



海南滨海常见沙生植物叶片金属元素计量特征

曹窈畅, 王旭, 郭昊, 刘祖耀

引用本文:

曹窈畅, 王旭, 郭昊, 等. 海南滨海常见沙生植物叶片金属元素计量特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 398–408.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海南不同生活型植物叶片和根系C、N、P化学计量特征

C, N, and P Concentrations and Their Stoichiometry of Leaves and Roots with Different Life Forms in Hainan Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 131–135 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4115>

浙江油茶产地土壤和果实金属元素含量特征

Characteristics and Distributions of Metal Elements in *Camellia oleifera* Fruits and Soil in Production Areas of Zhejiang Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 259–268 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4285>

盐胁迫对3种华南园林植物元素特性的影响

Elemental Characteristics of Three Landscape Species under Salt Stress in South China

热带亚热带植物学报. 2018, 26(3): 262–271 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3808>

黔中喀斯特9种木质藤本叶功能性状研究

Studies on Leaf Functional Traits of Nine Woody Lianas in the Karst Area of Central Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 455–464 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4328>

米老排叶片营养成分与利用前景分析

Nutritional Ingredients in Leaves of *Mytilaria laosensis* and Its Utilization Prospects

热带亚热带植物学报. 2021, 29(4): 367–373 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4324>

向下翻页，浏览PDF全文

海南滨海常见沙生植物叶片金属元素计量特征

曹窈畅^{1,2}, 王旭^{1*}, 郭昊³, 刘祖耀²

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 3. 云南省林业调查规划院, 昆明 650000)

摘要: 金属元素是植物生物过程中必需的, 但又可能产生胁迫的物质, 为探讨滨海沙生植物在高盐环境下对金属元素吸收利用特征, 本研究以 6 种海南常见滨海沙生植物[单叶蔓荆(*Vitex trifolia*)、苦郎树(*Volkameria inermis*)、假马鞭(*Stachytarpheta jamaicensis*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、马缨丹(*Lantana camara*)、厚藤(*Ipomoea pes-caprae*)]为研究对象, 测定其叶片和土壤中的 4 种金属元素钾(K)、钙(Ca)、钠(Na)和镁(Mg)含量, 分析元素富集系数、化学计量比及其相关性。结果表明, 滨海沙生植物叶片金属元素含量呈现 $K > Na > Ca > Mg$ 的分布特征, 含量分别为 21.07、1.49、1.13 和 0.59 mg/g, 具有显著的种间和区域差异, 反映了植物对不同土壤条件和环境胁迫的适应性调节机制; 植物对 K 和 Na 的吸收能力最强, 而对 Ca 和 Mg 的吸收能力相对较弱; 滨海沙生植物对金属元素 K、Na 富集作用最强; 不同滨海沙生植物对不同金属元素的富集能力存在差异, 其中单叶蔓荆、厚藤对 K、Na、Mg 元素富集能力表现最好, 飞机草对 Ca 元素的富集能力表现最好; 植物叶片 K 与土壤 Na、Mg 呈显著正相关, 与土壤 K、K:Na、K:Mg 和 Ca:Mg 呈显著负相关; 叶片 Ca 与土壤的 K、K:Ca、K:Na 和 K:Mg 呈显著正相关; 叶片 Na、Mg 与土壤金属元素及其计量比无显著相关性, 说明滨海沙生植物具有复杂的离子调控机制。这为全面系统揭示滨海沙地地区生态系统的养分状况和对滨海沙生植物的培育管理具有指导意义, 还补充了滨海沙生植物金属元素板块内容。

关键词: 滨海沙生植物; 养分利用; 化学计量; 富集能力; 适应机制

doi: 10.11926/jtsb.5036

CSTR:32235.14.jtsb.5036

Metrological Characteristics of Metal Elements in Leaves of Common Sandy Plants in Hainan Coastal Areas

CAO Yaochang^{1,2}, WANG Xu^{1*}, GUO Hao³, LIU Zuyao²

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 3. Yunnan Institute of Forests Inventory and Planning, Kunming 650000, China)

Abstract: Metal elements are essential for plant biological processes but may also cause stress. To explore the characteristics of metal element absorption and utilization by coastal halophytes under high-salt conditions, this study selected six common coastal halophytes in Hainan [*Vitex trifolia*, *Volkameria inermis*, *Stachytarpheta jamaicensis*, *Eupatorium odoratum*, *Lantana camara*, and *Ipomoea pes-caprae*] as research subjects. The contents of four metal elements, potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na), and magnesium (Mg), in their leaves and soil were determined, and the enrichment coefficients, stoichiometric ratios, and their correlations were analyzed. The results showed that the metal element contents in the leaves of coastal halophytes were distributed as $K > Na > Ca > Mg$, with contents of 21.07, 1.49, 1.13, and 0.59 mg/g, respectively. There were significant interspecific and regional differences, reflecting the adaptive regulatory mechanisms of plants to different soil conditions and environmental stresses. The plants had the strongest absorption capacity for K and Na, while the absorption

收稿日期: 2025-06-04 接受日期: 2025-10-21

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务专项项目(CAFYBB2018MB015)资助

This work was supported by the Project for Special Project for Fundamental Research of Chinese Academy of Forestry (Grant No. CAFYBB2018MB015).

作者简介: 曹窈畅(2000年生), 女, 硕士研究生, 主要从事森林培育、森林生态方面的研究。E-mail: caoyaochang13@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cafwangxu111@caf.ac.cn

capacity for Ca and Mg was relatively weak. Coastal halophytes had the strongest enrichment effect on metal elements K and Na. Different coastal halophytes had different enrichment abilities for different metal elements. Among them, *Vitex trifolia* and *Ipomoea pes-caprae* had the best enrichment abilities for K, Na, and Mg, while *Eupatorium odoratum* had the best enrichment ability for Ca. The leaf K content was significantly positively correlated with soil Na and Mg, and significantly negatively correlated with soil K, K:Na, K:Mg, and Ca:Mg. Leaf Ca was significantly positively correlated with soil K, K:Ca, K:Na, and K:Mg. Leaf Na and Mg had no significant correlation with soil metal elements and their stoichiometric ratios, indicating that coastal halophytes have complex ion regulation mechanisms. This provides guidance for comprehensively and systematically revealing the nutrient status of the ecosystem in coastal sandy areas and the cultivation and management of coastal halophytes, and also supplements the content of metal elements in coastal halophytes.

