

张梓良,王雅洁,石磊.华中农业大学校园被子植物叶片离子组学研究[J].华中农业大学学报,2023,42(6):138-146.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.06.017

## 华中农业大学校园被子植物叶片离子组学研究

张梓良,王雅洁,石磊

华中农业大学作物遗传改良全国重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心,武汉 430070

**摘要** 为明确被子植物的离子组及其与植物种类的关系,以及不同科被子植物叶片离子组组成的差异与联系,本研究对《狮山兰芷》中收录的华中农业大学校园种植的被子植物进行系统分类,从中筛选出102种被子植物,测定叶片中氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、硼(B)、钼(Mo)和镍(Ni)等13种矿质元素的浓度,建立这些植物离子组指纹图谱并分析这些植物的离子组成分及其与植物种类的关系。结果显示,叶片中N、K和Ca 3种元素含量最高,P、Mg和S其次,微量元素含量最低。其中,豆目植物叶片N含量较高,石竹目植物叶片中P和K含量较高,7种微量元素含量在这102种被子植物叶片中也表现出较显著的差异。相关性分析显示,每种元素都至少与其他4种矿质营养元素存在显著相关性,其中Ca分别与Mg和B、N、P和K三者之间都存在极显著的正相关,Zn与Ca、Mg、P和Mn之间存在极显著的负相关。主成分分析显示,同一科植物的叶片离子组相似,不同科植物叶片离子组不同。聚类分析结果显示,Ca、N、K、S、Mg、P这6种矿质元素在不同科植物离子组的变异中具有较大的贡献率。以上结果表明,被子植物的系统发育与叶片离子组相互关联,同一科的植物叶片离子组表现出高度的相似性,我们或许能通过植物叶片离子组对植物进行种类鉴定。

**关键词** 被子植物;离子组;系统分类;狮子山;华中农业大学校园

**中图分类号** S184 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)06-0138-09

植物体内所有矿质营养元素组成的总和被称为植物离子组<sup>[1-2]</sup>。高等植物至少需要14种必需的矿质营养元素和几种有益的矿质营养元素,缺乏任何一种矿质营养元素均会抑制植物的生长发育和农作物产量的建成<sup>[3-4]</sup>。植物体内的离子组并不单纯是由一个个元素汇集而成的,而是元素间彼此协调的离子稳态网络,离子组的元素也不是单独发挥作用,而是彼此组合相互关联在相关组织和器官发挥作用<sup>[5]</sup>。植物体内存在着营养元素共转运过程,通过这种转运,一种元素的最佳供应将导致其他元素的吸收增加,并形成一种整体和谐的生理状态。

离子组学是指所有围绕和服务于离子组的研究的总称,是利用现代高通量元素分析手段,结合生物信息学和功能基因组学等技术,分析植物体内各种离子的含量、分布、转运及代谢规律的一门科学<sup>[6]</sup>。植物离子组学的核心内容是研究植物体内元素的组成及其相互作用<sup>[7]</sup>,进而可以对调节离子组的基因和

基因网络进行功能分析<sup>[8-9]</sup>。

植物离子组受基因组组成和外界环境共同调控。植物生长的环境直接或间接地对其离子组产生深远的影响<sup>[10]</sup>。除了土壤固有的矿质元素失衡,土壤pH值对矿物质养分的植物有效性和一个地区的植物种类有重要影响,例如碱性和钙质土壤P、Fe、Zn、Mn和Cu的植物有效性较低;酸性土壤P、Mo、Mg、Ca和K的植物有效性较低,但Al和Mn的有效性较高<sup>[10-11]</sup>。此外,影响土壤结构或土壤含水量的因素,如干旱、淹水或低温,也会间接影响植物对矿质养分的可利用性<sup>[12-13]</sup>。干旱和低温都能降低土壤的有效养分含量,抑制植物的正常生长<sup>[14-16]</sup>。这些胁迫对叶片离子的影响复杂<sup>[17]</sup>。

相较于外界环境,基因组在离子组学中起着更为主要的作用。植物在感知外界胁迫后,调节特定转录因子,然后激活多个转运体,来转运和分配从其周围获得的营养<sup>[18]</sup>。除此之外,植物离子组的改变

收稿日期:2023-10-12

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2023YFD1700204)

张梓良,E-mail:zhangziliang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:石磊,E-mail:leish@mail.hzau.edu.cn

还与代谢组、蛋白质组和转录组息息相关,但它们归根结底受基因组的调节,是基因组对环境效应做出的反应<sup>[19]</sup>。一般来说,生长在相同环境下的同一科植物叶片离子组相似,而不同科或目的植物叶片离子组可能不同<sup>[20-21]</sup>。

