

张少平, 李洲, 练冬梅, 等. 基于代谢组学分析马齿苋根茎叶中 4 种重要次生代谢产物 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (12): 1414–1421.

ZHANG S P, LI Z, LIAN D M, et al. Metabolome Analysis on Four Important Secondary Metabolites in Roots, Stems, and Leaves of *Portulaca oleracea* L. [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (12): 1414–1421.

基于代谢组学分析马齿苋根茎叶中 4 种重要次生代谢产物

张少平, 李洲, 练冬梅, 姚运法, 赖正锋, 吴松海, 鞠玉栋*, 洪建基*

(福建省农业科学院亚热带农业研究所, 福建漳州 363005)

摘要:【目的】探究马齿苋重要次生代谢产物成分及其在不同部位相对含量及联系。【方法】以马齿苋根茎叶为研究对象, 利用高效液相色谱串联质谱进行代谢组学分析。【结果】马齿苋中生物碱、类黄酮、香豆素与木脂素以及萜类所含的种类及化合物分别有 3 类 43 种、7 类 34 种、2 类 16 种和 3 类 5 种, 热图分析表明, 这 4 类次生代谢产物在马齿苋茎和叶中的相对含量较根部更为接近; 生物碱在根部和叶部总体含量较高; 类黄酮在茎部总体含量较高; 萜类以及香豆素与木脂素在根茎叶部含量依次递增。【结论】马齿苋不同部位所含生物碱、类黄酮、香豆素与木脂素以及萜类种类相同, 但相同成分在不同部位含量差异较大。

关键词: 马齿苋; 代谢组学; 代谢产物; 化合物; 成分分析

中图分类号: S 567

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 12-1414-08

Metabolome Analysis on Four Important Secondary Metabolites in Roots, Stems, and Leaves of *Portulaca oleracea* L.

ZHANG Shaoping, LI Zhou, LIAN Dongmei, YAO Yunfa, LAI Zhengfeng, WU Songhai, JU Yudong*, HONG Jianji*

(Subtropical Agriculture Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Zhangzhou, Fujian 363005, China)

Abstract: 【Objective】Contents and interrelations of 4 important secondary metabolites in parts of a *Portulaca oleracea* L. plant were studied. 【Method】Metabolomics of *P. oleracea* root, stem, and leaf were analyzed using high performance liquid chromatography combined with tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS). 【Result】There were 3 categories of 43 alkaloids, 7 categories of 34 flavonoids, 2 categories of 16 lignans and coumarins, and 3 categories of 5 terpenoids identified in the metabolites. A heatmap analysis showed the relative contents of the 4 important secondary metabolites to be similar in the stems and leaves but different from what in the roots. The alkaloids content was higher in the roots and leaves, while the flavonoids in the stems. Whereas the contents of terpenoids, lignans, and coumarins were increasingly more abundant from the roots to the stems and the leaves. 【Conclusion】Same in kind, but significantly different in quantity, on the alkaloids, flavonoids, terpenoids, lignans, and coumarins were found in the roots, stems, and leaves of a *P. oleracea* plant.

Key words: *Portulaca oleracea* L.; metabolome; secondary metabolites; compounds; component analysis

0 引言

【研究意义】植物次生代谢产物包括生物碱、萜类及类黄酮等, 这些次生代谢产物不仅有益植物自身对逆境的忍耐力, 同时, 也是人类生活必不可少的重要物质, 涉及营养保健、天然色素、天然药

物或者药物前体等应用^[1]。马齿苋科马齿苋属马齿苋 (*Portulaca oleracea* L.) 被列为首批 78 种药食同源植物之一^[2], 广泛分布于我国大江南北以及东南亚、南亚、中东、中欧等世界各地^[3-5]。马齿苋富含生物碱、萜类、黄酮类以及香豆素与木脂素等重要次生代谢产物, 但不同地区马齿苋品种不同, 相关次生

收稿日期: 2021-03-16 初稿; 2021-08-10 修改稿

作者简介: 张少平 (1975-), 男, 高级农艺师; 研究方向: 特色蔬菜次生代谢产物相关研究 (E-mail: zspnc@163.com)

* 通信作者: 鞠玉栋 (1976-), 男, 副研究员, 研究方向: 特色蔬菜相关研究 (E-mail: 303443553@qq.com); 洪建基 (1967-), 男, 研究员, 研究方向: 特色蔬菜相关研究 (E-mail: 76227508@qq.com)

基金项目: 福建省科技计划公益类专项 (2020R1030001)

代谢产物含量也略有差异^[6]。【前人研究进展】传统上，人们习惯将马齿苋作为野菜或中草药来使用^[7,8]，现代研究证实其含有生物碱、黄酮类、萜类及香豆素类等重要次生代谢产物活性成分^[9-12]，具有降血糖血脂、预防心血管疾病、增强人体免疫力、抗过敏、抗菌、抗病毒、抗衰老、抗肿瘤及抗动脉粥样硬化等多种功效^[13-15]。马齿苋的化学成分复杂，种类较多，目前有大量关于马齿苋化学成分测定及提取等研究报道^[16,17]，但由于提取技术原因，导致所测马齿苋成分不全^[18,19]。同时，不同地区的马齿苋野生种群间存在成分差异，同一种群马齿苋受土壤及气候条件等影响，具体成分或含量也有差异^[20]。【本研究切入点】代谢组学是对生物体在某一生理时期，相对分子量在 1000 以内的小分子代谢物系统进行分析的一门新型学科^[21,22]。因此采用该技术可准确分析马齿苋根茎叶在某一生理时期重要次生代谢产物的具体成分和相对含量。【拟解决的关键问题】本研究以福建闽南及广东潮汕等地区常见马齿苋野生种为研究对象，利用高效液相色谱串联质谱（UPLC-MS/MS）进行叶、茎和根代谢组学分析，以期系统获取马齿苋中生物碱、类黄酮、香豆素与木脂素以及萜类等重要次生代谢产物的具体成分和相对含量，为进一步进行马齿苋相关功效成分提取利用等研究工作打下良好基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在夏季 7 月中旬，从福建省农业科学院亚热带农业研究所种质资源圃采取长势茂盛的绿叶、红茎和白根的马齿苋野生种，取根、茎和叶各 3 个生物样重复，每份约 60 g，用 75% 酒精洗净甩干后装入自封袋标号，快速保存于 -80 ℃ 超低温冰箱备用。

1.2 试验方法

1.2.1 样品提取 从 -80 ℃ 超低温冰箱取出待测样品于冻干机中真空冷冻干燥后，利用研磨仪在 30 Hz 频率下研磨干燥样品 1.5 min 至粉末状；每个样品粉末各称取 100 mg 溶解于 0.6 mL 70% 的甲醇提取液；为提高提取率，样品提取液需放置于 4 ℃ 冰箱过夜且期间涡旋 6 次；进一步在转速 10 000 g 离心 10 min 后取上清液，用 0.22 μm pore size 微孔滤膜过滤样品后保存于进样瓶中，用于 UPLC-MS/MS 测试分析。