Key words: Littoral sand plant; Nutrient utilization; Stoichiometry; Enrichment capacity; Adaptation mechanism

植物元素化学组成反映了其在特定生境条件下从土壤基质中选择性吸收与累积的矿质营养物质, 它们参与调控植物体内多种生理生化代谢过程^[1]。其中碳(C)是构成生物有机体的主要元素, 氮(N)、磷(P)元素是植物体长和代谢的主要养分, 作为植物生长必备的三大营养元素, 这3种元素的化学计量研究结果颇为丰富^[2]。金属元素虽然在植物体内含量较少, 但其生理作用同样不可替代, 如钾(K)参与植物水分利用、渗透调节、气孔开放^[3], 钙(Ca)的吸收能帮助植物促进离子平衡, 有稳定质膜、抵抗环境胁迫的作用^[4], 钠(Na)对影响植物对金属离子吸收起关键作用^[5], 镁(Mg)可以活化DNA和RNA的合成过程, 缺Mg导致植物叶片衰老加快^[6]。这4种金属元素是植物正常生长、发育和繁殖所必需的大量元素和有益元素^[7]。研究表明, 植物对金属元素的浓度具有一定程度的耐受性, 在金属元素浓度低的情况下, 植物的生长可能不受影响甚至会有助于植物的生长, 但另一方面, 当金属元素的浓度超出植物耐受浓度临界值时, 也会导致植物毒害^[8]。植物体内元素间存在复杂的拮抗和协同关系, 其比值变化可反映元素间的相互作用机制, 这一指标也是植被元素含量的特征值之一^[9]。如K:Ca能调节细胞渗透压, 对糖分运输和质流也有影响^[10]; K:Mg对控制气孔和光合有重要作用^[11]; 低Ca:Mg可能会限制许多植物的生长或生存^[12], 而K:Na可以判断植物的耐盐性^[13], 将这些元素化学计量比考虑进元素特征中, 可以更加深入了解植物和生态系统养分供求和循环问题的关键。此外, 植物金属元素含量不仅取决于其自身的生理需求, 更受到土壤基质中元素供应状况的直接制约, 植物通过根系从土壤中选择性吸收金属离子, 并将其转运

至叶片等地上器官, 这一过程涉及复杂的植物-土壤相互作用机制^[14-15]。因此, 探讨植物叶片与土壤多种化学元素的特征对植物的资源利用分配以及植物对环境的适应过程具有重要意义。

滨海沙地是海陆交错的过渡带, 该地区生态环境恶劣, 保肥能力弱, 具有典型的生态“边缘效应”和极强的生态脆弱性^[16]。滨海沙地受潮汐和地下水的影 响, 土壤K、Na、Ca元素含量偏高、土壤pH高, 有机质含量低^[17], 其植被具有耐盐性, 旱生性和耐贫瘠的特点^[18]。加之长期以来的人类活动, 使得滨海沙生植被受到严重破坏, 开展滨海沙生植物的保护和研究已成为保护生物学研究的重要内容。近年来关于滨海沙生植物的研究也逐渐开展, 但大多数集中在地力固持、引种试验、植物功能性状等方面^[19-20], 有关于滨海沙生植物中养分元素的研究主要集中在C、N、P及其化学计量比, 如骆娟等^[21]研究发现滨海沙生植物单叶蔓荆(*Vitex rotundifolia*)的地下部分N/P和K/P比值最高; 邱岭军等^[22]的研究表明5种滨海沙生植物对N的重吸收率大于P。鉴于滨海沙地具有水、土壤和空气高盐的特征, 金属元素作为盐类物质的主要构成成分, 同时充当营养要素影响植株发育、群落构成及其生理功能, 进而主导生态系统的运作机制与生产潜能, 可在滨海沙生植物金属元素的化学计量相关研究却鲜有报道, 金属元素在滨海沙生植物-土壤的吸收利用策略研究更是不明。因此, 本文以海南岛的6种常见滨海沙生植物为研究对象, 试图回答以下2个问题: (1) 滨海沙生植物叶片金属元素含量呈现什么特征? (2) 滨海沙生植物叶片的金属元素与土壤的金属元素含量间有何关联? 以期阐述滨海沙生植物对土壤养分的管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

海南岛处于热带北缘，位于 18°08′~20°10′ N, 108°37′~111°03′ E，岛面积 3.39×10⁴ km²，周围环绕 1 890 km 长的海岸线，其中砂质岸线占自然岸线总长的 42.5%，形成了丰富多样的滨海生境类型。海南岛属热带季风气候，呈现显著的“无冬四季长夏”特点，年平均气温在区域尺度上呈现 22 ℃，最

低温在 10 ℃以上，年均日照时数 1 750~2 650 h，年降水量为 1 500~2 000 mm，且呈现显著的季节性分布特征，主要集中于 5 月—10 月的雨季，约占全年总降水量的 70%以上，约为 1 500 mm，全岛水热资源充足。考虑到水热条件对植物功能性状的影响，本研究在北部半湿润气候区(临高县)、南部半干旱半湿润过渡区(三亚市)、西部半干旱区(昌江县)以及东部湿润区(文昌市)分别设置固定样点，分别进行采样，样点基本情况见表 1。

表 1 采样地基本气象资料

Table 1 Basic meteorological data of sampling site

样点 Plot	最低温度(℃) Lowest temperature	平均温度 (℃) Average temperature	降水量 (mm) Precipitation	日照时数 (h) Sunshine duration	平均风速 (m/s) Average wind speed
临高 Lingao	3.66	24.7	1 480.0	2 042.0	2.479 1
三亚 Sanya	6.10	27.1	1 460.0	2 445.4	2.306 4
昌江 Changjiang	4.90	25.9	1 700.0	2 016.8	2.271 1
文昌 Wenchang	4.12	25.1	1 980.0	1 916.0	1.974 9

1.2 样品采集及测试

样品采集 根据实地踏查，本研究选取海南滨海潮汐带的优势种或常见树种共 6 种植物为材料(表 2)，其中 3 种外来入侵种：马缨丹(*Lantana camara*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、假马鞭(*Stachytarpheta jamaicensis*)在研究区域中广泛定殖，是研究区内植物群落的重要组成部分，为了更全面客观了解该滨海沙地生态系统当前的金属元素生物化学循环特征，因而将其纳入分析。叶样品采集：在 20 m×20 m 内，灌木植物每种随机选择生长良好、个体大小基本一致的 5 株植株，在每株冠层的东、南、西、北 4 个方向，采集全展开、无病虫害的成熟叶片，每种不少于 20 片；藤本和草本植物随机采集全展开、无病虫害的成熟叶片，每种不少于 20 片，将叶片放入纸袋带回实验室，样品用清洁自来水和去离子水清洗，除去样品表面附着的灰尘，避免空气及土壤中重金属成分的干扰，以保证所测结果的准确性和科学性，待自然风干后，将植物样品置于烘箱中以 105 ℃高温杀青 30 min，后于 80 ℃恒温下烘干 48 h，待样品完全干燥至恒重后，碾碎研磨后备测。土壤样品按照四分法进行取样，采集深度为 0~30 cm，每个样点设置 3 个重复，将采集的混合土壤样品去除根系和石块后，置于自封袋中密封保存带回实验室，置于 60 ℃烘箱中进行干燥处理，剔除杂质后用玛瑙研钵研磨成粉末状，过孔

径 0.15 mm 筛后存储于样品袋中避光保存，备测。

表 2 研究材料

Table 2 Research materials

植物 Species	生活型 Life form	采样地点 Sampling site
单叶蔓荆 <i>Vitex trifolia</i>	灌木 Shrub	LG、WC、CJ
苦郎树 <i>Volkameria inermis</i>	灌木 Shrub	LG
假马鞭 <i>Stachytarpheta jamaicensis</i>	草本 Herb	LG
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	草本 Herb	LG
厚藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i>	藤本 Vine	LG、WC、SY、CJ
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	灌木 Shrub	LG