华中农业大学姚家玲教授主编的《狮山兰芷》<sup>[22]</sup>收录了本校校园的蕨类植物、裸子植物和被子植物300余种,其中,被子植物278种。我们选取校园内常见的102种植物,利用ICP-OES测定这些植物生长旺盛期叶片的离子组,建立这些植物离子组指纹图谱;分析这些植物的离子组成分及其与植物种类的关系,以明确不同科植物叶片离子组组成的差异与联系以及生长环境对叶片离子组成分的影响,旨在为笔者所在学校校园文化建设提供素材,并为我国植物离子组研究提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

《狮山兰芷》对华中农业大学校园内的常见植物进行了初步分类,本研究根据这些植物分布地点和生长习性挑选常见102种被子植物,在生长旺盛期采集植株下部绿色展开叶片5~6片。将叶片装入牛皮纸袋中,于烘箱中105℃杀青30 min,65℃烘干至恒质量。最后用磨样机磨碎为粉末,后续进行矿质元素的测定。

### 1.2 叶片氮、磷浓度测定

称取0.070 0 g植物干样粉末,倒入50 mL消化管中,加1滴超纯水润湿样品,使用移液管吸取5 mL浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(分析纯)缓缓加入到消化管中。盖上保鲜膜,于通风橱中放置8 h后,在消化炉中120℃消化,20 min后滴加8滴30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,约20 min消化液中无气泡后,再滴加8滴30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,重复此操作直到消化液澄清透明后取出,放置冷却,超纯水定容到50 mL。使用中速定量滤纸过滤消化液于10 mL离心管中。使用磷酸铵和磷酸二氢钾标准溶液分别配制氮(N)和磷(P)标准曲线。使用流动分析仪先测定标准曲线后再测定样品消化液中氮(N)和磷(P)浓度<sup>[23]</sup>。

### 1.3 植株11种矿质元素浓度测定

称取0.100 0 g植物干样粉末,倒入50 mL消化管中,加1滴超纯水润湿样品,使用移液管吸取5 mL 58% HNO<sub>3</sub>(优级纯)缓缓加入到消化管中。盖上保鲜膜,于通风橱中放置8 h后,在消化炉中120℃消化,约16~24 h,消化液澄清并透明后取出,放置冷

却,超纯水定容到50 mL。使用中速定量滤纸过滤消化液于10 mL离心管中。利用钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、硼(B)、钼(Mo)和镍(Ni)等标准溶液分别配制这些元素的标准曲线。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)先测定这些元素的标准曲线,后测定样品消化液中这些元素的浓度<sup>[24]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

使用GraphPad Prism8.0中的皮埃尔相关分析评价被子植物叶片离子组元素间的相关性,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。使用SPSS18中的单因素方差分析评价不同采样地点土壤全量矿质养分离子含量的差异,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。通过聚类分析(HCA)和主成分分析(PCA)对被子植物叶片离子组特征进行聚类分析,数据经Z-score标准化处理后进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 华中农业大学校园内被子植物的系统分类

根据《狮山兰芷》提供的植物分布信息,在华中农业大学校园内共采集了102种被子植物成熟期叶片。对采集的被子植物依据APG III系统进行分类,102种被子植物共分成25个目、44个科(图1)。总体上,华中农业大学校园内被子植物中蔷薇目植物最多(图1)。

### 2.2 华中农业大学校园被子植物生长土壤的矿质养分离子含量

本研究采集的102种被子植物主要分布在狮山绿道(A)、狮山广场(B)、南湖边(C)、樱花大道(D)和苗圃基地(E)等5个区域。5个区域的土壤均为黄棕壤,总体上土壤样品全量必需矿质养分差异不大(表1)。

### 2.3 华中农业大学校园内被子植物叶片离子含量的分析

将102种被子植物叶片13种矿质元素含量制成热图(图2和图3)。结果显示102种被子植物叶片中N、K和Ca 3种元素含量最高,P、Mg和S其次,微量元素含量最低。其中白车轴草、多花紫藤、野豌豆和紫荆这4种豆目的植物叶片N含量较高。愉悦蓼、石竹和商陆这3种石竹目的植物叶片中P和K含量较高。天门冬目的石蒜和鸢尾以及禾本目的刚竹、黑麦草、水稻和小麦叶片中Ca和Mg显著低于其他植物。十字花目的油菜叶片中S含量显著高于其他植



图1 华中农业大学校园内102种被子植物遗传发育树状图

Fig.1 Phylogenetic tree of 102 angiosperm species at the campus of Huazhong Agricultural University

