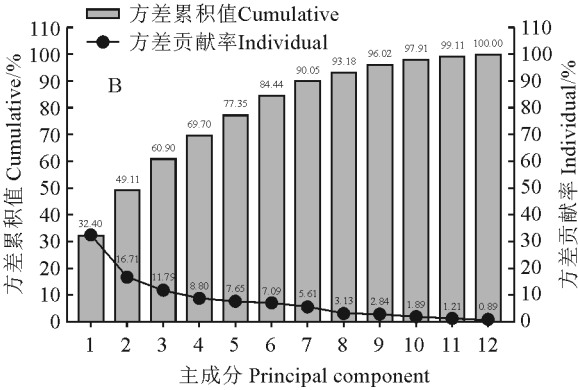


* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

图 2 满江红金属元素含量的相关系数矩阵

Asterisks indicate $P<0.05$, double asterisks indicate $P<0.01$

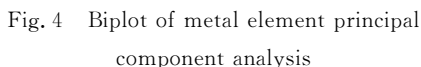
Fig. 2 Correlation coefficient matrix of metallic element contents in *Azolla*



的金属含量。图 4 中各箭头的方向和长短表示对应变量与主成分的相关性,即相应元素的含量在主成分中所起的作用和重要程度不同,长度越长,相对影响越大。经主成分分析得到的载荷及得分结果(图 3,B,图 4)表明,PC1 的方差贡献率达 32.40%,且与 Cd、Ca、Hg、Mn、Cu 呈显著正相关,PC2 的方差贡献率为 16.71%,与 Zn、K 呈显著负相关,PC3 的方差贡献率为 11.79%,与 Cr 呈显著正相关。由于总方差的 60.90%来自前 3 个主因子,故可以认为 Cd、Ca、Hg、Mn、Cu、Zn、K 和 Cr 是满江红萍体的特征金属元素。

2.5 聚类分析

从图 5 可以看出,利用 8 个特征金属元素进行



本研究中,满江红对金属元素 Mn、Mg、Mo 和 K 表现出较强的富集能力,且不同种满江红的富集能力有显著差异。满江红是蕨藻共生体,它的生长离不开叶腔内的固氮蓝藻,满江红的光合作用和固氮蓝藻的固氮过程都需要金属元素的参与。金属元素 Mg 是维持叶绿体结构的重要元素,并直接参与光合作用^[6],Mo 是固氮酶的成份,通过影响固氮酶活性而直接参与固氮过程^[22,28],Mn 可以促进固氮作用^[29],这可能是满江红对金属元素 Mn、Mg 和 Mo 富集的主要原因。研究认为,满江红中固氮酶的活性与其 Mo 元素的含量有极显著的相关性^[28]。本研究中,覆瓦状满江红对 Mo 的富集显著高于其他满江红资源,与其固氮能力高于其他满江红资源^[30]有关。供试满江红资源对 Mo 的富集均显著高于不固氮的人厌槐叶苹,也间接证实了 Mo 的富集与固氮能力的相关性。植物对 K 的吸收具有显著的种间差异,并具有遗传性^[31],在满江红中亦是如此。刘中柱等^[32]研究认为满江红品系间富钾、持钾能力差异大,本研究结果也证实这一点。研究认为,三髫亚属各生物种 K 的含量高于九髫亚属^[33],本研究也证实来自三髫亚属的小叶满江红、卡州满江红和杂交满江红的富钾能力显著高于九髫亚属的覆瓦状满江红和羽叶满江红。综上所述,满江红对金属元素的富集差异与品种特性有关。此外,已有研究表明,满江红可以富集有害重金属 Hg^[34]、Cr^[35]、Pb^[23] 和 Cd^[36],起到净化污染水体的作用,但本研究发现满江红资源对 Pb、Cr 和 Hg 的富集能力均较弱,对 Cd 的富集能力较强,可能与供试土壤

pH 低,Cd 的有效性高^[37]有关。满江红对 Cd 的高富集能力也为水稻红萍共生可减少谷物 Cd 含量^[38]提供佐证,但同时也提示满江红栽培过程中要注意防控 Cd 的污染风险,防止二次利用污染。