CJ: 昌江; LG: 临高; SY: 三亚; WC: 文昌。下同

CJ: Changjiang; LG: Lingao; SY: Sanya; WC: Wenchang. The same below

样品测定 叶样品采用微波消解法，土壤样品采用 H₂SO₄-HNO₃-HClO₄ 消解；样品通过电感耦合等离子体发射光谱仪(prodigy XP, Leeman, USA)测定 K、Ca、Na、Mg 元素含量。

1.3 数据的统计分析

1.3.1 数据计算

变异系数(CV)分析不同植物和不同生境对金属元素含量的分异情况。生物富集系数(BCF)是描述生物体内化学物质积累的重要指标，可有效评估植物从基质中积累元素的能力，并直观反映植物对某一金属元素的富集作用，BCF 越大，富集程度越强。叶片对营养元素的相对吸收要高于根和茎^[23]，

研究对象主要为藤本、灌木、草本，以叶为主器官，因此本文以叶片的金属含量代表植株的金属含量。

$CV=SD/MN\times100\%$, $BCF=C_{leaf}/C_{soil}$, 式中, SD 为标准差, MN 为平均值; C_{plant} 为植株中金属元素质量分数, 单位 mg/g , C_{soil} 为土壤中相应金属元素全量, 单位 mg/g 。通常情况下, $BCF>1$ 表示该植物为该金属元素的超富集植物, BCF 在 $0.01\sim0.1$ 表示对此元素弱吸收或积累, $0.1\sim1$ 为中度吸收或积累, $1\sim10$ 为强吸收或积累。

1.3.2 数据分析

采用 Excel 2019 软件进行数据的整理与处理, 在 SPSS 27.0 中采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)对不同滨海沙生地土壤中金属元素 K、Ca、Na、Mg 含量进行差异显著性分析, 对滨海沙生植

物中叶片进行不同样点和不同元素的双因素方差分析(Two-Way ANOVA), 采用最小显著差异法(LSD)进行组间差异性分析($\alpha=0.05$), 利用 Graphpad Prism9 软件绘图。采用 R-4.3.1 软件对植物叶片金属含量与土壤含量及其计量比进行相关性分析, 并用 corrplot 包进行绘图。

2 结果和分析

2.1 滨海沙地土壤的金属元素含量特征

从图 1、表 3 中可见, 滨海沙地 4 个采样点土壤中 K 含量存在显著差异, 其中三亚最高, 文昌最低; 而 Ca 含量基本上随着各区降水量增加而增加; Na 和 Mg 含量表现一致, 即除昌江外, 其他 3 个采

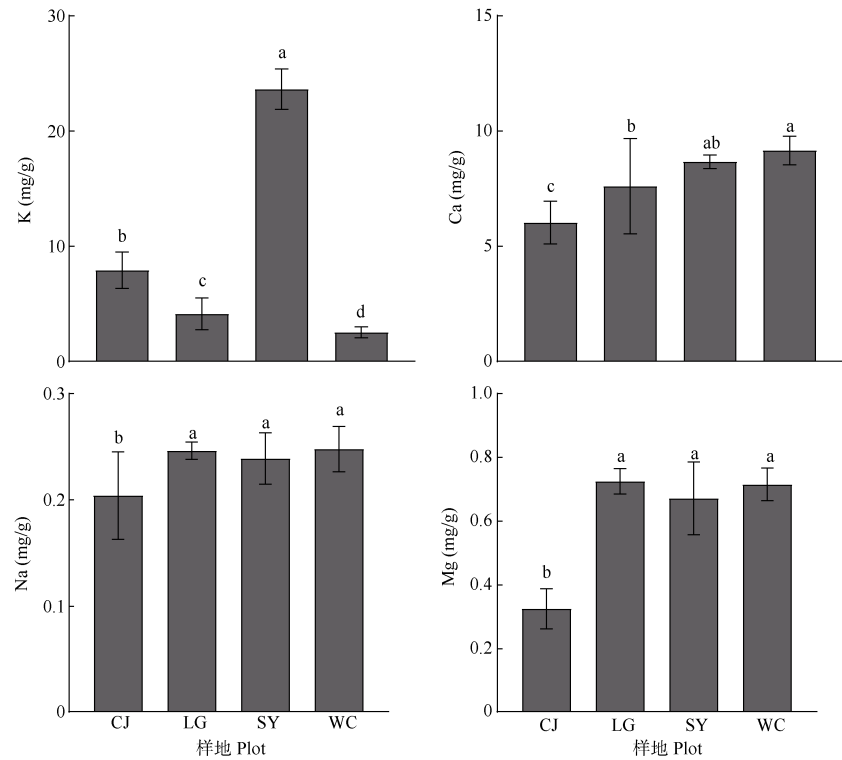


图 1 滨海沙生地土壤的金属元素含量。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同
Fig. 1 Soil metal element contents in different coastal sandy. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

表 3 滨海沙生植物土壤金属元素含量及变异系数

元素 Element	平均 (mg/g) Mean	标准差 (mg/g) Standard deviation	最大 (mg/g) Maximum	最小 (mg/g) Minimum	变异系数 /% Coefficient of variation
K	7.29	6.96	26.18	1.76	95.47
Ca	7.74	1.80	10.17	4.76	23.26
Na	0.24	0.03	0.30	0.17	12.50
Mg	0.62	0.18	0.80	0.27	29.03

样点间无显著差异, 其中文昌 Na 含量最高, Mg 含量以临高最高, 昌江的 Na、Mg 含量最低。整体来看 K 和 Ca 含量地区间差异大, 而 Na 和 Mg 含量地区间差异小。土壤中金属元素平均含量依次为: Ca [(7.74±1.80) mg/g]>K [(7.29±6.96) mg/g]>Mg [(0.62±0.18) mg/g]>Na [(0.24±0.03) mg/g], 土壤中 Ca、K 含量较高; 且 K 含量的变异系数最大, Na 的最小。

2.2 叶片金属元素含量特征

由表 4 可见, 滨海沙生植物叶片中金属元素平均含量依次为 K [(21.07±8.65) mg/g]>Na [(1.49±0.89) mg/g]>Ca [(1.13±0.56) mg/g]>Mg [(0.59±

0.284) mg/g], 叶片中 K 含量最高, 其中 Na 含量的变异系数最大。由图 2 可见, 昌江和文昌厚藤叶片的 K、Na、Mg 含量显著高于单叶蔓荆, Na 含量则无显著差异; 临高厚藤和苦郎树叶片中 K 含量显著高于马缨丹、假马鞭、单叶蔓荆和飞机草, Ca 含量则是飞机草显著高于单叶蔓荆和厚藤, 且与假马鞭、苦郎树和马缨丹无显著差异, 厚藤和苦郎树的 Na 含量显著高于假马鞭、单叶蔓荆、马缨丹和飞机草, 飞机草和马缨丹的 Mg 含量显著高于假马鞭、厚藤、单叶蔓荆和苦郎树; 三亚厚藤叶片的 K 含量显著高于 Ca、Na 和 Mg 含量。不同地点共有种单