表1 华中农业大学校园部分被子植物生长地点土壤矿质养分含量

Table 1 Soil total mineral nutrients concentration of some angiosperms grown at the campus

of Huazhong Agricultural University

mg/kg

矿质养分 Mineral nutrient	采样地点 Sampling site				
	A	B	C	D	E
N	2 813±90ab	2 915±96b	2 637±76a	2 706±57a	2 831±48ab
P	1 273±53a	1 251±27a	1 197±38a	1 178±63a	1 283±49a
K	1 623±87a	1 609±46a	1 648±37a	1 635±73a	1 676±56a
Ca	3 123±39a	2 975±67a	2 917±39a	3 037±62a	2 953±91a
Mg	2 109±36a	2 130±67a	2 077±26a	2 151±39a	2 163±76a
S	318±13a	339±29a	326±27a	311±61a	325±38a
Fe	2 723±86ab	2 805±96b	2 516±56a	2 706±57a	2 631±53ab
Mn	583±27a	591±38a	604±71a	567±39a	598±43a
Cu	22.6±9a	23.6±4a	32.6±5b	27.6±8b	29.6±3b
Zn	74.2±13a	84.2±17a	79.2±23a	83.2±16a	88.2±9a
B	47.8±16a	43.8±17a	49.8±9a	42.8±8a	41.8±7a
Mo	2.1±1a	4.1±1.2b	3.2±1.3ab	4.2±1.5b	3.4±2ab
Ni	26.9±8a	24.9±13a	27.9±10a	30.1±6a	23.2±15a

注:同列数据后不同小写字母表示采样地点间存在显著差异( $P<0.05$ )。Note:Different lower case letters after data in the same column indicate significant differences between sampling sites( $P<0.05$ ).

物(图2)。樟目的山胡椒和冬青目的枸骨叶片中Fe含量低于其他植物。樟目的山胡椒、冬青目的枸骨和毛茛目的十大功劳叶片中Mn含量高于其他植物。菊目的旋覆草叶片中Cu含量低于其他植物。壳斗目的板栗和化香树叶片中Zn含量显著低于其他植物。毛茛目的南天竹、蔷薇目的桑和唇形目的蓝花草叶片中B的含量显著高于其他植物。冬青目的枸骨和冬

青叶片中的Mo和Ni含量低于其他植物(图3)。

### 2.4 华中农业大学校园内被子植物叶片离子间的相关性

对102种被子植物叶片13种矿质元素含量进行相关性分析。结果显示,每种元素都至少与其他4种矿质营养元素存在显著相关性,其中Ca和Mg之间、Ca和B之间以及N、P和K三者之间都存在极显著的



图2 华中农业大学校园内被子植物叶片离子组的热图

Fig.2 Heatmaps of ionomics in the leaves of angiosperms at the campus of Huazhong Agricultural University