3.2 满江红金属元素间具有交互作用,且以协同为主

研究认为植物对金属元素的吸收积累,除与环境中金属元素的水平有关以外,还与各种元素之间的作用(如拮抗作用和协同作用等)有关^[27]。本研究的相关性分析也表明,萍体不同元素之间具有交互作用,且更多的是协同作用。Cd 作为重金属元素,不是植物生长必需元素,对大多数植物具有不同程度的毒性,研究表明高浓度的 Cd 处理导致满江红鱼腥藻共生体氮代谢的紊乱,最终造成氮素积累量的下降^[21]。许多研究认为,Cd 影响植物体内的 Fe、Mn、Zn、Ca 的吸收^[3],抑制光合作用影响植物生长^[1]。但在本研究中,相关性分析表明,萍体 Cd 含量与 Cu、Ca、Mn、Hg、Mg、Pb、Fe 的含量均具有显著正相关,一方面说明萍体 Cd 的来源与其他相关金属元素的来源极有可能相同,另一方面也说明萍体 Cd 与这些金属元素在植物代谢和营养元素运输过程中可能存在协同作用,它们的吸收积累具有同一性。目前,已有报道指出,稻米中 Cd 与 Fe、Pb 含量显著正相关^[39],而水稻秸秆中 Cd 含量与秸秆中 Zn 和 Cu 的吸收积累具有显著的协同效应^[40]。可见,植物 Cd 与其他元素的相互作用,并非都是拮抗。但对于它们在萍体间的协同作用,还需要进一步试验验证。

Ca 是离子运输的媒介,能增加原生质结构的稳定性,把被吸收的离子束缚成更稳定的形态,能影响细胞表面障碍渗透性的选择能力,能促进对离子累积有重要作用的线粒体的形成^[41]。本试验中,萍体 Ca 与其他金属元素的相关性也较强,表现出了 Ca 对 K、Cu、Fe、Mn、Cd、Hg 等多种元素具有协同作用,符合 Ca“万能”作用的特性^[42]。

Mo 是固氮蓝藻生长和参与固氮酶催化活性中心结构必需且关键性的金属元素^[22],对满江红生产

性能的发挥具有重要的作用。研究表明,许多植物体内的 Mo 与 Cu、Mn、Fe 等多种金属元素存在互作关系^[43]。本试验中,萍体中 Mo 与 Cu、Mn 含量虽然也存在正相关关系,但未达显著性水平,与魏幼璋在东德细满江红中的研究结果一致^[28]。Fe 也是固氮酶中钼铁蛋白的主要成分,许多研究认为 Mo 与 Fe 存在互作关系,且多为拮抗关系^[43],但本试验中 Mo 与 Fe 的相关性较差,推测可能与供试土壤中 Fe 的供应水平有关^[44]。

3.3 满江红特征金属元素的含量可作为品种分类的参考依据

植物不同品种由于其生长基因的差异,造成其从外界吸收累积到体内的元素在种类和含量上的差异,这种规律可以作为鉴别和分类一些植物品种的依据^[45-46]。朱庆平等根据 5 种金属元素将来自 6 个不同国家引种栽培的 15 个油橄榄品种分成 5 类,并认为金属元素含量的聚类分析与引种来源有一定的关系^[47]。而韦熹苑等利用 22 种金属元素进行主成分分析和聚类分析,将 45 份来自不同产地的广西金樱根炮制品分为 3 类^[48]。本研究通过主成分分析筛选出满江红的特征金属元素,并利用 8 种特征金属元素对 21 份满江红资源及其近缘种人灰槐叶苹进行聚类,结果很好地区分了满江红及槐叶苹,且将供试满江红资源分为了 3 类,为满江红的分类提供方法学参考。与传统分类学相比较,经特征金属元素的聚类结果与传统分类学分类存在一致性,如品系‘500’和‘542’在传统分类学都属于覆瓦状满江红,它们金属元素的遗传距离最近;‘4087’是小叶满江红和蕨状满江红的杂交后代,与同为蕨状满江红的‘1001’遗传距离经聚类分析也很近,符合其亲缘关系;而‘MH4’是小叶满江红和蕨状满江红的杂交后代,再以小叶满江红为母本的回交后代,它的特征金属元素聚类与蕨状满江红‘1001’、小叶满江红‘4087’分在同一类,也与其亲缘关系近相对应。可见,满江红特征金属元素的含量可在传统分类基础上,作为满江红品种分类的参考依据。

参考文献:

[1] 孙光闻,朱祝军,方学智,等. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 700-703.
SUN G W, ZHU Z J, FANG X Z, et al. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(5): 700-703.