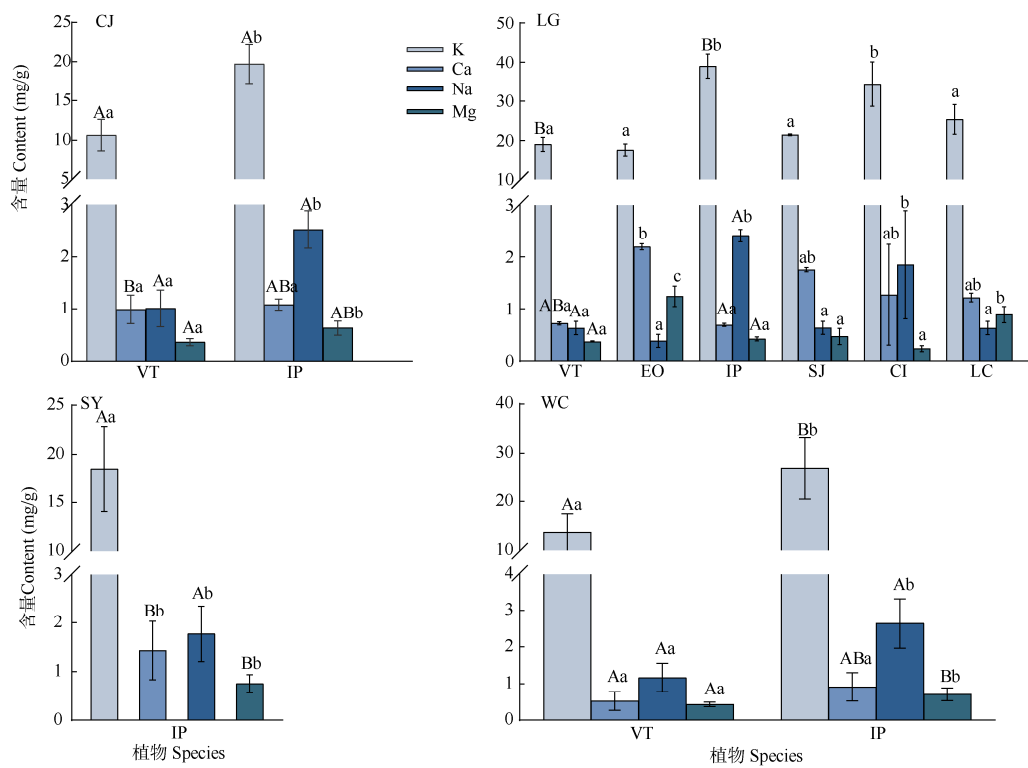


图 2 不同样点植物叶片的金属元素含量。柱上不同大写和小写字母分别表示同一植物不同样点和同一样点不同植物间差异显著($P<0.05$)。VT: 单叶蔓荆; IP: 厚藤; EO: 飞机草; SJ: 假马鞭; CI: 苦郎树; LC: 马缨丹。下同

Fig. 2 Contents of metal elements in leaves at different plots. Different capital and small letters upon column indicate significant difference at 0.05 level among different plots of the same plant and among different plants at the same plots, respectively. VT: *Vitex trifolia*; IP: *Ipomoea pes-caprae*; EO: *Eupatorium odoratum*; SJ: *Stachytarpheta jamaicensis*; CI: *Clerodendrum inerme*; LC: *Lantana camara*. The same below

表 4 滨海沙生植物叶片的金属元素含量及其变异系数

元素 Element	平均 (mg/g) Mean	标准差 (mg/g) Standard deviation	最大 (mg/g) Maximum	最小 (mg/g) Minimum	变异系数 % Coefficient of variation
K	21.07	8.65	42.11	7.86	41.04
Ca	1.13	0.56	2.31	0.31	49.71
Na	1.49	0.89	3.53	0.26	59.74
Mg	0.59	0.28	1.44	0.18	48.41

叶蔓荆和厚藤的叶片金属元素含量存在显著差异, 其中临高和文昌厚藤叶片 K 含量显著高于昌江和三亚, 三亚的 Ca 和 Mg 含量显著高于临高和文昌, Na 含量在 4 个采样点无显著差异; 临高的单叶蔓荆叶片金属元素含量显著高于其他样点, 昌江的 Ca 含量显著高于文昌, Na 和 Mg 含量在 4 个采样点无显著差异。可见, 滨海沙生植物叶片金属元素含量具有显著的种间和区域差异性, 金属元素含量可能受植物种类和土壤条件的共同影响。

2.3 对土壤金属元素富集能力特征

为了进一步评价土壤对植物的作用和影响程度, 由图 3 可见, K、Na 的超富集植物有单叶蔓荆、厚藤、飞机草、假马鞭、苦郎树、马缨丹; Ca 无超富集植物, 但飞机草对 Ca 的富集能力表现最好; Mg 的超富集植物有厚藤、飞机草、马缨丹。滨海沙生 6 种常见植物对 K、Na、Mg 均表现为强吸收或积累, 富集系数分别为 5.34、6.44、1.02; Ca 表现为中度吸收或积累, 富集系数为 0.17; 说明滨海沙生植物对土壤金属元素的吸收和积累吸收能力不同。

2.4 叶片金属元素计量比特征

植物叶片的元素含量及比例关系能判断植物生长发育状态及对生态环境的响应。由表 5 可见,

滨海沙生地 6 种植物叶片金属元素间化学计量比存在显著差异, 滨海沙生植物对 K 的吸收能力最好, 其次是 Na, 而对 Ca 和 Mg 的吸收能力相对较弱。6 种植物叶片的 K:Ca 表现为苦郎树>厚藤>单叶蔓荆>马缨丹>假马鞭>飞机草; 叶片 K:Na 表现为飞机草>马缨丹>假马鞭>苦郎树>单叶蔓荆>厚藤, 且植物之间存在显著差异性; 叶片 K:Mg 表现为苦郎树>假马鞭>厚藤>单叶蔓荆>马缨丹>飞机草, 苦郎树 K:Ca 显著高于其他树种; 叶片 Ca:Na 表现为飞机草>假马鞭>马缨丹>苦郎树>单叶蔓荆>厚藤; 叶片 Ca:Mg 表现为苦郎树>假马鞭>单叶蔓荆>飞机草>厚藤>马缨丹, 假马鞭和苦郎树与马缨丹存在显著差异性; 叶片 Na:Mg 表现为苦郎树>厚藤>单叶蔓荆>假马鞭>马缨丹>飞机草, 苦郎树显著高于其他树种。

2.5 相关性分析

土壤-植株系统中的营养元素相互作用关系到植物根系对元素的吸收、体内迁移、分布积累和生理活动等。对滨海沙生植物叶片、土壤中金属元素含量及其计量比进行相关性分析, 由图 4 可见, 叶片中 K 含量与 Na 含量呈显著正相关, Ca 含量与 Na 含量呈极显著负相关, Ca 含量与 Mg 含量呈显著正相关。叶