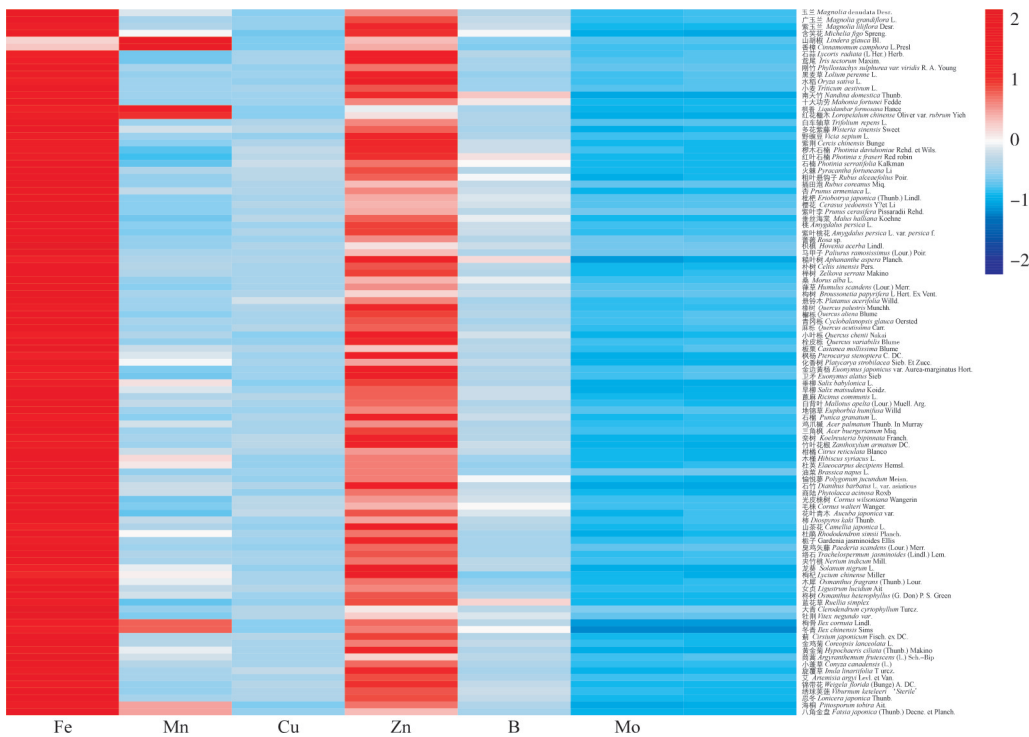


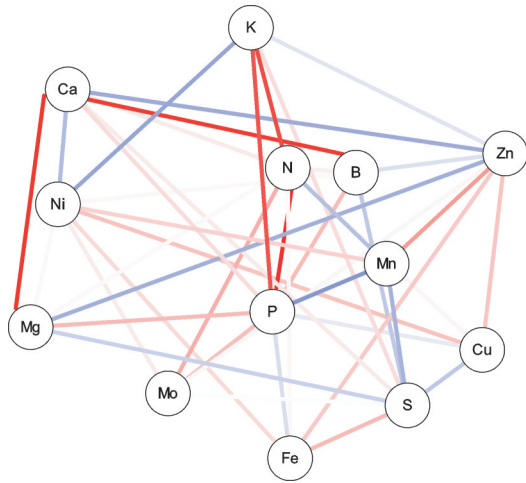
图3 华中农业大学校园内被子植物叶片微量元素含量的热图

Fig.3 Heatmap of microelements contentation in the angiosperm leaves of Huazhong Agricultural University

正相关,Zn与Ca、Mg和P以及Mg和Mn之间存在极显著的负相关(图4)。这表明这些被子植物叶片中的矿质营养元素并不是单独存在,它们通过彼此协同或拮抗在植物体内形成了离子互作网络。

### 2.5 华中农业大学校园内被子植物叶片离子组的特征

对102种被子植物按科进行叶片离子组主成分分析(PCA)。在90%的置信区间,不同科的植物出



图中红色线条代表正相关,蓝色线条表示负相关。颜色越深表示2个元素的相关性越显著。The red lines in the figure represent a positive correlation and the blue lines represent a negative correlation between each two mineral nutrients. The darker the color, the more significant it is.

图4 华中农业大学校园内被子植物叶片矿质营养元素离子的相关性图

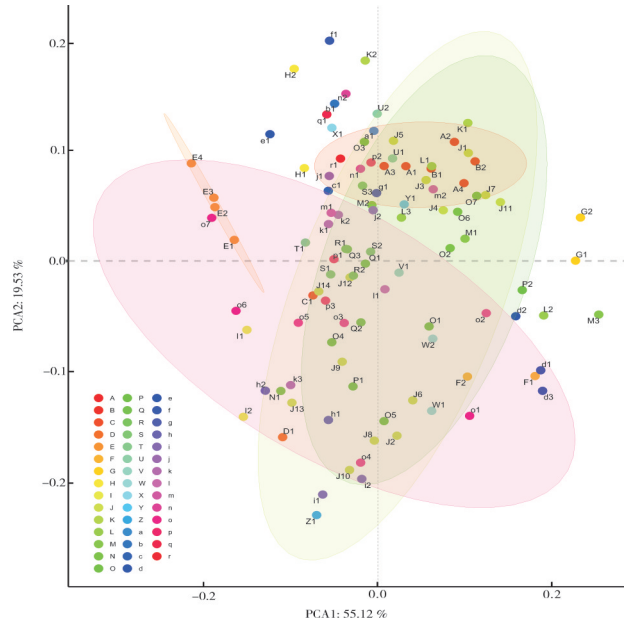
Fig. 4 Correlations among the mineral nutrients in the leaves of agniosperm species at the campus of Huazhong Agricultural University

现明显分离,且同一科的大部分植物未出现明显分离(图5),这表明同一科的植物其离子组组成相似,不同科的植物离子组存在差异。

对本研究所有科植物叶片矿质离子含量进行聚类分析(图6),结果显示,被子植物叶片离子组中的离子分成了3个簇,一是Ca、N和K,它们在植物叶片中的含量最高,同时不同科之间表现出较为显著的差异;二是S、Mg和P,这3种元素在植物叶片中含量较高,不同科之间也表现出较显著的差异;三是微量元素B、Cu、Ni、Mo、Mn、Zn和Fe,这些元素在植物中的含量低,不同科之间无显著差异。不同科的被子植物叶片离子组中Ca、N、K、S、Mg和P这6种元素都表现出了显著的差异,表明它们对不同科植物离子组的变异贡献是最大的。其中,不同科之间Ca的差异是最大的,而N的差异是最小的。