[2] DRAZKIEWICZ M. Chlorophyllase: Occurrence, functions, mechanism of action, effects of external and internal factors [J]. *Photosynthetica*, 1994, 30(3): 321-331.
[3] 杨明杰,林咸永,杨肖娥. Cd 对不同种类植物生长和养分积累的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(1): 89-94.
YANG M J, LIN X Y, YANG X E. Impact of Cd on growth and nutrient accumulation of different plant species[J]. *Chi-*

- nese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(1): 89-94.
- [4] 刘晓燕,何 萍,金继运. 钾在植物抗病性中的作用及机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(3): 445-450.
LIU X Y, HE P, JIN J Y. Advances in effect of potassium nutrition on plant disease resistance and its mechanism[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, **12**(3): 445-450.
- [5] 章文华,陈亚华,刘友良. 钙在植物细胞盐胁迫信号转导中的作用[J]. 植物生理学通讯, 2000, **36**(2): 146-153.
ZHANG W H, CHEN Y H, LIU Y L. The role of calcium in signal transduction of salt stress in plant cells[J]. *Plant Physiology Communications*, 2000, **36**(2): 146-153.
- [6] 汪 洪,褚天铎. 植物镁素营养的研究进展[J]. 植物学通报, 1999, **34**(3): 245-250.
WANG H, CHU T D. The progress of study on magnesium nutrition in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, **34**(3): 245-250.
- [7] VALLEE B L, AULD D S. Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins[J]. *Biochemistry*, 1990, **29**(24): 5 647-5 659.
- [8] 许文博,邵新庆,王宇通,等. 锰对植物的生理作用及锰中毒的研究进展[J]. 草原与草坪, 2011, **31**(3): 5-14.
XU W B, SHAO X Q, WANG Y T, *et al.* Research progress in physiological function of Manganese and Manganese poisoning in plants[J]. *Grassland and Turf*, 2011, **31**(3): 5-14.
- [9] 金文芬,方 晰,唐志娟. 3 种园林植物对土壤重金属的吸收富集特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, **29**(3): 21-25.
JIN W F, FANG X, TANG Z J. Absorption and accumulation characteristics of 3 ornamental plants to soil heavy metals[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2009, **29**(3): 21-25.
- [10] 余国营,张晓华,梁小民,等. 滇池水-植物系统金属元素的分布特征和相关性研究[J]. 水生生物学报, 2000, **24**(2): 172-177.
YU G Y, ZHANG X H, LIANG X M, *et al.* Biogeochemical characteristics of metal elements in water-plant system of Lake Dianchi[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(2): 172-177.
- [11] 马荣全. 利用植物探索金属矿藏[J]. 云南林业, 1993, **14**(6): 23.
MA R Q. Using plants to explore metal deposits[J]. *Yunnan Forestry*, 1993, **14**(6): 23.
- [12] 陈肖鹏,张朝晖. 贵州木油厂汞矿区 4 种藓类植物及其基质中重金属元素分析[J]. 西北植物学报, 2009, **29**(12): 2 535-2 541.
CHEN X P, ZHANG Z H. Contents of heavy metal elements in four mosses and their substrates from muyouchang mercury mine, Guizhou Province, China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, **29**(12): 2 535-2 541.
- [13] 黄 阔,张永强. 有益金属元素对作物生长的影响[J]. 植物医生, 2020, **33**(1): 12-14.
HUANG K, ZHANG Y Q. Effects of beneficial metal elements on crop growth[J]. *Plant Doctor*, 2020, **33**(1): 12-14.
- [14] 徐云路,白克智,于赛玲,等. 满江红叶腔腔液氮化合物成分及其与蕨-藻共生的关系[J]. 植物学报, 1983, **25**(1): 82-86.
XU Y L, BAI K Z, YU S L, *et al.* Nitrogenous compounds of the leaf cavity liquid of azolla in relation to the symbiosis of azolea and anabaena azoleae[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1983, **25**(1): 82-86.
- [15] 陈 坚,郑伟文,徐国忠,等. 满江红鱼腥藻与其宿主的遗传多样性和协同性的 RAPD 分析[J]. 遗传, 2002, **24**(1): 45-49.
CHEN J, ZHENG W W, XU G Z, *et al.* The genetic diversity and homology of *Anabaena azollae* and its host plant (*Azolla*) based on rapd analysis[J]. *Hereditas* (Beijing), 2002, **24**(1): 45-49.
- [16] PRATTE B S, THIEL T. Comparative genomic insights into culturable symbiotic cyanobacteria from the water fern *Azolla*[J]. *Microbial Genomics*, 2021, **7**(6): 595.
- [17] 邱保胜,刘树文,戴国政. 藻类利用微量金属元素的研究技术与方法[J]. 水生生物学报, 2009, **33**(2): 330-337.
QIU B S, LIU S W, DAI G Z. Methods and techniques for studying the utilization of trace metals by algae[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(2): 330-337.
- [18] 汤健民,温永煌,熊卫真. 缺素对红萍生长、固氮作用及无机成分含量的影响[J]. 土壤学报, 1984, **21**(2): 217-220.
TANG J M, WEN Y H, XIONG W Z. Influence of deficiency of ten elements on the growth of *Azolla imbricata* (Roxb.) nakai, nitrogen fixation and content of inorganic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, **21**(2): 217-220.
- [19] 翁伯琦. 无机元素营养和增长素对红萍生长及其固氮活性的影响[J]. 福建农业科技, 1983, (5): 30-32.
WENG B Q. Effects of inorganic element nutrition and growth factor on growth and nitrogen fixation activity of *Azolla*[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 1983, (5): 30-32.
- [20] 戴灵鹏,熊治廷,董新姣,等. 满江红花青素在镉胁迫下的抗氧化作用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 2 089-2 094.
DAI L P, XIONG Z T, DONG X J, *et al.* Antioxidant properties of anthocyanins in *Azolla imbricata* under cadmium stress[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 2 089-2 094.
- [21] 戴灵鹏,熊治廷,马海虎. 镉对满江红(*Azolla imbricata*)-鱼腥藻(*Anabaena azollae*)共生体氮代谢的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(3): 1 629-1 635.
DAI L P, XIONG Z T, MA H H. Effects of cadmium on nitrogen metabolism in *Azolla imbricata*-*Anabaena azollae* symbiosis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(3): 1 629-1 635.
- [22] 陈 因,方大惟. 光在钼影响蓝藻固氮中的作用[J]. 植物生理学通讯, 1984, **20**(5): 28-32.
CHEN Y, FANG D W. The role of light in the effect of molybdenum on nitrogen fixation of cyanobacteria[J]. *Plant Physiology Communications*, 1984, **20**(5): 28-32.
- [23] SARALEGUI A B, WILLSON V, CARACCILO N, *et al.* Macrophyte biomass productivity for heavy metal adsorption[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **289**: 112 398.
- [24] POLECHOŃSKA L, SZCZĘŚNIAK E, KLINK A. Comparative analysis of trace and macro-element bioaccumulation in four free-floating macrophytes in area contaminated by copper smelter [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2022, **24**(3): 324-333.
- [25] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268—2016[S]食品安全国家标准 食品中多元素的