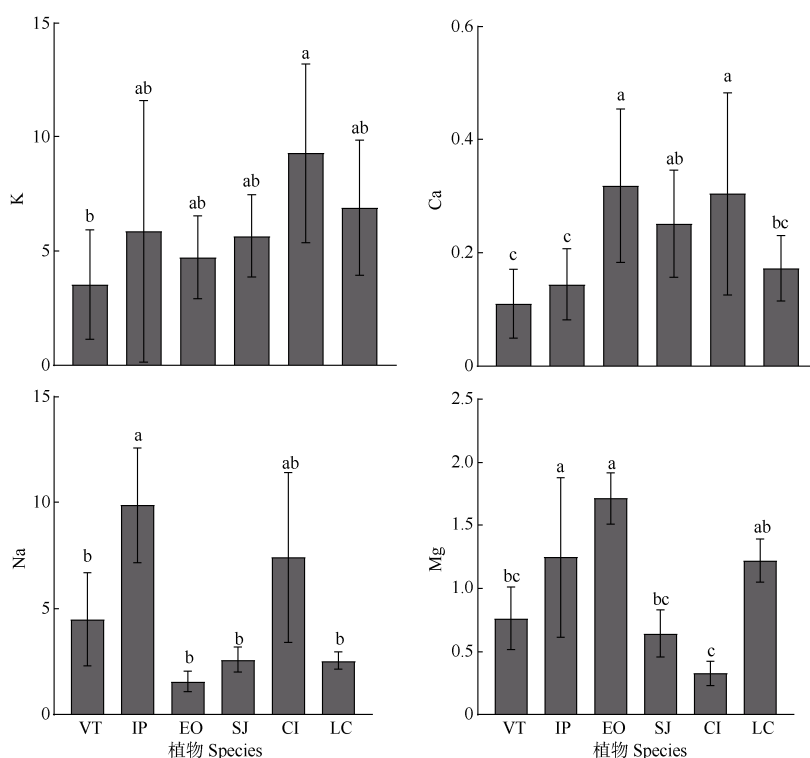


图3 滨海沙生植物的生物富集系数

Fig. 3 Bio-enrichment factor of coastal sandy plants

表 5 滨海沙生植物叶片的金属元素化学计量比

Table 5 Stoichiometric ratio of metal elements in leaves of coastal sandy plants

植物 Species	K:Ca	K:Na	K:Mg	Ca: Na	Ca:Mg	Na:Mg
单叶蔓荆 <i>Vitex trifolia</i>	22.44±14.52ab	16.12±9.09ab	35.88±11.72ab	0.94±0.64a	2.07±1.07a	2.57±0.98ab
厚藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i>	28.03±18.75ab	11.47±4.95a	43.05±26.67ab	0.58±0.50a	1.77±0.93a	3.70±1.31b
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	8.03±0.91a	48.84±13.05d	14.52±3.57a	6.26±2.38d	1.79±0.24a	0.32±0.16a
假马鞭 <i>Stachytarpheta jamaicensis</i>	12.22±0.40a	34.69±6.63c	49.01±16.31b	2.85±0.64c	4.04±1.47b	1.39±0.20ab
苦郎树 <i>Volkameria inermis</i>	49.82±51.11b	21.52±8.21b	155.92±61.71c	1.05±1.11ab	5.35±4.18b	8.76±6.86c
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	20.69±1.71ab	40.54±2.18cd	29.70±9.72ab	1.97±0.27bc	1.42±0.35a	0.74±0.28a
均值 Mean	24.79±20.15	19.75±13.64	46.02±38.57	1.36±1.66	2.24±1.63	3.10±2.60

片 K 含量与土壤中 Na、Mg 含量呈显著正相关，与土壤中 K 含量、K:Na、K:Mg 和 Ca:Mg 呈显著负相关；叶片 Ca 含量与土壤中的 K 含量、K:Ca、K:Na 和 K:Mg 呈显著正相关；叶片 Na、Mg 含量与土壤中金属元素含量及其计量比无显著相关性。

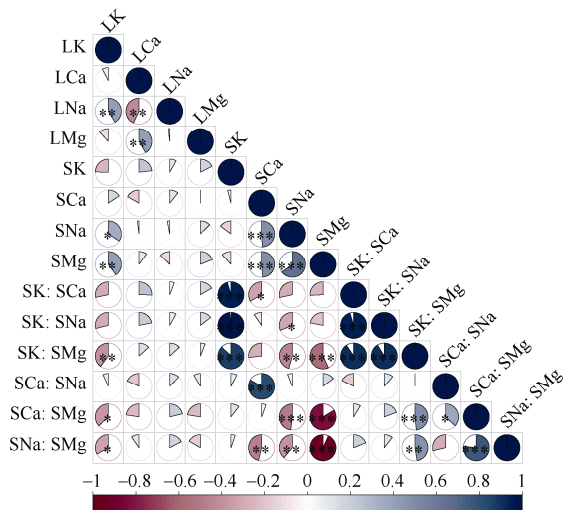


图 4 滨海沙生植物叶片和土壤金属元素含量及其化学计量比的相关性分析。***: $P<0.001$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$; L: 叶片; S: 土壤。

Fig. 4 Correlation analysis of metal element contents in leaves and soil and their stoichiometric ratio of coastal sandy plants. ***: $P<0.001$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$; L: Leaf; S: Soil.

3 讨论和结论

3.1 滨海沙地土壤金属元素含量特征

土壤中的养分含量反映了土壤的肥沃程度，作为提供植物生长必需的能源基础，决定着植物中的营养含量^[24]。研究区域内 4 种金属元素含量远低于世界土壤 K、Ca、Na、Mg 含量^[25]，与其他相似环境地区的土壤养分结果相比同样也偏低^[26]，表明整个研究区土壤 K、Ca、Na、Mg 养分较为贫瘠，可

能是影响植物生长的限制性因子。本研究结果表明滨海沙生地土壤的 Ca、K 含量显著高于 Na、Mg，主要原因可能有以下 3 点：一是研究区本身土壤基质以疏松无结构的沙粒组成，沙粒凝聚力小，透水性强，在降水和海水入侵过程中水分渗透迅速，在阳光照射下水分受热土壤表层的水分蒸发很快，可能会导致一些可溶性钠盐随水分一起被带走，尤其是在干旱时或海风盛行的时候，这种情况更为明显^[18]；二是滨海沙生植物本身就是耐盐性植物，对 Na^+ 吸收能力强，且此研究结果中土壤中 Na 元素的变异系数最小，土壤中的 Na 元素相较其他元素更稳定，植物能够更稳定的对 Na 进行吸收，导致土壤中 Na 元素含量降低。三是 Ca^{2+} 在海水入侵过程中表现出非保守性和活跃性，其化学组分以游离态形式存在。土壤中丰富的阳离子交换位点为 Ca-Na 交换提供了条件，当土壤中 Na^+ 浓度降低时， Ca^{2+} 可以占据这些交换位点，从而导致其相对富集^[27]，而 K 含量相对较高与大多数研究结果相同，盐碱生境下，植物生长受到抑制，高盐胁迫影响植物对 K 的正常吸收，导致盐碱土壤 K 含量高。元素具体含量会受到许多因素的影响，滨海沙生地土壤中金属元素受水文条件、土壤质地等多种因素的长期作用影响，不同区域间存在明显的空间差异性，呈现动态变化特征。

3.2 滨海沙生植物叶片金属元素计量差异特征

叶片是植物养分含量的贮藏器官之一，植物吸收利用的养分可以通过叶片来体现^[28]。本研究不同植物叶片对金属元素的吸收和积累能力存在显著差异，对元素具有选择性吸收，其中厚藤和苦郎树对 K、Na 的吸收能力较强，飞机草对 Ca、Mg 的吸收能力较强，这种差异与植物的生境分布有关。分布在潮间带的单叶蔓荆、厚藤、苦郎树长期承受海水浸渍和高盐胁迫，会选择性吸收大量的 Na^+ 来