2.6 华中农业大学校园被子植物基于叶片离子组的聚类分析

基于叶片离子组必需矿质元素含量对华中农业大学校园102种被子植物进行聚类分析,并制成扇形聚类图(图7),结果显示基于叶片离子组的聚类结果与传统分类图(图1)有较大的重叠,同一科的植物大都相聚较近。



图中的大小写字母代表不同的科,数字代表科内植物品种的数量。A:木兰科;B:樟科;C:石蒜科;D:鸢尾科;E:禾本科;F:小檗科;G:金缕梅科;H:蝶形花科;I:豆科;J:蔷薇科;K:鼠李科;L:榆科;M:桑科;N:悬铃木科;O:壳斗科;P:胡桃科;Q:卫矛科;R:杨柳科;S:大戟科;T:石榴科;U:槭树科;V:无患子科;W:芸香科;X:锦葵科;Y:杜英科;Z:十字花科;a:蓼科;b:石竹科;c:商陆科;d:山茱萸科;e:柿科;f:山茶科;g:杜鹃花科;h:茜草科;i:夹竹桃科;j:茄科;k:木犀科;l:爵床科;m:马鞭草科;n:冬青科;o:菊科;p:忍冬科;q:海桐花科;r:五加科。同一颜色椭圆形中不同植物叶片离子组相似。Upper and lower case letters represent different families and numbers represent the number of species within the families .A: Magnoliaceae; B: Lauraceae; C: Lycoris radiata division; D: Irides; E: Gramineae; F: Berberidaceae; G: Hamamelidaceae; H: Papilionaceae; I: Leguminous; J: Rosaceae; K: Rhamnaceae; L: Ulmaceae; M: Moraceae; N: Platanaceae; O: Fagaceae; P: Juglandaceae; Q: Celastraceae; R: Salicaceae; S: Euphorbiaceae; T: Punicaceae; U: Aceraceae; V: Sapindaceae; W: Rutaceae; X: Malvaceae; Y: Elaeocarpaceae; Z: Cruciferae; a: Polygonaceae; b: Caryophyllaceae; c: Phytolaccaceae; d: Cornaceae; e: Ebenaceae; f: Theaceae; g: Ericaceae; h: Rubiaceae; i: Apocynaceae; j: Solanaceae; k: Oleaceae; l: Acanthaceae; m: Verbenaceae; n: Aquifoliaceae; o: Compositae; p: Caprifoliaceae; q: Pittosporaceae; r: Araliaceae. The ion components in the leaves of the plants in the same color ellipse are similar.

图5 华中农业大学校园内被子植物叶片离子组的主成分分析(PCA)

Fig. 5 Principal component analysis(PCA) of leaf ionome of families of angiosperms at the campus of Huazhong Agricultural University