测定. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[26] 秦玉燕, 时鹏涛, 於艳萍, 等. 四种金花茶组植物叶片金属元素含量及富集特性研究[J]. 广西植物, 2016, **36**(12): 1 416-1 421.

QIN Y Y, SHI P T, YU Y P, *et al.* Enrichment characteristics of metal elements in leaves from four species of yellow flower *Camellia*[J]. *Guihaia*, 2016, **36**(12): 1 416-1 421.

[27] 孔令韶. 植物对金属元素的吸收积累及忍耐、变异[J]. 环境科学, 1983, **4**(1): 65-69.

KONG L S. Absorption, accumulation, tolerance and variation of metal elements in plants[J]. *Environmental Science*, 1983, **4**(1): 65-69.

[28] 魏幼璋, 杨玉爱, 孙 羲. 满江红的微量元素与固氮酶活性[J]. 土壤学报, 1985, **22**(2): 136-143.

WEI Y Z, YANG Y A, SUN X. Micronutrients and activity of nitrogenase in azolla[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1985, **22**(2): 136-143.

[29] PURCELL L C, KING C A, BALL R A. Soybean cultivar differences in ureides and the relationship to drought tolerant nitrogen fixation and Manganese nutrition[J]. *Crop Science*, 2000, **40**(4): 1 062-1 070.

[30] 俞林火. 满江红不同品种(系)生物学特性的研究[J]. 浙江农业科学, 1987, **28**(6): 272-276.

YU L H. Study on biological characteristics of different varieties (lines) of Manjianghong[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1987, **28**(6): 272-276.

[31] 赵淑清, 郭剑波. 植物钾营养性状的遗传潜力[J]. 西北植物学报, 2001, **21**(2): 221-225.