1.2.2 色谱分析 利用超高效液相色谱（Shim-pack UFLC SHIMADZU CBM30A，<https://www.shimadzu.com.cn/>）分析马齿苋样品所需条件为：色谱柱（1.8 μm，2.1×100 mm）流动相 A 相和 B 相皆为加入 0.04% 乙酸的超纯水和乙腈。洗脱梯度中 5%~95% B 相，

0~10 min；95% B 相维持 10~11 min；95%~5% B 相，11~11.1 min；5% B 相维持至 14 min。液相色谱流速为 0.35 mL·min⁻¹；柱温维持在 40 ℃ 条件；进样量为 4 μL。

1.2.3 串联质谱分析 串联质谱（Applied Biosystems 4500 QTRAP，<http://www.appliedbiosystems.com.cn/>）条件中电喷雾离子源（ESI）温度为 550 ℃，质谱电压在 5500 V 下，帘气（CUR）压力为 30 psi，碰撞诱导电离（CAD）时所设置的参数为高。三重串联四级杆质谱（QQQ）原理中，通过优化的去簇电压（DP）及碰撞能（CE）进行每个离子对扫描检测^[23]。

1.2.4 代谢物的定性与定量 根据百迈客科技有限公司所建的采用化学标品或同公共库的二级谱图进行比对建立的数据库 MWDB（metware database），通过二级谱信息进行代谢物的定性，分析时去除了 K⁺、Na⁺、NH₄⁺ 及大分子量物质的碎片离子等同位素重复信号。利用软件 Analyst 1.6.3 处理质谱数据。同时，利用 QQQ 质谱的多反应监测模式（MRM）进行代谢物定量。在 MRM 模式中，通过四级杆筛选代谢物母离子时，需排除其他分子量物质对应的离子。母离子经电离后断裂形成的碎片离子，再通过 QQQ 过滤选择，获得所需要的一个特征碎片离子。以上定性定量后获得马齿苋根、茎和叶各 3 个样本的代谢物质谱分析数据后，对所有物质质谱峰进行峰面积积分和积分校正，具体步骤详见参考文献^[24]。

1.2.5 数据统计分析 利用 WIN7 DPS 7.05 版软件对数据进行统计学分析，采用 LSD 法进行多重比较，字母表示结果取 5% 显著水平。

2 结果与分析

2.1 马齿苋 4 种次生代谢产物分析

在马齿苋根茎叶各 3 个生物学重复共 9 个样品中，检测到化合物有生物碱类 43 种、黄酮类 34 种、香豆素与木脂素 16 种、萜类化合物 5 种。在马齿苋根茎叶中进行相关代谢产物相对含量热图分析，结果表明（图 1）：以上 4 类次生代谢产物在茎和叶中的相对含量较根部更为接近；生物碱在根部和叶部含量高于茎部；类黄酮在茎部含量高于根部和叶部；香豆素与木脂素以及萜类在根茎叶部含量依次递增。

2.2 43 种生物碱分析

通过化学标准品验证或通过公共库的二级谱图进行比对，共获取 43 种生物碱，分为酚胺、生物碱及吲哚类生物碱等 3 类（表 1），其化合物分别有 12、25 和 6 种。这些化合物中，N-反/顺式阿魏酰酪胺在根部含量较高；马齿苋酰胺 B 和胆碱在叶部含量较高；而 N'-阿魏酰腐胺、马齿苋酰胺 C 和 2,4-二

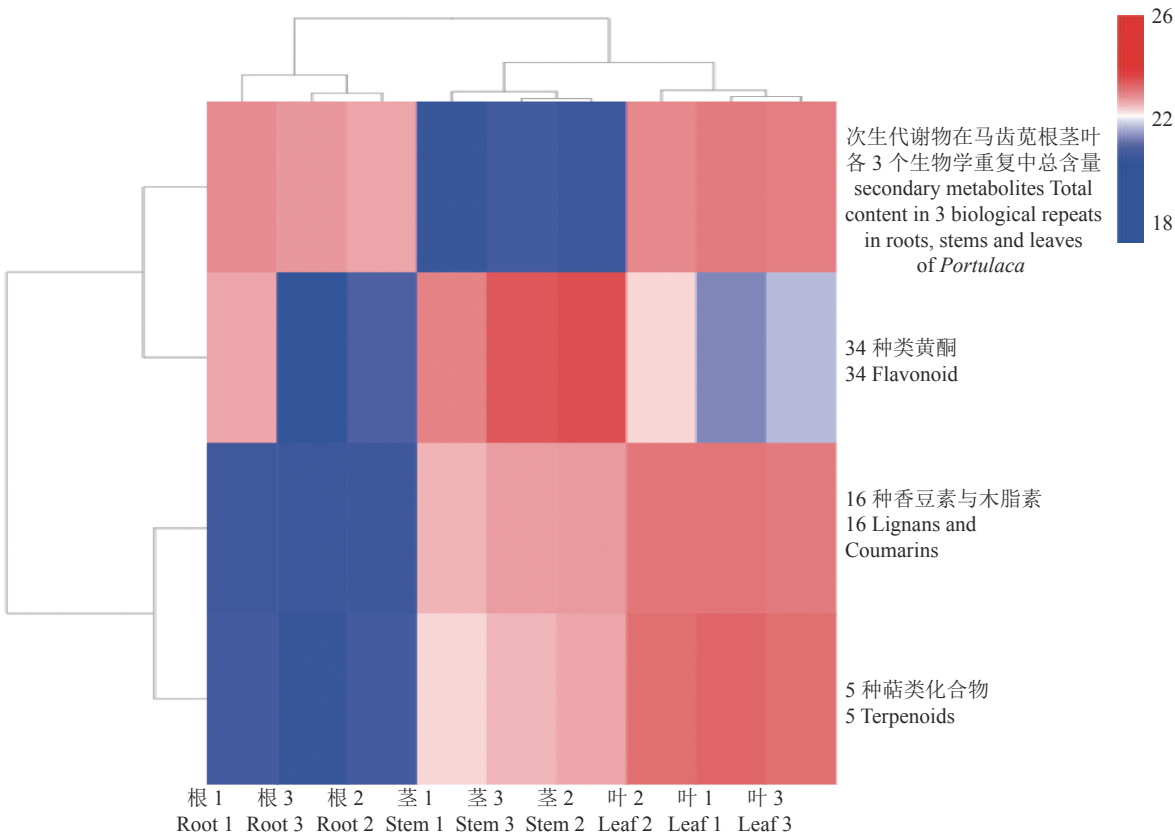


图 1 马齿苋根、茎和叶中 4 类次生代谢产物热图分析

Fig. 1 Heatmap of 4 secondary metabolites in roots, stems, and leaves of *P. oleracea* plant