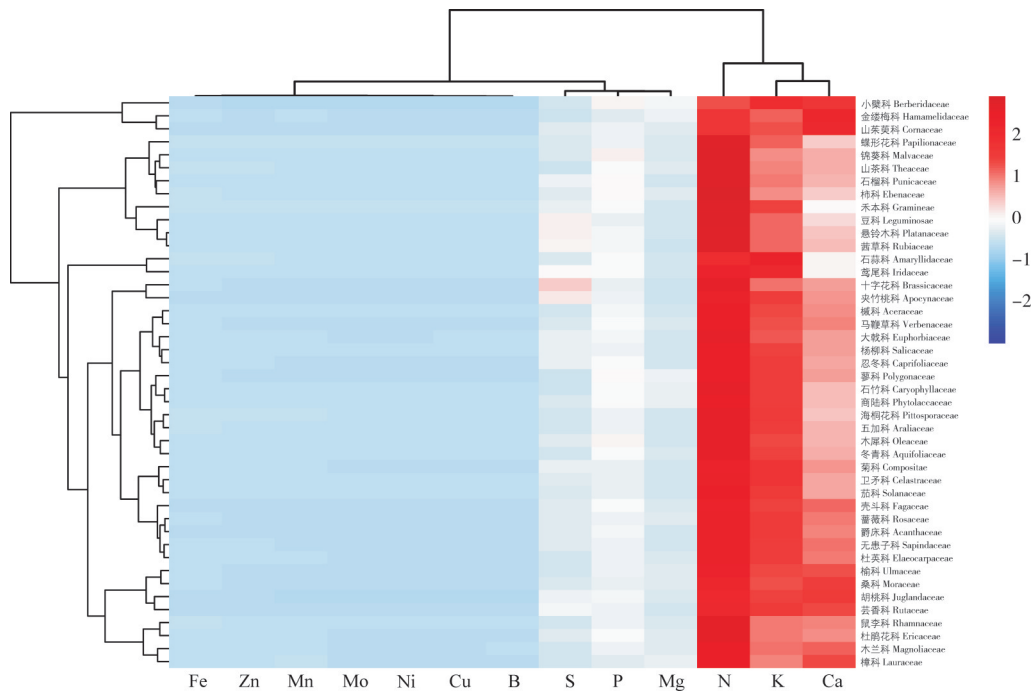


图 6 华中农业大学校园内被子植物叶片离子组的聚类热图

Fig.6 Cluster heatmaps of ionomics in leaves of angiosperms at the campus of Huazhong Agricultural University



图 7 华中农业大学校园内被子植物基于叶片离子组的聚类图

Fig.7 Clustering analysis based on the leaf ionome of angiosperms at the campus of Huazhong Agricultural University

### 3 讨论

本研究对华中农业大学校园内102种被子植物叶片离子组中各元素含量进行相关性分析,结果显示这些植物叶片离子组中每种元素与其他多种元素都存在显著相关性(图4),这说明植物叶片离子组元素之间是彼此协调的。这些矿质元素在植物叶片内形成一张离子稳态网络,相互关联发挥作用。被子植物叶片离子间的相关性可能与其功能有关,有类似功能的元素在离子组中可能表现出更加显著的相关性,比如Ca、B都是细胞壁结构构建必不可少的元素,它们之间表现出了显著的相关性<sup>[25]</sup>;同时,离子本身的性质也可能影响其相关性,如例Ca和Mg之间的显著相关性可能是因为 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 之间的化学相似性,植物在离子吸收和运输过程中缺乏选择性<sup>[26]</sup>。

对102种被子植物按科进行叶片离子组主成分分析,结果显示不同科植物出现了显著分离,同一科植物则相对集中(图5),说明被子植物叶片离子组与遗传发育存在一定的联系,这与White<sup>[27]</sup>的研究结果一致。基于被子植物叶片元素离子组的聚类图(图7)和基于传统分类的树状图(图1)的高度重合,进一步证明被子植物叶片离子组和其系统发育是相互联系的。被子植物不同科植物叶片离子组中N、P、K、Ca、Mg和S这6种元素差异较大(图6),说明它们对不同科离子组变异起主要影响。元素之间能提供的这种信息的差异与元素在植物体内的功能是息息相关的,上述6种元素中Ca与细胞结构相关,受进化的影响更大,植株在进化过程中为了适应环境其结构不断变化,不同种类被子植物叶片和细胞壁钙结合特性的形态和化学差异导致了较高水平的系统发育变异<sup>[25]</sup>,因此它能提供的鉴别信息最大;N与植物生理活动相关受近代进化影响更大,不同植物间的生理活动差异不大,因此N提供的鉴别信息相对较少<sup>[28-31]</sup>。本研究中石蒜科、鸢尾科和禾本科这3种单子叶植物叶片中的Ca含量都显著低于其他双子叶植物叶片中Ca含量、叶片中的K含量高于其他双子叶植物叶片中K含量(图2),这是因为单子叶植物的根系细胞壁中果胶含量相较于双子叶植物根系细胞壁中果胶含量要少的多,果胶中能够结合阳离子的半乳糖醛酸游离羧基也相应减少,阳离子交换能力也减弱<sup>[32-33]</sup>。在土壤中,具有较强根系阳离子交换能力的植物会更加有效地结合二价阳离子,

而具有较低根系阳离子交换能力的植物更加有效地结合一价阳离子<sup>[34-35]</sup>,因此本研究中单子叶植物叶片中Ca的含量都显著低于其他双子叶植物叶片中Ca含量,K含量高于其他双子叶植物叶片中K含量。这也证明了被子植物的叶片离子组具有遗传性。

本研究采集了校园内植物5个取样地点的土壤,总体上土壤样品全量必需矿质养分差异不大。由于本研究不是对每株植物生长点的土壤样品都进行分析,因此不能定量分析土壤环境因素对本研究植物离子组的贡献。

被子植物的系统发育与叶片离子组相互关联,同一科的植物叶片离子组表现出高度的相似性,我们将来或许能通过植物叶片的离子组对其重新进行分类,让叶片离子组成为植物系统发育之外的第二“身份”特征。