进行渗透调节,使得自身的水势降到比外界土壤更低,同时强化 K^+ 的吸收以维持离子平衡的生理机制,与前人研究结果一致^[29-30]。而作为潮上带的飞机草、假马鞭、马缨丹主要面临干旱胁迫,高浓度的 Ca 和 Mg 可以促进根系的生长与发育,这有助于植物在干旱条件下更有效地吸收地下水^[31]。不同采样点植物元素含量的区域差异反映了土壤环境的地域分化。临高样点呈现最复杂的分布模式,共有种的地点差异更为明显,这种区域分化反映了植物对不同土壤条件的适应性调节。研究结果还表明海南滨海沙生植物叶片金属元素具有明显的热带特征,其中, Ca、Na、Mg 显著低于全国水平, K 高于全国水平^[32]。这可能与海南属于热带气候,雨季长且降雨量大,土壤水分丰富,这种条件促进了土壤中水溶性养分的流动和淋洗,特别是对 Ca、Na、Mg 等相对不稳定的元素更加显著,这些元素容易被雨水冲刷而流失,从而导致植物叶片中含量降低,但 K 元素在这种背景情况下却展现出相对较高的可利用性,本文叶片变异系数中 K 元素最低也可以验证这一点,这与管东生等^[9]对海南 80 种植物叶片元素分析结果相同。

本研究中金属元素化学计量比结果表明,滨海沙生植物对 K 和 Na 较强, Ca、Mg 较弱,说明在生长过程中植物对这些金属元素具有灵活的吸收策略,为了维持自身功能的平衡,需对自身的养分组成做出选择性的调整,滨海环境下优先减少重要且相对受限的元素含量的波动,维持重要器官的养分组成相对稳定^[33-34]。6 种植物均为 K、Na 元素的超富集植物,这与滨海沙地土壤高盐特征高度吻合。植物通过维持 K、Na 吸收平衡来提高抗盐性,以保证正常的生理功能^[35],6 种植物叶片的 K/Na 均值为 19.75,其中飞机草和马缨丹的 K/Na 表现更佳,说明其具有良好的离子调控能力,能够将 Na^+ 停留在根部,减少向地上部分的运输,这与前人的研究结果一致^[36]。相反,滨海沙地土壤中 Ca 元素含量最高,但植物对 Ca 的富集能力却最弱。这可能源于土壤中高浓度的 Na^+ 和 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 竞争吸收位点,导致更多的 Ca 滞留于土壤中,从而抑制了植物对 Ca 的吸收^[37]。在本研究中,飞机草对 K、Ca、Na、Mg 4 种金属元素的富集能力均表现突出,尤其是对 Ca 的富集能力显著高于其他植物。这一特性很可能是飞机草能够在海南贫瘠的滨海沙地环境中成功定殖、快速扩张并排挤本地物种的重要生理生态机

制之一,对 4 种金属元素的过度富集,可能会改变局部土壤的元素循环平衡,从而对本地物种产生竞争优势。此外,单叶蔓荆和厚藤对 K、Na、Mg 元素的富集能力也表现优异,表明这些植物对环境变化较为敏感。因此,飞机草后续研究应聚焦于解析其高效富集元素的生理机制,从而为评估其生态风险及制定科学防控策略提供了数据支持,单叶蔓荆和厚藤对滨海环境的高度适应性,是研究植物耐盐抗逆机制的理想材料,也是滨海沙地生态修复的优先乡土物种,且植物元素含量的种间和地域差异为滨海沙地植被选择和生态管理提供了科学依据。

3.3 滨海沙生植物叶片与土壤金属元素协同性

植物叶片中 K、Ca、Na、Mg 元素含量间的协同、拮抗关系,揭示了金属元素在生理功能上重要的相互作用。本研究中,叶片 K 和 Na 呈现显著正相关以及 Ca 与 Na 呈现极显著负相关可能构成了滨海沙生植物耐盐机制的核心^[34]。K-Na 的协同吸收模式可能源于两个方面:一是 K 和 Na 作为同族碱性金属元素,在细胞膜载体转运系统中具有相似亲和性^[8,38],植物根系可能通过相似的转运蛋白同时吸收这两种离子来维持渗透调节。二是在高盐胁迫条件下,适量的 Na^+ 吸收有助于维持细胞渗透势, K^+ 的同步积累确保了关键酶活性和蛋白质的功能的稳定。这一协同策略可能是其适应高盐环境的核心机制,即植物能利用环境中丰富的 Na^+ 进行渗透调节的同时,又通过维持适宜的 K:Na 避免离子毒害^[5]; Ca^{2+} 参与细胞壁稳定、膜系统完整性维护等关键生理过程,高浓度 Na^+ 不仅与 Ca^{2+} 竞争载体结合位点,还可能干扰 Ca^{2+} 信号传导通路,因此植物需要在 Na^+ 耐受与 Ca^{2+} 功能维持之间寻求平衡, Ca 与 Na 的拮抗关系则体现了离子竞争的生理活动平衡。研究结果表明叶片中 K 与土壤中 Mg 和 Na 呈显著正相关。这可能与土壤 Na 浓度升高时,植物可能启动补偿性 K^+ 吸收机制,通过增加 K^+ 积累来稀释 Na^+ 毒性并维持离子平衡;而 K 与 Mg 的协同关系则可能与氮代谢调控相关^[39],在氮素受限的滨海环境中, Mg^{2+} 的可利用性直接影响氮同化效率,当土壤 Mg^{2+} 含量增加时,植物氮代谢能力提升,对 K^+ 的需求随之增加,从而表现为正相关关系。

一般认为植物叶片的养分含量特征由物种自身的属性特征和物种的环境适应性所决定,土壤养分限制主要是潜在影响的存在^[40]。本研究中,植物-土壤系统形成了动态的元素循环协同机制,叶片

K 含量与土壤 Na、Mg 含量呈正相关,与土壤 K 含量及其化学计量比呈负相关,表明植物具有精细的 K^+ 平衡调节能力,土壤 Na^+ 升高时,植物利用 K^+ 和 Na^+ 载体的共转运特性增加 K^+ 吸收,优化离子比值以应对盐胁迫,土壤 Mg^{2+} 的促进作用可能源于其对光合作用和蛋白质合成的调控,进而增加对 K^+ 的生理需求,当土壤 K^+ 过量时,植物通过负反馈机制限制过度吸收,防止离子毒害^[41]。而叶片 Ca 含量与土壤 K 及其计量比呈正相关,暗示 Ca^{2+} 吸收需要特定的离子环境支撑,适宜的土壤离子比值可能减少竞争抑制,创造有利于 Ca^{2+} 转运的根际条件。叶片 Na、Mg 含量与土壤金属元素含量无显著相关性,其吸收主要受植物内在生理机制调控,滨海植物可能已形成稳定的 Na^+ 耐受阈值和 Mg^{2+} 优先保障机制。