羟基-7-甲氧基-1,4-苯并恶嗪-3-酮在根部含量极低，5-羟基吲哚-3-乙酸在叶部含量极低。

2.3 34 种黄酮类分析

相关研究方法所获取的 34 种黄酮类化合物中，分为 6 类（表 2），具体包括：黄烷醇、异黄酮、黄酮碳糖苷、黄酮醇、黄酮、二氢黄酮醇和花青素，

其化合物分别为 4、2、6、9、10、1 和 2 种。这些化合物中，山柰酚 3-O-β-(2"-O-乙酰基-β-D-葡萄糖醛酸) 和橙皮素 O-丙二酰基己糖苷在茎和叶部含量均较高；而含量较低的化合物较多，其中叶部 3 种、茎部 2 种、根部 10 种。

表 1 43 种生物碱及其相对含量
Table 1 Components and relative contents of 43 alkaloids

次生代谢物 Metabolites	化合物 Compound	化学式 Formula	保留时间 Rt/min	相对含量 The relative contents		
				叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
酚胺 Phenolamine	N-反式阿魏酰酪胺	C18H19NO4	5.26	$1.91 \times 10^6 \pm 2.89 \times 10^5 \text{b}$	$2.33 \times 10^6 \pm 1.87 \times 10^5 \text{b}$	$1.36 \times 10^7 \pm 1.10 \times 10^6 \text{a}$
	N-顺式阿魏酰酪胺	C18H19NO4	5.41	$1.90 \times 10^6 \pm 2.07 \times 10^5 \text{b}$	$2.29 \times 10^6 \pm 1.80 \times 10^5 \text{b}$	$1.40 \times 10^7 \pm 1.23 \times 10^6 \text{a}$
	N'-阿魏酰腐胺	C14H20N2O3	2.94	$1.15 \times 10^4 \pm 5.00 \times 10^3 \text{a}$	$6.44 \times 10^3 \pm 3.97 \times 10^2 \text{a}$	$9.00 \pm 0.00 \text{b}$
	多巴胺	C8H11NO2	1.34	$1.82 \times 10^6 \pm 5.20 \times 10^5 \text{b}$	$7.09 \times 10^5 \pm 3.34 \times 10^4 \text{c}$	$4.73 \times 10^6 \pm 5.70 \times 10^5 \text{a}$
	精胺	C10H26N4	1.10	$4.45 \times 10^6 \pm 7.39 \times 10^5 \text{a}$	$1.46 \times 10^6 \pm 1.21 \times 10^5 \text{c}$	$2.06 \times 10^6 \pm 2.88 \times 10^5 \text{b}$
	N',N'',N'''-对香豆酰阿魏酰咖啡酰亚精胺	C34H37N3O6	2.99	$6.15 \times 10^4 \pm 7.69 \times 10^3 \text{a}$	$5.72 \times 10^3 \pm 1.81 \times 10^3 \text{c}$	$1.82 \times 10^4 \pm 4.13 \times 10^3 \text{b}$
	N-(4-O-(β-D-吡喃葡萄糖基)-E-阿魏洛基)-酪胺	C24H29NO9	4.28	$1.08 \times 10^5 \pm 1.99 \times 10^4 \text{a}$	$1.39 \times 10^5 \pm 2.90 \times 10^4 \text{a}$	$2.68 \times 10^4 \pm 8.49 \times 10^3 \text{b}$
	N-z-对香豆酰酪胺	C17H17NO3	5.13	$2.83 \times 10^5 \pm 1.63 \times 10^4 \text{b}$	$4.54 \times 10^5 \pm 9.70 \times 10^4 \text{a}$	$3.14 \times 10^5 \pm 1.03 \times 10^5 \text{ab}$
	N-顺式-对香豆酰酪胺	C17H17NO3	5.37	$6.77 \times 10^5 \pm 4.22 \times 10^4 \text{ab}$	$8.66 \times 10^5 \pm 1.61 \times 10^5 \text{a}$	$6.32 \times 10^5 \pm 1.79 \times 10^5 \text{b}$