### 参考文献 References

- [1] SALT D E, BAXTER I, LAHNER B. Ionomics and the study of the plant ionome[J]. Annual review of plant biology, 2008, 59: 709-733.
- [2] BAXTER I. Ionomics: the functional genomics of elements[J]. Briefings in functional genomics, 2010, 9(2): 149-156.
- [3] ENGELS C, KIRKBY E, WHITE P J. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2012.
- [4] 张俊伶. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2021. ZHANG J L. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2021 (in Chinese).
- [5] BAXTER I. Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits? [J]. Journal of experimental botany, 2015, 66(8): 2127-2131.
- [6] WILLEY N. Ion-brew: clarifying the influences on plant ionomes[J]. New phytologist, 2012, 196(1): 1-3.
- [7] 曹继容, 钟广炎, 王其兵. 植物离子组学及其研究方法与应用进展[J]. 植物学报, 2014, 49(4): 504-513. CAO J R, ZHONG G Y, WANG Q B. Progress in methodology and application of plant ionomics [J]. Chinese bulletin of botany, 2014, 49(4): 504-513 (in Chinese with English abstract).
- [8] 丁广大, 刘佳, 石磊, 等. 植物离子学: 植物营养研究的新方向[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 479-484. DING G D, LIU J, SHI L, et al. Plant ionomics: a new field in plant nutrition [J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2010, 16(2): 479-484 (in Chinese with English abstract).
- [9] THOMPSON R, BURSTIN J, GALLARDO K. Post-genom-

- ics studies of developmental processes in legume seeds [J]. Plant physiology, 2009, 151(3):1023-1029.
- [10] VENEKLAAS E J, LAMBERS H, BRAGG J, et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants [J]. New phytologist, 2012, 195(2):306-320.
- [11] KIM K R, OWENS G, NAIDU R. Effect of root-induced chemical changes on dynamics and plant uptake of heavy metals in rhizosphere soils [J]. Pedosphere, 2010, 20(4):494-504.
- [12] HAYES P, TURNER B L, LAMBERS H, et al. Foliar nutrient concentrations and resorption efficiency in plants of contrasting nutrient-acquisition strategies along a 2-million-year dune chronosequence [J]. Journal of ecology, 2014, 102(2):396-410.
- [13] LAMBERS H, FINNEGAN P M, JOST R, et al. Phosphorus nutrition in Proteaceae and beyond [J/OL]. Nature plants, 2015, 1: 15109 [2023-10-12]. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.109>
- [14] OLIVEIRA R S, GALVÃO H C, DE CAMPOS M C R, et al. Mineral nutrition of Campos rupestres plant species on contrasting nutrient-impoverted soil types [J]. New phytologist, 2015, 205(3):1183-1194.
- [15] VERBOOM G A, STOCK W D, CRAMER M D. Specialization to extremely low-nutrient soils limits the nutritional adaptability of plant lineages [J]. The American naturalist, 2017, 189(6):684-699.
- [16] QUADIR Q F, WATANABE T, CHEN Z, et al. Ionic response of *Lotus japonicus* to different root-zone temperatures [J]. Soil science and plant nutrition, 2011, 57(2):221-232.
- [17] WHITE P J. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants [J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2013, 176(3):305-316.
- [18] LI G, NUNES L, WANG Y J, et al. Profiling the ionome of rice and its use in discriminating geographical origins at the regional scale, China [J]. Journal of environmental sciences, 2013, 25(1):144-154.
- [19] WHITE P J, BROADLEY M R, EL-SEREHY H A, et al. A hypothesis to explain linear relationships between shoot magnesium and calcium concentrations among angiosperm species based on cell wall chemistry [J/OL]. Annals of botany, 2018, 2:2 [2023-10-12]. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy062>.
- [20] BROADLEY M R, BOWEN H C, COTTERILL H L, et al. Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms [J]. Journal of experimental botany, 2004, 55(396):321-336.
- [21] WHITE P J, BROADLEY M R, THOMPSON J A, et al. Testing the distinctness of shoot ionomes of angiosperm families using the Rothamsted Park Grass Continuous Hay Experiment [J]. New phytologist, 2012, 196(1):101-109.
- [22] 姚家玲. 狮山兰芷 [M]. 科学出版社, 2014. YAO J L. Shishan Lanzhi [M]. Beijing: Science Press, 2014 (in Chinese).
- [23] 汪雅各. 土壤和植物营养元素的连续流动自动分析测定 [J]. 上海农业科技, 1984(6):31-32. WANG Y G. Automatic analysis and determination of soil and plant nutrient elements in continuous flow [J]. Shanghai agricultural science and technology, 1984(6):31-32 (in Chinese).
- [24] 赵文志, 张填昊, 张元, 等. 基于电感耦合等离子体发射光谱法测定植物样品中多元素的前处理方法研究 [J]. 地质与资源, 2023, 32(4):505-511, 516. ZHAO W Z, ZHANG T H, ZHANG Y, et al. A pretreatment process for determination of multiple elements in plant samples based on ICP-OES [J]. Geology and resources, 2023, 32(4):505-511, 516 (in Chinese with English abstract).
- [25] BROADLEY M R, WILLEY N J, WILKINS J C, et al. Phylogenetic variation in heavy metal accumulation in angiosperms [J]. New phytologist, 2001, 152(1):9-27.
- [26] WHITE P J, BOWEN H C, FARLEY E, et al. Phylogenetic effects on shoot magnesium concentration [J/OL]. Crop and pasture science, 2015, 66(12):1241 [2023-10-12]. <https://doi.org/10.1071/CP14228>.
- [27] WHITE P J. Selenium accumulation by plants [J]. Annals of botany, 2016, 117(2):217-235.
- [28] THOMPSON K, PARKINSON J A, BAND S R, et al. A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora [J]. New phytologist, 1997, 136(4):679-689.
- [29] HODSON M J, WHITE P J, MEAD A, et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants [J]. Annals of botany, 2005, 96(6):1027-1046.
- [30] WATANABE T, BROADLEY M R, JANSEN S, et al. Evolutionary control of leaf element composition in plants [J]. New phytologist, 2007, 174(3):516-523.
- [31] BROADLEY M R, WHITE P J. Some elements are more equal than others: soil-to-plant transfer of radiocaesium and radiostrotrium, revisited [J]. Plant and soil, 2012, 355(1/2):23-27.
- [32] WHITE P J, BOWEN H C, BROADLEY M R, et al. Evolutionary origins of abnormally large shoot sodium accumulation in nonsaline environments within the Caryophyllales [J]. New phytologist, 2017, 214(1):284-293.
- [33] WHITE P J. Calcium in plants [J]. Annals of botany, 2003, 92(4):487-511.
- [34] SMITH R L, WALLACE A. Cation-exchange capacity of roots and its relation to calcium and potassium content of plants [J]. Soil science, 1956, 81(2):97-110.
- [35] ASHER C J, OZANNE P G. The cation exchange capacity of plant roots, and its relationship to the uptake of insoluble nutrients [J]. Australian journal of agricultural research, 1961, 12(5):755-766.