植物-土壤金属元素的协同调节机制为滨海生态系统管理提供了理论基础。因此,在滨海沙地林分经营过程中,这些元素间的相互关系表明滨海沙生植物可能已形成了一套精细的离子调控系统,能够在高盐、贫瘠的土壤条件下维持正常的生理功能,植物通过元素间的协同与拮抗作用,实现了对环境胁迫的有效缓解。从林分经营角度看,理解这些元素关系有助于制定精准的施肥策略。在 K 相对充足的土壤中,适当补充 Ca、Mg 可能比单纯增施钾肥更有效;在高盐土壤改良中,需要综合考虑 K/Na 调控,避免单一元素的过量施用。需要注意的是,相关性分析揭示的是统计学关联,其生物学机制的确切验证仍需控制性实验和生理生化研究的支撑。

综上,海南滨海沙生植物叶片金属元素含量具有显著的种间和区域差异性,金属元素含量可能受植物种类和土壤条件的共同影响。不同植物种类对金属元素的富集能力存在显著差异,说明各物种的养分获取和分配策略具有明显分化,在一定程度上解释了滨海植物群落中物种共存的生态机制。通过进一步对植物-土壤元素相关性的研究,表明叶片元素含量与土壤环境条件存在复杂的关联性,K 的吸收受土壤多元素环境调控,Ca 吸收依赖特定离子条件,而 Na、Mg 主要受植物内在调节机制控制,体现了不同元素获取途径的多样性。叶片元素间的协同拮抗关系也在一定程度上揭示了植物应对盐胁迫的生理适应机制,证实了滨海沙生植物在长期进化过程中发展出多样化的化学计量特征和差异化

的环境适应策略。基于元素富集能力差异,飞机草、马缨丹、假马鞭的金属元素强富集特性可作为入侵风险评估和科学防控的重点,单叶蔓荆和厚藤可作为生态修复与植被重建的优先乡土物种。本研究没有将凋落物等因素考虑进来,可能会影响金属元素的可用性和移动性,后续相关研究需要考虑更多因素以及进行长期的监测,获得的研究结论将会更准确。

参考文献

- [1] CHEN D, PAN W H, ZHOU Z C, et al. Research progresses on functional roles and regulation mechanisms of nutrient element transporters in plants [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2018, 44(3): 283–293. [陈迪, 潘伟槐, 周戟材, 等. 植物营养元素运输载体的功能及其调控机制研究进展 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(3): 283–293. doi: 10.3785/j.issn.1008-9209.2017.12.281.]
- [2] TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. Chin J Plant Ecol, 2021, 45(7): 682–713. [田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 682–713. doi: 10.17521/cjpe.2020.0331.]
- [3] ZHONG C L, HUANG Y X, CAO C F, et al. Responses of element stoichiometry characteristics of *Casuarina equisetifolia* to distance from the coastline [J]. J Subtrop Resour Environ, 2017, 12(2): 22–29. [钟春柳, 黄义雄, 曹春福, 等. 不同海岸梯度下木麻黄防护林生态化学计量特征 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(2): 22–29. doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2017.02.003.]
- [4] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. Ann Bot, 2003, 92(4): 487–511. doi: 10.1093/aob/mcg164.
- [5] LI X Y, XIE L N. Research progress in Na^+ regulation mechanism of plants under salt stress [J]. Biotechnol Bull, 2019, 35(7): 148–155. [李晓院, 解莉楠. 盐胁迫下植物 Na^+ 调节机制的研究进展 [J]. 生物技术通报, 2019, 35(7): 148–155. doi: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2019-0088.]
- [6] TANG L X, LI Y. Effects of sodium chloride application on major mineral nutrient elements in leaves of coconut seedlings [J]. Trop Agric Sci Technol, 2024, 47(3): 16–20. [唐龙祥, 李阳. 施用氯化钠对椰子幼苗叶片主要矿质营养元素的影响 [J]. 热带农业科技, 2024, 47(3): 16–20. doi: 10.16005/j.cnki.tast.2024.03.004.]
- [7] LU J L. Plant Nutrition [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 13–16. [陆景陵. 植物营养学 [M]. 第 2 版, 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 13–16.]
- [8] CHU Q S, LIU G H, XING W. Concentrations of light metal elements in wetland plants and relationships with environmental factors in

- Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plant Sci J, 2021, 39(2): 121–131. [褚青帅, 刘贵华, 邢伟. 青藏高原湿地植物轻金属元素含量特征及其与环境因素的关系研究 [J]. 植物科学学报, 2021, 39(2): 121–131. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2021.20121.]
- [9] GUAN D S, LUO L. Chemical element concentrations of tropical plant leaves in Hainan Province [J]. Sci Silv Sin, 2003, 29(2): 28–32. [管东生, 罗琳. 海南热带植物叶片化学元素含量特征 [J]. 林业科学, 2003, 29(2): 28–32. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2003.02.005.]
- [10] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 50–51.
- [11] SARDANS J, PEÑUELAS J, COLL M, et al. Stoichiometry of potassium is largely determined by water availability and growth in Catalanian forests [J]. Funct Ecol, 2012, 26(5): 1077–1089. doi: 10.1111/j.1365-2435.2012.02023.x.
- [12] TANG R J, LUAN S. Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network [J]. Curr Opin Plant Biol, 2017, 39: 97–105. doi: 10.1016/j.pbi.2017.06.009.
- [13] ZHAO X, YANG X J, SHI Y, et al. Ion absorption and distribution of symbiotic *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress [J]. Acta Ecol Sin, 2014, 34(4): 963–972. [赵昕, 杨小菊, 石勇, 等. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征 [J]. 生态学报, 2014, 34(4): 963–972. doi: 10.5846/stxb201210091392.]
- [14] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428(6985): 821–827. doi: 10.1038/nature02403.
- [15] LI D D, FANG Z, DU H T, et al. Distribution characteristics of carbon and nitrogen in herbaceous plants leaves and soil of different vegetation belts in the Loess Plateau [J]. J Plant Nutr Fert, 2019, 25(5): 841–850. [李冬冬, 方昭, 杜好田, 等. 黄土高原不同植被带草本植物叶片与土壤碳氮分布特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 841–850. doi: 10.11674/zwzf.18141.]
- [16] GU D Q, FU J, XIA D X. Littoral wetland types and their ecological vulnerability in Qinhuangdao area [J]. Coast Eng, 2005, 24(4): 35–41. [谷东起, 付军, 夏东兴. 秦皇岛地区滨海湿地类型及其生态脆弱性 [J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 35–41. doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2005.04.005.]
- [17] HUANG M Y, ZHANG Z Y, XU H, et al. Effects of cycle irrigation with brackish and fresh water and biochar on water and salt transports of coastal saline soil [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2021, 52(1): 238–247. [黄明逸, 张展羽, 徐辉, 等. 咸淡轮灌和生物炭对滨海盐渍土水盐运移特征的影响 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 238–247. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.027.]
- [18] LUO T, YANG X B, HUANG Y F, et al. Research progress of psammophilous vegetation on coasts in China [J]. Subtrop Plant Sci, 2008, 37(1): 70–75. [罗涛, 杨小波, 黄云峰, 等. 中国海岸沙生植被研究进展 [J]. 亚热带植物科学, 2008, 37(1): 70–75. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2008.01.020.]
- [19] ZHOU L L, QIAN R L, LI S B, et al. Leaf functional traits and nutrient resorption among major silviculture tree species in coastal sandy site [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(7): 2320–2328. [周丽丽, 钱瑞玲, 李树斌, 等. 滨海沙地主要造林树种叶片功能性状及养分重吸收特征 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2320–2328. doi: 10.13287/j.1001-9332.201907.007.]
- [20] LIU Y, CAO Y H, ZHANG Y F, et al. Nutrient release dynamics of litter in three forest types in coastal sandy land of south subtropical region [J]. J NW A&F Univ (Nat Sci), 2022, 50(8): 55–68. [刘易, 曹雨虹, 张艺帆, 等. 南亚热带滨海沙地3种林分类型凋落物的养分释放动态 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 55–68. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.08.007.]
- [21] LUO J, GENG J, WANG H X. Analysis on stoichiometric characteristics of N, P, K of five coastal sandy plants [J]. Mod Agric Sci Technol, 2020(10): 144–145. [骆娟, 耿静, 王宏信. 5种滨海沙生植物氮磷钾化学计量特征分析 [J]. 现代农业科技, 2020(10): 144–145. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2020.10.093.]
- [22] QIU L J, HE Z M, HU H T, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in different tree species in a sandy coastal plain area [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2017, 23(3): 555–559. [邱岭军, 何宗明, 胡欢甜, 等. 滨海沙地不同树种碳氮磷化学计量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 555–559. doi: 10.3724/SP.J.1145.2016.08017.]
- [23] WANG S F, HU Y X, LI Z L, et al. Effects of NaCl stress on growth and mineral ion uptake, transportation and distribution of *Quercus virginiana* [J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(17): 4609–4616. [王树凤, 胡韵雪, 李志兰, 等. 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿物质离子吸收、运输和分配的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4609–4616. doi: 10.20103/j.stxb.2010.17.009.]
- [24] WANG Z M, LIU X C, XUE L, et al. Leaf element and soil nutrient of garden plants and their stoichiometry in Nansha, Guangzhou [J]. J SW For Univ (Nat Sci), 2017, 37(2): 95–102. [王卓敏, 刘小川, 薛立, 等. 广州南沙园林植物叶片与土壤养分及化学计量特征研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(2): 95–102. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2017.02.016.]
- [25] LI X K, SU Z M. The geochemical characteristics of soil elements of strata in southwestern Guangxi [J]. Guangxi Sci, 2001, 8(4): 301–307.