续上表

次生代谢物 Metabolites	化合物 Compound	化学式 Formula	保留时间 Rt/min	相对含量 The relative contents		
				叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
	N-顺式-芥子酰酯胺	C17H17NO3	5.32	$6.92 \times 10^5 \pm 4.79 \times 10^4$ a	$8.95 \times 10^5 \pm 1.51 \times 10^5$ a	$6.52 \times 10^5 \pm 1.96 \times 10^5$ a
	甲氧基-N-咖啡酰丁胺	C18H19NO4	5.41	$8.66 \times 10^5 \pm 1.25 \times 10^5$ b	$1.05 \times 10^6 \pm 9.63 \times 10^4$ b	$6.62 \times 10^6 \pm 5.79 \times 10^5$ a
	N-对香豆酰酯胺	C17H17NO3	2.29	$1.72 \times 10^4 \pm 1.05 \times 10^3$ ab	$2.25 \times 10^4 \pm 4.69 \times 10^3$ a	$1.55 \times 10^4 \pm 5.70 \times 10^3$ b
	马齿苋酰胺B	C25H27NO12	4.29	$1.74 \times 10^7 \pm 4.93 \times 10^5$ a	$4.64 \times 10^5 \pm 2.25 \times 10^5$ b	$3.01 \times 10^4 \pm 5.22 \times 10^4$ b
	胆碱	C31H37NO17	1.24	$1.40 \times 10^7 \pm 3.79 \times 10^5$ a	$5.35 \times 10^6 \pm 2.80 \times 10^5$ c	$9.74 \times 10^6 \pm 2.64 \times 10^5$ b
	马齿苋酰胺C	C24H25NO11	3.79	$7.97 \times 10^6 \pm 6.21 \times 10^5$ a	$3.82 \times 10^5 \pm 1.45 \times 10^5$ b	9.00±0.00 b
	2,4-二羟基-7-甲氧基-1,4-苯并恶 嗪-3-酮	C5H13 NO	2.77	$2.52 \times 10^5 \pm 1.61 \times 10^4$ a	$8.53 \times 10^3 \pm 8.15 \times 10^2$ b	9.00±0.00 b
	马齿苋酰胺D	C15H19NO10	3.91	$3.03 \times 10^6 \pm 1.81 \times 10^5$ a	$4.58 \times 10^5 \pm 8.66 \times 10^4$ b	$1.27 \times 10^4 \pm 1.19 \times 10^4$ c
	马齿苋酰胺A	C30H35NO16	4.17	$8.11 \times 10^6 \pm 7.26 \times 10^5$ a	$1.70 \times 10^5 \pm 1.95 \times 10^5$ b	9.00±0.00 b
	N-乙酰-5-羟基色胺	C12H14N2O2	3.73	$7.45 \times 10^5 \pm 3.53 \times 10^4$ a	$1.88 \times 10^5 \pm 1.95 \times 10^4$ b	$1.53 \times 10^5 \pm 1.32 \times 10^4$ b
	DL-2-氨基己二酸	C6H11NO4	1.30	$5.01 \times 10^4 \pm 5.57 \times 10^3$ a	$2.92 \times 10^4 \pm 1.36 \times 10^4$ ab	$1.82 \times 10^4 \pm 1.22 \times 10^4$ b
	7,8-二甲基咯嗪	C12H10N4O2	4.96	$2.27 \times 10^4 \pm 1.54 \times 10^3$ a	$2.42 \times 10^4 \pm 3.58 \times 10^3$ a	$1.29 \times 10^4 \pm 2.15 \times 10^3$ b
	氨基嘌呤	C5H5N5	2.39	$5.50 \times 10^5 \pm 7.85 \times 10^4$ a	$7.71 \times 10^4 \pm 2.46 \times 10^4$ b	$1.04 \times 10^5 \pm 2.60 \times 10^4$ b
	10-甲酰四氢叶酸	C20H23N7O7	2.92	$1.93 \times 10^6 \pm 6.66 \times 10^4$ b	$9.89 \times 10^5 \pm 1.73 \times 10^5$ c	$2.75 \times 10^6 \pm 2.89 \times 10^5$ a
	椰油酰胺丙基甜菜碱	C19H38N2O3	7.03	$5.30 \times 10^4 \pm 4.09 \times 10^4$ a	$2.40 \times 10^4 \pm 1.36 \times 10^4$ a	$2.83 \times 10^4 \pm 6.01 \times 10^3$ a
	葫芦巴碱	C7H7NO2	1.29	$3.01 \times 10^6 \pm 7.83 \times 10^5$ a	$1.87 \times 10^6 \pm 2.95 \times 10^5$ b	$9.90 \times 10^5 \pm 1.24 \times 10^5$ b
生物碱 Phenolamine	1-(二羟基苯基)-N 2,N 3-双(4-羟 基苯乙基)-(5-8)-二甲氧基-1,2-二 氢萘-2,3-二甲酰胺	C36H36N2O8	5.75	$2.86 \times 10^5 \pm 4.64 \times 10^4$ b	$2.93 \times 10^5 \pm 1.76 \times 10^4$ b	$1.92 \times 10^6 \pm 1.01 \times 10^5$ a
	(5-8)-羟基-1-(羟基二甲氧基苯基)- N2,N3-双(4-羟基苯乙基)-(5-8)-二 甲氧基-1,2-二氢萘-2,3-二甲酰胺	C38H40N2O10	5.75	$4.98 \times 10^4 \pm 1.01 \times 10^4$ b	$1.87 \times 10^4 \pm 3.84 \times 10^3$ b	$4.05 \times 10^5 \pm 7.24 \times 10^4$ a
	(5-8)-羟基-1-(羟基甲氧基苯基)- N2,N3-双(4-羟基苯乙基)-(5-8)-二 甲氧基-1,2-二氢萘-2,3-二甲酰胺	C37H38N2O9	5.82	$9.40 \times 10^4 \pm 1.75 \times 10^4$ b	$6.42 \times 10^4 \pm 5.50 \times 10^3$ b	$7.66 \times 10^5 \pm 9.07 \times 10^4$ a
	6-脱氧芥菜碱	C6H13NO2	1.70	$1.73 \times 10^6 \pm 4.45 \times 10^5$ a	$6.85 \times 10^5 \pm 1.05 \times 10^5$ b	$2.02 \times 10^5 \pm 7.26 \times 10^4$ b
	咖啡酰胆碱 5-葡萄糖苷	C20H30NO9+	2.62	$2.01 \times 10^4 \pm 7.51 \times 10^2$ a	$3.21 \times 10^3 \pm 3.36 \times 10^2$ b	$3.14 \times 10^3 \pm 6.87 \times 10^2$ b
	大海米酰胺	C36H36N2O8	5.76	$7.68 \times 10^5 \pm 8.64 \times 10^4$ b	$8.45 \times 10^5 \pm 6.07 \times 10^4$ b	$7.34 \times 10^6 \pm 4.58 \times 10^5$ a
	3-(2-氨基乙氧基)(羟基)磷酸]氧 基-2-12-十八碳二酸酯	C23H44NO7 P	7.40	$3.17 \times 10^6 \pm 2.81 \times 10^5$ a	$3.29 \times 10^5 \pm 6.10 \times 10^4$ c	$8.50 \times 10^5 \pm 1.24 \times 10^5$ b
	2-羟基-5,8,11,14,17-二十烷氧 基]丙基-2-(三甲铵)磷酸乙酯	C28H48NO7 P	7.43	$2.84 \times 10^6 \pm 4.42 \times 10^5$ a	$6.35 \times 10^5 \pm 1.67 \times 10^5$ c	$8.55 \times 10^5 \pm 1.38 \times 10^5$ b
	3-羟丙基棕榈酸酯葡萄糖胺	C31H61O14 N	7.70	$1.99 \times 10^6 \pm 3.54 \times 10^5$ ab	$5.08 \times 10^5 \pm 7.22 \times 10^4$ b	$3.52 \times 10^6 \pm 1.35 \times 10^6$ a
	3-(2-氨基乙氧基)(羟基)磷酸]氧 基-2-羟丙基棕榈酸酯	C21H44NO7 P	7.76	$3.12 \times 10^6 \pm 5.07 \times 10^5$ b	$3.27 \times 10^6 \pm 4.92 \times 10^5$ b	$7.57 \times 10^6 \pm 8.31 \times 10^5$ a
	双(N,N-二乙基乙胺基)-2-乙酰氨 基-1,5-无水-2-脱氧-1-[羟基(磷 酸)甲基]-D-葡萄糖醇	C21H48N3O9 P	7.81	$8.17 \times 10^5 \pm 1.93 \times 10^5$ a	$3.81 \times 10^5 \pm 5.77 \times 10^4$ b	$6.07 \times 10^5 \pm 9.83 \times 10^4$ ab
	N-苯亚甲基异甲胺	C8H9 N	2.42	$7.08 \times 10^6 \pm 4.10 \times 10^5$ a	$2.68 \times 10^6 \pm 2.71 \times 10^5$ b	$3.11 \times 10^6 \pm 1.27 \times 10^5$ b
	5-羟基吡啶-3-乙酸	C10H9 NO	3.45	9.00±0.00 b	$1.49 \times 10^4 \pm 2.75 \times 10^3$ b	$9.07 \times 10^4 \pm 1.37 \times 10^4$ a
	色胺	C10H12N2	3.22	$5.63 \times 10^5 \pm 4.91 \times 10^4$ a	$2.59 \times 10^5 \pm 1.22 \times 10^4$ b	$5.91 \times 10^5 \pm 1.49 \times 10^5$ a
	吡啶-5-羧酸	C9H7NO2	4.82	$6.46 \times 10^4 \pm 1.80 \times 10^3$ a	$2.06 \times 10^4 \pm 2.52 \times 10^3$ b	$2.33 \times 10^4 \pm 2.10 \times 10^3$ b
吡啶类生物碱 Plumerane	吡啶-3-甲醛	C9H7NO3	4.99	$2.43 \times 10^5 \pm 1.67 \times 10^4$ a	$5.63 \times 10^4 \pm 1.11 \times 10^4$ c	$8.82 \times 10^4 \pm 1.17 \times 10^3$ b
	3-吡啶甲酸	C9H7NO2	4.89	$1.02 \times 10^5 \pm 6.37 \times 10^3$ a	$3.43 \times 10^4 \pm 6.10 \times 10^3$ b	$3.87 \times 10^4 \pm 5.56 \times 10^3$ b
	吡啶	C8H7 N	2.97	$8.16 \times 10^4 \pm 5.05 \times 10^3$ a	$1.87 \times 10^4 \pm 3.21 \times 10^2$ b	$1.53 \times 10^4 \pm 5.29 \times 10^3$ b

注：数据后同行不同小写字母表示不同部位同一处理之间差异显著 ($p<0.05$)。表2至4同。
Note: The different lowercase letters in the same row from different parts with the same treated indicate significant differences($p<0.05$).The same as Table 2-4.