## Ionome study on angiosperms leaves in Huazhong Agricultural University campus

ZHANG Ziliang, WANG Yajie, SHI Lei

*Microelement Research Centre/National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement,  
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** In this study, 102 species of angiosperms grown in the campus of Huazhong Agricultural University collected by *Shishanlanzhi* were systematically classified, and their mature leaves were sampled to determine the ions composition for the clarification of the ionome of angiosperms and their relationship with plant species, and the differences and connections in the ionome composition of the leaves of angiosperms from different families. The concentrations of mineral nutrients included nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), zinc (Zn), boron (B), molybdenum (Mo) and nickel (Ni) in the leaves were determined. The ionic fingerprints of these plants were established and the ionic components of these plants and their relationship with plant species were analyzed. The results showed that the concentrations of N, K and Ca were the highest, and that of seven micronutrients were the lowest in the leaves. The N concentration in the leaves of leguminous plants was higher than those of plants of other orders, while the P and K concentration in the leaves of caryophyllous plants was higher than those of plants of other orders. The concentration of seven micronutrients in the leaves of these 102 angiosperms also showed significant differences. Correlation analysis showed that there were significant correlations between each mineral nutrient and at least four other mineral nutrients in the leaves. Among them, the concentrations of Ca significantly positively correlated with the concentrations of Mg and B in plants. Additionally, there were highly significant positive correlations among N, P and K. However, there was a highly significant negative correlation between Zn and Ca, Mg, P, and Mn. Principal component analysis showed that the leaf ionome of plants in the same family were similar, but the leaf ionome of plants in different families were different. Cluster analysis showed that Ca, N, K, S, Mg, P have a great contribution to the variation of plant ionome in different families. These results indicated that the phylogeny of angiosperms is closely related to the leaves ionome, and the ionome in leaves of plants in the same family exhibit high similarity. We may be able to identify plant species by their leaf ionome.

**Keywords** angiosperms; ionome; systematic classification; Shizishan; Huazhong Agricultural University campus

(责任编辑:边书京)