- [李先琨, 苏宗明. 桂西南不同地层土壤的元素地球化学特征 [J]. 广西科学, 2001, 8(4): 301–307. doi: 10.3969/j.issn.1005-9164.2001.04.016.]
- [26] CUI P X, SHEN Z H, FU P L, et al. Comparison of foliar element contents of plants from natural forests with different substrates in southern China [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(24): 9148–9163. [崔培鑫, 申智骅, 付培立, 等. 中国南方生长于不同基质的天然林植物叶片元素含量特征比较 [J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9148–9163. doi: 10.5846/stxb202001160138.]
- [27] HUANG X Q, GAN H Y, HE H J, et al. Distribution and cation exchange capacity of Ca^{2+} in shallow underground water in Hainan Island coastal area [J]. J Water Resour Water Eng, 2017, 28(4): 50–57. [黄向青, 甘华阳, 何海军, 等. 海南岛滨海地区浅层地下水 Ca^{2+} 的分布和阳离子交换分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 50–57. doi: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.04.09.]
- [28] ZHENG S J, JIN Y F, DONG Q, et al. Effects of different ratios of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on the growth and leaf nutrient content of *Cypomandra betacea* seedlings [J]. Soil Fertil Sci China, 2024(7): 108–122. [郑绍傑, 金友帆, 董琼, 等. 氮磷钾不同配比施肥对树番茄幼苗生长及叶片养分含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 108–122. doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23499.]
- [29] JANG Q L. Comparisons of element distribution characteristics and salt tolerance between true mangroves and mangrove associates [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007. [蒋巧兰. 真红树和半红树体内元素分布及耐盐差异的比较研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.]
- [30] WANG X, LIU J K, LUO S X, et al. Difference of leaf functional traits of coastal psammophytes in Hainan Island and its relationship with soil chemical properties [J]. J Trop Subtrop Bot, 2022, 30(5): 708–717. [王旭, 刘敬坤, 罗水星, 等. 海南岛滨海沙生植物叶片功能性状分异及其与土壤因子的关系 [J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(5): 708–717. doi: 10.11926/jtsb.4519.]
- [31] ZHENG Q E. A study of biological characteristics of invisibility in exotic species *Chromolaena odorata* & *Eupatorium adenophorum* [D]. Nanning: Guangxi University, 2006. [郑启恩. 外来种飞机草和紫茎泽兰的入侵生物学特征研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2006.]
- [32] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. Ecol Lett, 2011, 14(8): 788–796. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01641.x.
- [33] SCHREEG L A, SANTIAGO L S, WRIGHT S J, et al. Stem, root, and older leaf N:P ratios are more responsive indicators of soil nutrient availability than new foliage [J]. Ecology, 2014, 95(8): 2062–2068. doi: 10.1890/13-1671.1.
- [34] YAN Z B, GUAN H Y, HAN W X, et al. Reproductive organ and young tissues show constrained elemental composition in *Arabidopsis thaliana* [J]. Ann Bot, 2016, 117(3): 431–439. doi: 10.1093/aob/mcv190.
- [35] WALKER D J, LEIGH R A, MILLER A J. Potassium homeostasis in vacuolate plant cells [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93(19): 10510–10514. doi: 10.1073/pnas.93.19.10510.
- [36] WU S J, WANG B B, WANG W Q. Study on the nutrients retranslocation of mangroves during leaf senescence [J]. J Quanzhou Norm Univ, 2012, 30(6): 47–52. [吴世军, 王赞博, 王文卿. 红树植物叶片衰老过程中养分的内吸收 [J]. 泉州师范学院学报, 2012, 30(6): 47–52. doi: 10.3969/j.issn.1009-8224.2012.06.012.]
- [37] RENGASAMY P. World salinization with emphasis on Australia [J]. J Exp Bot, 2006, 57(5): 1017–1023. doi: 10.1093/jxb/erj108.
- [38] JIANG S J, TANG Y J, ZHAO P. Correlated absorbion between Sr or Cs and other elements of plants [J]. Hubei Agric Sci, 2012, 51(21): 4752–4755. [江世杰, 唐永金, 赵萍. 植物吸收 Sr、Cs 与其他元素的相关性研究 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51(21): 4752–4755. doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2012.21.005.]
- [39] HU W, LV X B, YANG J S, et al. Effects of potassium deficiency on antioxidant metabolism related to leaf senescence in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Field Crops Res, 2016, 191: 139–149. doi: 10.1016/j.fcr.2016.02.025.
- [40] LUO Y, GONG L, ZHU M L, et al. Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert [J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(24): 8326–8335. [罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8326–8335. doi: 10.5846/stxb201611222379.]
- [41] XUE X X, WU X P, WANG W B, et al. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system [J]. Soils, 2019, 51(1): 1–10. [薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展 [J]. 土壤, 2019, 51(1): 1–10. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2019.01.001.]