表 2 34 种黄酮类及其相对含量
Table 2 Components and relative contents of 34 flavonoids

次生代谢物 Metabolites	化合物 Compound	化学式 Formula	保留时间 Rt (min)	相对含量 The relative contents		
				叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
黄烷醇类 Flavanols	没食子酸	C7H6O5	2.25	$3.25 \times 10^4 \pm 1.01 \times 10^4$ a	$3.33 \times 10^4 \pm 8.10 \times 10^3$ a	9.00 ± 0.00 b
	原儿茶酸	C7H6O4	3.51	$5.48 \times 10^5 \pm 5.55 \times 10^4$ a	$1.93 \times 10^5 \pm 3.20 \times 10^4$ c	$4.68 \times 10^5 \pm 6.73 \times 10^4$ a
	4-甲基儿茶酚	C7H8O2	4.52	$9.55 \times 10^3 \pm 3.09 \times 10^3$ b	$5.48 \times 10^3 \pm 2.55 \times 10^3$ b	$2.94 \times 10^5 \pm 1.32 \times 10^5$ a
	原儿茶醛	C7H6O3	3.05	$7.29 \times 10^4 \pm 9.21 \times 10^3$ b	$5.84 \times 10^4 \pm 5.36 \times 10^3$ b	$1.15 \times 10^6 \pm 1.32 \times 10^5$ a
异黄酮 Isoflavones	大豆苷	C21H20O9	4.02	$5.57 \times 10^4 \pm 8.95 \times 10^3$ a	9.00 ± 0.00 b	9.00 ± 0.00 b
	毛蕊黄酮苷	C22H22O10	4.27	$2.66 \times 10^5 \pm 4.44 \times 10^4$ a	$4.35 \times 10^4 \pm 2.06 \times 10^4$ a	9.00 ± 0.00 b
黄酮碳糖苷 Flavonoid carbonoside	异荭草素	C28H34O16	3.96	9.00 ± 0.00 b	$6.03 \times 10^3 \pm 4.13 \times 10^3$ a	$1.59 \times 10^4 \pm 6.47 \times 10^3$ a
	8-C-己糖基-橙皮素-O-己糖苷	C21H20O11	3.26	$6.26 \times 10^4 \pm 2.87 \times 10^3$ a	$1.42 \times 10^4 \pm 2.76 \times 10^3$ a	9.00 ± 0.00 b
	荭草苷	C21H20O11	3.96	$6.21 \times 10^3 \pm 2.38 \times 10^3$ b	$7.28 \times 10^3 \pm 5.64 \times 10^3$ b	$2.12 \times 10^4 \pm 6.62 \times 10^3$ a
	8-C-己糖基芹菜素-O-阿魏酰己糖苷	C37H38O18	3.37	$1.27 \times 10^4 \pm 1.48 \times 10^3$ a	$1.16 \times 10^4 \pm 1.92 \times 10^3$ a	$5.76 \times 10^3 \pm 7.49 \times 10^2$ b
	异柚葡萄糖苷	C21H22O10	4.22	$1.83 \times 10^4 \pm 1.65 \times 10^3$ b	$6.00 \times 10^4 \pm 2.99 \times 10^3$ a	$5.30 \times 10^4 \pm 7.43 \times 10^3$ a
	金雀异黄素 8-C-葡萄糖苷	C21H20O10	4.23	$2.19 \times 10^3 \pm 1.35 \times 10^3$ a	$1.08 \times 10^4 \pm 9.67 \times 10^3$ a	$1.54 \times 10^4 \pm 7.75 \times 10^3$ a
黄酮醇 Flavonols	山柰酚7-O-葡萄糖苷	C21H20O11	4.65	$2.53 \times 10^4 \pm 9.91 \times 10^3$ a	$1.09 \times 10^4 \pm 5.79 \times 10^3$ b	$4.99 \times 10^3 \pm 2.12 \times 10^2$ b
	槲皮素-3-O-葡萄糖苷	C21H20O12	4.48	$4.58 \times 10^3 \pm 3.71 \times 10^3$ a	$5.27 \times 10^3 \pm 2.89 \times 10^3$ a	$1.40 \times 10^4 \pm 7.87 \times 10^3$ a
	三叶豆甙	C21H20O11	4.49	$2.19 \times 10^4 \pm 8.76 \times 10^3$ a	$9.41 \times 10^3 \pm 1.82 \times 10^3$ b	9.00 ± 0.00 b
	紫云英苷	C21H20O11	4.66	9.00 ± 0.00 b	$1.75 \times 10^4 \pm 5.44 \times 10^3$ a	9.00 ± 0.00 b
	丁香亭3-O-己糖苷	C23H24O13	3.86	$3.71 \times 10^5 \pm 1.92 \times 10^4$ a	$1.23 \times 10^5 \pm 2.48 \times 10^4$ b	$1.20 \times 10^4 \pm 4.47 \times 10^3$ c
	3,7-二氧-甲基槲皮素	C17H14O7	6.36	$2.22 \times 10^5 \pm 3.36 \times 10^4$ c	$1.31 \times 10^6 \pm 6.61 \times 10^5$ b	$5.16 \times 10^6 \pm 6.21 \times 10^5$ a
	山柰酚3-O-β-(2"-O-乙酰基-β-D-葡萄糖醛酸)	C23H20O13	5.07	$5.04 \times 10^6 \pm 8.11 \times 10^5$ b	$4.76 \times 10^7 \pm 8.24 \times 10^6$ a	$5.12 \times 10^5 \pm 3.37 \times 10^5$ b
	异鼠李素3-O-β-(2"-O-乙酰基-β-D-葡萄糖醛酸)	C24H22O14	4.78	9.00 ± 0.00 b	$9.34 \times 10^3 \pm 3.00 \times 10^2$ a	9.00 ± 0.00 b
黄酮 Flavonoid	槲皮素3,7-二-O-β-D-葡萄糖苷	C27H30O17	3.37	$2.45 \times 10^4 \pm 1.38 \times 10^3$ a	$5.67 \times 10^3 \pm 2.37 \times 10^3$ b	9.00 ± 0.00 c
	马齿苋黄酮B	C19H20O6	6.53	$2.35 \times 10^6 \pm 1.76 \times 10^6$ a	$8.09 \times 10^4 \pm 7.38 \times 10^4$ a	$1.33 \times 10^5 \pm 1.98 \times 10^5$ a
	马齿苋黄酮A	C19H20O5	7.41	$1.88 \times 10^5 \pm 2.17 \times 10^5$ a	$9.11 \times 10^3 \pm 3.38 \times 10^3$ a	$3.71 \times 10^5 \pm 2.63 \times 10^5$ a
	马齿苋黄酮D	C17H16O5	7.49	$1.21 \times 10^6 \pm 8.02 \times 10^5$ a	$2.13 \times 10^4 \pm 1.07 \times 10^4$ a	$2.69 \times 10^6 \pm 2.68 \times 10^6$ a
	5,2'-二羟基-7-甲氧基黄酮	C16H14O5	7.25	$3.42 \times 10^4 \pm 2.06 \times 10^4$ a	9.00 ± 0.00 b	$2.02 \times 10^4 \pm 1.68 \times 10^4$ a
	2',4'-二羟基-4,6'-二甲氧基查尔酮	C17H16O5	7.60	$2.97 \times 10^6 \pm 1.51 \times 10^6$ a	$8.09 \times 10^4 \pm 4.96 \times 10^4$ b	$6.05 \times 10^6 \pm 6.57 \times 10^6$ ab
	马齿苋黄酮C	C18H18O6	7.05	$6.53 \times 10^6 \pm 2.84 \times 10^6$ a	$3.29 \times 10^5 \pm 2.83 \times 10^5$ b	$2.59 \times 10^6 \pm 3.18 \times 10^6$ ab
	麦黄酮O-丙二酰己糖苷	C26H26O15	5.00	$7.45 \times 10^4 \pm 3.94 \times 10^4$ b	$5.74 \times 10^4 \pm 1.41 \times 10^4$ b	$4.15 \times 10^5 \pm 2.01 \times 10^5$ a
	麦黄酮7-O-己糖苷	C23H24O12	4.74	$8.97 \times 10^5 \pm 5.23 \times 10^5$ b	$2.23 \times 10^5 \pm 6.89 \times 10^4$ b	$1.96 \times 10^6 \pm 6.26 \times 10^5$ a
	麦黄酮O-葡萄糖二酸	C23H22O14	4.24	$3.95 \times 10^5 \pm 2.40 \times 10^4$ a	$1.58 \times 10^5 \pm 2.22 \times 10^4$ b	$1.01 \times 10^5 \pm 2.50 \times 10^4$ c
二氢黄酮醇 Dihydroflavonol	芹菜素-3-O-α-L-鼠李糖苷	C22H24O8	3.68	$1.22 \times 10^6 \pm 7.02 \times 10^4$ a	$9.80 \times 10^3 \pm 2.43 \times 10^3$ b	9.00 ± 0.00 c
	橙皮素O-丙二酰基己糖苷	C21H21O12	4.49	$2.89 \times 10^6 \pm 1.63 \times 10^6$ a	$1.27 \times 10^6 \pm 9.36 \times 10^5$ ab	9.00 ± 0.00 b
花青素 Anthocyanins	飞燕草色素	C25H26O14	4.79	$2.11 \times 10^4 \pm 3.21 \times 10^3$ a	$1.78 \times 10^4 \pm 3.55 \times 10^3$ a	$1.14 \times 10^4 \pm 1.20 \times 10^3$ b
	花翠素3-O-葡萄糖苷	C15H11O7	2.88	$1.34 \times 10^4 \pm 2.25 \times 10^3$ a	$1.26 \times 10^4 \pm 2.51 \times 10^3$ a	$3.15 \times 10^3 \pm 1.69 \times 10^3$ b