ZHAO S Q, GUO J B. The genetic potentiality of plant potassium nutrition[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, **21**(2): 221-225.

[32] 刘中柱, 魏文雄, 郑国璋, 等. 红萍富钾生理的研究 I. 红萍对水体中钾的吸收[J]. 中国农业科学, 1982, **15**(4): 82-87.

LIU C C, WEI W S, ZHIN G C, *et al.* Study on the potassium enriching physiology of azolla[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1982, **15**(4): 82-87.

[33] 水茂兴, 毛美飞, 陈德富, 等. 满江红 8 个生物种的矿质营养特性与培养基的研究[J]. 浙江农业学报, 1996, **8**(6): 343-347.

SHUI M X, MAO M F, CHEN D F, *et al.* Studies on mineral nutrient characteristics and culture medium of 8 azolla species[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1996, **8**(6): 343-347.

[34] R BENNICELLI. The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals [Hg(II), Cr(III), Cr(VI)] from municipal waste water[J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(1): 141-146.

[35] ARORA A, SAXENA S, SHARMA D K. Tolerance and phytoaccumulation of Chromium by three *Azolla* species[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2006, **22**(2): 97-100.

[36] CAI-YUN, TAN. Phytoaccumulation of cadmium through *Azolla* from aqueous solution[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(11): 1 942-1 946.

[37] 刘 莉, 钱琼秋. 影响作物对镉吸收的因素分析及土壤镉污染的防治对策[J]. 浙江农业学报, 2005, **17**(2): 111-116.

LIU L, QIAN Q Q. Analysis of affecting factors of cadmium uptake by crops and control countermeasures of cadmium pollution of soils[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, **17**(2): 111-116.

[38] LIU C, GUO B, LI H, *et al.* *Azolla* incorporation under flooding reduces grain cadmium accumulation by decreasing soil redox potential[J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 6 325.

[39] 程旺大, 张国平, 姚海根, 等. 晚梗稻籽粒中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, **32**(4): 573-579.

CHENG W D, ZHANG G P, YAO H G, *et al.* Genotypic and environmental variation and their stability of As, Cr, Cd, Ni and Pb concentrations in the grains of *Japonica* rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, **32**(4): 573-579.

[40] 杨云帆. 水稻镉镉过程中镉与微量元素的变化研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.

[41] FAGERIA N K. Ionic interactions in rice plants from dilute solutions[J]. *Plant and Soil*, 1983, **70**(3): 309-316.

[42] 张德山, 何文寿. 植物营养元素之间的相互关系及其机理[J]. 农业科学研究, 1993, **14**(2): 75-81.

ZHANG D S, HE W S. Interrelationship between plant-nutrient elements and it's mechanism[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 1993, **14**(2): 75-81.

[43] 刘 鹏. 钼胁迫对植物的影响及钼与其他元素相互作用的研究进展[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(3): 276-278.

LIU P. Effects of stress of molybdenum on plants and interaction between molybdenum and other elements[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, **21**(3): 276-278.

[44] WARINGTON K. The influence of high concentrations of ammonium and sodium molybdates on flax, soybean and peas grown in nutrient solutions containing deficient or excess iron[J]. *Annals of Applied Biology*, 1955, **43**(4): 709-719.

[45] WANG H W, LIU Y Q. Evaluation of trace and toxic element concentrations in *Paris polyphylla* from China with empirical and chemometric approaches[J]. *Food Chemistry*, 2010, **121**(3): 887-892.

[46] KARA D. Evaluation of trace metal concentrations in some herbs and herbal teas by principal component analysis[J]. *Food Chemistry*, 2009, **114**(1): 347-354.

[47] 朱庆平, 周 力, 李 开, 等. 西昌引种栽培油橄榄果中 5 种金属元素主成分及聚类分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, **36**(1): 362-369.

ZHU Q P, ZHOU L, LI K, *et al.* Principal component and cluster analysis of 5 metal elements in fruits of olive cultivars introduced to Xichang[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, **36**(1): 362-369.

[48] 韦嘉苑, 邓 琦, 舒 柯, 等. ICP-MS 法测定广西金樱根及炮制品中 22 种金属元素[J]. 广西植物, 2021, **41**(7): 1 209-1 218.

WEI X Y, DENG Q, SHU K, *et al.* Determination of 22 metal elements in the roots of *Rosa laevigata* and its processed products from different habitats of Guangxi by ICP-MS[J]. *Guihaia*, 2021, **41**(7): 1 209-1 218.