2.4 16 种香豆素与木脂素分析

16 种香豆素与木脂素中，木脂素所含化合物为 10 种，香豆素所含化合物为 6 种（表 3）。这些化合物中，秦皮甲素和七叶苷在茎和叶中含量均较高；

松脂醇二葡萄糖苷在茎和根部含量显著低于叶部；丁香树脂酚-乙酰葡萄糖在茎部含量极低，丁香树脂酚-己糖在根部含量极低。

表 3 16 种香豆素与木脂素及其相关含量
Table 3 Components and relative contents of 16 lignans and coumarins

次生代谢物 Metabolites	化合物 Compound	化学式 Formula	保留时间 Rt/min	相对含量 The relative contents		
				叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
木脂素 Lignans	松脂醇-己糖	C26H32O11	4.67	$8.35 \times 10^5 \pm 5.48 \times 10^4$ a	$1.90 \times 10^5 \pm 4.30 \times 10^4$ b	$2.14 \times 10^4 \pm 8.16 \times 10^3$ c
	松脂醇-乙酰葡萄糖	C28H34O12	4.94	$5.39 \times 10^4 \pm 6.00 \times 10^3$ a	$2.31 \times 10^4 \pm 8.81 \times 10^3$ b	$7.61 \times 10^3 \pm 4.17 \times 10^3$ c
	丁香树脂酚-己糖	C28H36O13	4.69	$4.64 \times 10^5 \pm 2.54 \times 10^4$ a	$8.40 \times 10^4 \pm 3.71 \times 10^3$ b	9.00±0.00 c
	丁香树脂酚-乙酰葡萄糖	C30H38O14	4.89	$7.34 \times 10^3 \pm 3.00 \times 10^3$ a	9.00±0.00 a	$6.52 \times 10^3 \pm 8.79 \times 10^4$ a
	松脂醇	C20H22O6	3.86	$2.89 \times 10^4 \pm 2.10 \times 10^3$ c	$8.96 \times 10^4 \pm 2.80 \times 10^3$ b	$1.66 \times 10^5 \pm 9.13 \times 10^4$ b
	松脂醇二葡萄糖苷	C32H42O16	3.84	$2.81 \times 10^4 \pm 7.41 \times 10^3$ a	9.00±0.00 b	9.00±0.00 b
	1-羟基松脂素单葡萄糖苷	C26H32O12	4.26	$3.80 \times 10^4 \pm 1.80 \times 10^3$ b	$4.70 \times 10^4 \pm 5.09 \times 10^3$ b	$3.05 \times 10^5 \pm 1.56 \times 10^5$ a
	松脂醇单葡萄糖苷	C26H32O11	4.64	$8.92 \times 10^5 \pm 1.22 \times 10^5$ a	$2.11 \times 10^5 \pm 6.25 \times 10^4$ b	$2.57 \times 10^4 \pm 3.88 \times 10^3$ c
	皮树脂醇	C21H24O7	5.8	$2.99 \times 10^3 \pm 3.74 \times 10^2$ c	$6.05 \times 10^3 \pm 8.37 \times 10^2$ b	$1.94 \times 10^4 \pm 7.90 \times 10^3$ a
香豆素 Coumarins	丁香树脂酚	C22H26O8	5.71	$8.11 \times 10^3 \pm 1.11 \times 10^3$ b	$5.50 \times 10^3 \pm 8.76 \times 10^2$ b	$3.21 \times 10^4 \pm 5.78 \times 10^3$ a
	秦皮乙素	C9H6O4	3.69	$2.06 \times 10^5 \pm 1.67 \times 10^4$ a	$5.17 \times 10^4 \pm 3.74 \times 10^3$ b	$2.54 \times 10^4 \pm 1.22 \times 10^4$ c
	秦皮素	C10H8O5	4.07	$4.66 \times 10^4 \pm 7.28 \times 10^3$ b	$4.85 \times 10^5 \pm 6.66 \times 10^4$ a	$2.30 \times 10^4 \pm 1.97 \times 10^4$ b
	秦皮甲素	C15H16O9	3.21	$4.42 \times 10^6 \pm 2.11 \times 10^5$ a	$2.95 \times 10^6 \pm 4.21 \times 10^5$ b	$5.06 \times 10^4 \pm 2.60 \times 10^4$ c
	瑞香素	C9H6O4	3.85	$3.31 \times 10^4 \pm 6.55 \times 10^3$ a	$8.55 \times 10^3 \pm 2.67 \times 10^3$ b	$4.30 \times 10^3 \pm 1.28 \times 10^4$ b
	七叶苷	C15H16O9	3.33	$4.09 \times 10^6 \pm 3.27 \times 10^5$ a	$2.73 \times 10^6 \pm 4.33 \times 10^5$ b	$2.57 \times 10^4 \pm 1.49 \times 10^4$ c
	茵芋苷	C15H16O8	3.33	$5.38 \times 10^5 \pm 3.89 \times 10^4$ b	$6.61 \times 10^5 \pm 4.90 \times 10^4$ a	9.00±0.00 c

2.5 5 种萜类化合物分析

5 种萜类化合物包括 3 种倍半萜以及三萜和三萜皂苷各 1 种（表 4）。这些化合物中，獐牙菜苷在叶

部含量较高，獐牙菜苦苷在茎叶部含量均较高；3'-O-D-葡萄糖酰龙胆苦苷在根部含量极低，铁冬青酸在茎和叶部含量均极低。

表 4 5 种萜类化合物分析及其相关含量
Table 4 Components and relative contents of 5 terpenoids

次生代谢物 Metabolites	化学式 Formula	化合物 Compound	保留时间 Rt/min	相对含量 The relative contents		
				叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
倍半萜 Sesquiterpenoids	C16H22O9	獐牙菜苷	3.83	$1.33 \times 10^6 \pm 2.08 \times 10^4$ a	$1.39 \times 10^5 \pm 2.29 \times 10^4$ b	$1.98 \times 10^5 \pm 4.12 \times 10^4$ b
	C16H22O10	獐牙菜苦苷	3.58	$1.30 \times 10^6 \pm 1.32 \times 10^5$ a	$1.87 \times 10^6 \pm 2.35 \times 10^5$ b	$2.84 \times 10^5 \pm 2.15 \times 10^4$ b
	C22H30O14	3'-O-D-葡萄糖酰龙胆苦苷	3.48	$3.53 \times 10^4 \pm 6.84 \times 10^3$ b	$8.95 \times 10^4 \pm 1.29 \times 10^4$ a	9.00±0.000 c
三萜 Triterpene	C30H48O5	铁冬青酸	7.02	9.00±0.00 b	9.00±0.000 b	$6.98 \times 10^3 \pm 3.25 \times 10^3$ a
三萜皂苷 Saponin	C41H64O13	齐墩果酸-3-O-β-D-吡喃木糖(1→3)-β-D-吡喃葡萄糖醛酸苷	6.59	$9.80 \times 10^5 \pm 7.00 \times 10^4$ a	$6.88 \times 10^4 \pm 1.49 \times 10^4$ b	$3.35 \times 10^4 \pm 1.03 \times 10^4$ c

3 讨论与结论

马齿苋作为传统的药食同源植物, 一直以来不断有类黄酮、生物碱及萜类等相关成分的研究报道^[25-27], 但受限于技术手段和研究方法, 相关成果不够系统, 所测成分也不够全面^[28], 因此, 相关文献报道所获具体成分数量偏少或相关成分具体含量存在较大误差。高效液相色谱串联质谱可对植物的具体成分进行系统性的定性定量分析, 本研究通过高效液相色谱串联质谱进行马齿苋代谢组学分析, 首次系统获取其生物碱类、黄酮类、萜类化合物、香豆素与木脂素等 4 类重要次生代谢产物, 发现其化合物分别有 43、34、16 和 5 种。对以上代谢产物在马齿苋根茎叶中的相对含量进行热图分析, 发现该 4 类次生代谢产物在茎和叶中的相对含量较根部更为接近; 通过比较 4 类重要次生代谢产物在马齿苋根茎叶中的含量可知, 生物碱在茎部总体含量偏低, 类黄酮在茎部总体含量偏高, 香豆素与木脂素以及萜类在根茎叶部含量依次递增。由于生物碱类、黄酮类、萜类化合物、香豆素与木脂素等 4 类重要次生代谢产物共 98 种化合物在马齿苋根茎叶部的具体含量差异明显, 因此, 本研究对该 98 种化合物进行归类, 同时详细列举了各化合物在根、茎和叶部的相对含量, 为进一步从事马齿苋上述功效成分提取利用及功效评价等工作提供理论依据。

虽然不同地区马齿苋野生种群不同, 且受土壤及气候条件等影响, 即使同一种群马齿苋的具体成分或含量也存在差异^[29,30], 但同科属的马齿苋绝大多数相关成分及其含量差异不明显。本文以福建闽南及广东潮汕等地区常见马齿苋野生种群为研究对象, 对其根、茎和叶的相关重要次生代谢产物进行定性定量分析, 从而系统阐述了该地区马齿苋根、茎和叶片中所含生物碱类、黄酮类、萜类化合物、香豆素与木脂素等重要次生代谢产物及其相对含量, 为其他地区马齿苋种群相关成分及含量等研究提供参考意义。

参考文献:

- [1] ARROO R R J, BHAMBRA A S, HANO C, et al. Analysis of plant secondary metabolism using stable isotope-labelled precursors [J]. *Phytochemical Analysis*, 2021, 32 (1): 62–68.
- [2] ZHOU Y X, XIN H L, RAHMAN K, et al. *Portulaca oleracea* L.: A review of phytochemistry and pharmacological effects [J]. *BioMed Research International*, 2015, 2015: 1–11.
- [3] AMIRUL ALAM M, JURAIMI A S, RAFII M Y, et al. Genetic improvement of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) and its future prospects [J]. *Molecular Biology Reports*, 2014, 41 (11): 7395–7411.
- [4] ELSHAMY M M, HEIKAL Y M, BONANOMI G. Phytoremediation efficiency of *Portulaca oleracea* L. naturally growing in some industrial sites, Dakahlia District, Egypt [J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 678–687.
- [5] 张倩, 黎平, 何子康, 等. 马齿苋内生菌橘青霉和波兰青霉中抗青枯菌的活性物质 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27 (6): 731–738. ZHANG Q, LI P, HE Z K, et al. Bioactivity metabolite from the endophytes *Penicillium citrinum* and *P. polonicum* of *Portulaca oleracea* against *Ralstonia solanacearum* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27 (6): 731–738. (in Chinese)
- [6] RAHIMI V, AJAM F, RAKHSHANDEH H. Purslane Nutrition Facts and Health Benefits [J]. *J Pharmacopuncture*, 2019, 22 (1): 7–15.
- [7] FARKHONDEH T, SAMARGHANDIAN S, AZIMI-NEZHAD M, et al. The Hepato-protective Effects of *Portulaca oleracea* L. extract: Review [J]. *Current Drug Discovery Technologies*, 2019, 16 (2): 122–126.
- [8] IRANSHAHY M, JAVADI B, IRANSHAHY M, et al. A review of traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Portulaca oleracea* L. [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2017, 205: 158–172.
- [9] MA Y F, BAO Y R, ZHANG W J, et al. Four lignans from *Portulaca oleracea* L. and its antioxidant activities [J]. *Natural Product Research*, 2020, 34 (16): 2276–2282.
- [10] XIU F, LI X T, ZHANG W J, et al. A new alkaloid from *Portulaca oleracea* L. and its antiacetylcholinesterase activity [J]. *Natural Product Research*, 2019, 33 (18): 2583–2590.
- [11] YANG X, YING Z M, LIU H R, et al. A new homoisoflavone from *Portulaca oleracea* L. and its antioxidant activity [J]. *Natural Product Research*, 2019, 33 (24): 3500–3506.
- [12] YANG X, ZHANG W J, YING X X, et al. New flavonoids from *Portulaca oleracea* L. and their activities [J]. *Fitoterapia*, 2018, 127: 257–262.
- [13] FARKHONDEH T, SAMARGHANDIAN S. The therapeutic effects of *Portulaca oleracea* L. in hepatogastric disorders [J]. *Gastroenterología y Hepatología*, 2019, 42 (2): 127–132.
- [14] ZHENG G Y, MO F F, LING C, et al. *Portulaca oleracea* L. alleviates liver injury in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. *Drug Design, Development and Therapy*, 2017, 12: 47–55.
- [15] PARK J E, HAN J S. A *Portulaca oleracea* L. extract promotes insulin secretion via a K⁺/ATP channel dependent pathway in INS-1 pancreatic β -cells [J]. *Nutrition Research and Practice*, 2018, 12 (3): 183.
- [16] PARK J E, LEE J S, LEE H A, et al. *Portulaca oleracea* L. extract enhances glucose uptake by stimulating GLUT4 translocation to the plasma membrane in 3T3-L1 adipocytes [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2018, 21 (5): 462–468.
- [17] 洪立洲, 王茂文, 丁海荣, 等. NaCl胁迫对马齿苋光合作用及叶绿素荧光特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31 (12): 2516–2521. HONG L Z, WANG M W, DING H R, et al. Characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Portulaca oleracea*

- under NaCl stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31 (12) : 2516–2521. (in Chinese)
- [18] PARK J E, SEO Y, HAN J S. HM-Chromanone Isolated from *Portulaca oleracea* L. Protects INS-1 Pancreatic β Cells against Glucotoxicity-Induced Apoptosis [J]. *Nutrients*, 2019, 20: 72–6643.
- [19] ZAMAN S, SHAH S B, JIANG Y T, et al. Saline conditions alter Morpho-physiological intensification in purslane (*Portulaca oleracea* L.) [J]. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*, 2018, 32 (3) : 635–639.
- [20] JAVED M T, AKRAM M S, HABIB N, et al. Deciphering the growth, organic acid exudations, and ionic homeostasis of *Amaranthus viridis* L. and *Portulaca oleracea* L. under lead chloride stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25 (3) : 2958–2971.
- [21] MULCAHY S, GOOGACRE C. Opening Pandora's box of academic integrity: Using plagiarism detection software. In R. Atkinson C, Mcbeath D, Jonas-Dwyer R, Phillips (Eds), Beyond the comfort zone: Proceedings of the 21st ASCILITE Conference[J]. Perth, 5 –8 December, 2004, pp. 688 – 696.
- [22] 徐迪, 马康, 单吉浩, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定动物尿液中 5 种镇静剂类药物残留 [J]. *核农学报*, 2020, 34 (9) : 2045–2050.
- XU D, MA K, SHAN J H, et al. Determination of five sedative drug residues in animal urine by ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34 (9) : 2045–2050. (in Chinese)
- [23] CHEN W, GONG L, GUO Z L, et al. A novel integrated method for large-scale detection, identification, and quantification of widely targeted metabolites: Application in the study of rice metabolomics [J]. *Molecular Plant*, 2013, 6 (6) : 1769–1780.
- [24] FRAGA C G, CLOWERS B H, MOORE R J, et al. Signature-discovery approach for sample matching of a nerve-agent precursor using liquid chromatography-mass spectrometry, XCMS, and chemometrics [J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82 (10) : 4165–4173.
- [25] LEI X, LI J M, LIU B, et al. Separation and identification of four new compounds with antibacterial activity from *Portulaca oleracea* L [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2015, 20 (9) : 16375–16387.
- [26] LIANG X, LI L Z, TIAN J L, et al. A rapid extraction and analysis method for the simultaneous determination of 26 bioflavonoids in *Portulaca oleracea* L [J]. *Phytochemical Analysis*, 2014, 25 (6) : 537–543.
- [27] MIAO L C, TAO H X, PENG Y, et al. The anti-inflammatory potential of *Portulaca oleracea* L. (purslane) extract by partial suppression on NF- κ B and MAPK activation [J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 239–245.
- [28] 刘佃雨. 马齿苋的化学成分、质量控制及多酚提取物制备工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011: 7–15.
- LIU D Y. Study on chemical constituents, quality control and technology for extraction of polyphenol of *Portulaca oleracea* L.[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 7–15. (in Chinese)
- [29] ALAM M A, JURAIMI A S, RAFII M Y, et al. Genetic diversity analysis among collected purslane (*Portulaca oleracea* L.) accessions using ISSR markers [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2015, 338 (1) : 1–11.
- [30] ASHRAFI A, ZAHEDI M, SOLEIMANI M. Effect of co-planted purslane (*Portulaca oleracea* L.) on Cd accumulation by sunflower in different levels of Cd contamination and salinity: A pot study [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17 (9) : 853–860.

(责任编辑: 吴宇琳)