

3 种沉水植物水培液中抑藻活性物质的分析

黄新颖, 种云霄, 汤仲恩, 吴启堂

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:以华南地区常见的对蓝绿藻具有显著抑制作用的马来眼子菜 *Potamogeton malaianus*、黑藻 *Hydrilla verticillata* 和苦草 *Vallisneria asiatica* 水培液为研究材料,利用乙酸乙酯提取浓缩后,使用气质联用色谱(GC-MS)技术对其中的化学物质进行了检测,并分析了其中具有抑藻活性的成分.结果表明,3种植物的水培液中可检出的化合物有40多种,主要为多元醇、脂肪酸、酚酸和羟基酸等成分,含量最多的是脂肪酸类,其次是羟基酸类;马来眼子菜水培液的亚麻酸、对羟基苯甲酸、对羟基苯丙烯酸、反式阿魏酸和半日花烷型二萜化合物,黑藻水培液的顺乌头酸和顺阿魏酸,苦草水培液中的2-甲基乙酰乙酸乙酯可能具有抑藻活性.

关键词:沉水植物;抑藻作用;活性物质;气质联用色谱

中图分类号:X172

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2010)03-0019-05

Analysis on Antialgal Allelochemicals in Culture Solutions of Three Submerged Macrophytes

HUANG Xin-ying, CHONG Yun-xiao, TANG Zhong-en, WU Qi-tang

(College of Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The allelochemicals were investigated in the culture solutions of *Potamogeton malaianus*, *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria asiatica* which showed great inhibitory effects on blue green algae. The ethyl acetate extracts of the three culture solutions were analyzed by using GC-MS. More than forty components were found in the solutions. The major components were alcohol, fatty acid, phenolic compounds and hydroxy carboxylic acid, respectively. The results suggested that octadecatrienoic acid, p-hydroxybenzoic acid, p-coumaric acid, trans-ferulic acid, and 13-ent-labdadien-16, 15-olide in the *P. malaianus* culture solution; cis-aconitic acid and cis-ferulic acid in the *H. verticillata* culture solution; and 2-methylacetoacetate in the *V. asiatica* culture solution might be responsive for antialgal effects.

Key words: submerged macrophyte; inhibition effect; active element; GC-MS

水体富营养化导致的藻类爆发往往导致水环境质量严重恶化,如何控制蓝绿藻类的过度生长已经成为水环境治理的重要课题.高等水生植物特别是沉水植物由于与藻类相同的生态位,对单细胞蓝绿藻具有抑制作用,重要的机制之一是向水体分泌对藻类具有抑制作用的化感物质,如芦苇中含有的2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)对铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 和羊角月牙藻 *Selenastrum capricornutum* 都

具有强抑制作用^[1-2],狐尾藻 *Myriophyllum spicatum* 能够分泌某些酚类化感物质,可抑制铜绿囊藻的正常生长^[3].马来眼子菜 *Potamogeton malaianus*、黑藻 *Hydrilla verticillata* 及苦草 *Vallisneria asiatica* 是3种常见的沉水植物,汤仲恩等^[6]曾发现它们的水培液对蓝绿藻生长具有较显著的抑制作用.为进一步了解3种植物水培液中化学物质的组成,探讨其中可能含有的抑藻化感活性物质,本研究对这3种植物

收稿日期:2009-03-15

作者简介:黄新颖(1983—),女,硕士研究生;通信作者:种云霄(1974—),女,副教授,博士,E-mail:cyx04@scau.edu.cn

基金项目:广东省博士启动基金(0630045);广东省科技计划项目(0711250100006)

的水培液利用气质联用色谱(GC-MS)进行了分析,探讨了其中具有抑藻作用的成分,为沉水植物治理富营养化水体藻类爆发提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 沉水植物水培液的获得

沉水植物为马来眼子菜 *Potamogeton malaianus*、黑藻 *Hydrilla verticillata* 和苦草 *Vallisneria spiralis*. 于 3 L 大烧杯中加入 2.5 L Hoagland (0.25 ×) 营养液,放入鲜质量 25 g 左右生长良好(根茎叶完好、叶色正常)的水草(水培液生物质量浓度 10 g/L),置于 GXZ 智能型光照培养箱(白天温度 25 ℃,光强 4 000 lx;晚上温度 15 ℃,光强 200 lx;光暗时间比 16:8)培养 10 d. 沉水植物放入烧杯培养前经自来水和蒸馏水各清洗 3 次,每次 10 min,去除植株上携带的泥沙等杂质. 培养结束后,取出沉水植物,水培液经 0.22 μm 的微滤膜抽滤处理,滤掉可能带入的原生动物及微生物等. 水培液过滤后用保鲜膜密封放入低温冰箱 0~4 ℃ 保存备用.

1.2 水培液的浓缩提取

取马来眼子菜、黑藻及苦草水培液各 10 L,过定性滤纸后再过 0.45 μm 水系滤膜,后用大体积收集器(由聚四氟乙烯收集管组成)进行富集,富集柱(SPE 柱)为 Waters Oasis HLB (6 cm, 500 cc, 美国 WATERS),每个 SPE 柱富集 1 L 水培液. 然后取 100 mL 水培液用 2 mol·L⁻¹ NaOH 调节 pH 至 12 以上,经 12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,上清液用 100 mL 正己烷洗涤 3 次,水层用 2 mol·L⁻¹ HCl 调节 pH 至 3 以下,再用 100 mL 乙酸乙酯连续萃取 3 次,乙酸乙酯层用无水硫酸钠干燥,在低于 40 ℃ 下旋转蒸发除去乙酸乙酯至最后体积为 2 mL^[4].

1.3 GC-MS 的测定方法及条件

取 0.1 mL 乙酸乙酯萃取浓缩液用 N₂ 流吹干,室温下放置 30 min,用 GC-MS 分析. 分析条件:50 ℃ 恒温 2 min,然后 8 ℃·min⁻¹ 升温至 300 ℃,保温 10 min,进样温度 320 ℃,离子源温度 180 ℃,进样量 0.2 μL. 使用峰面积归一化法进行半定量,用 WILEY 7.0 质谱数据库进行检索.

2 结果与分析

2.1 马来眼子菜水培液化感物质的检测

马来眼子菜水培液检出成分匹配度 500 以上的成分主要有 21 种,其中,匹配度超过 800 的有 4 种,分别是琥珀酸、顺式乌头酸、反式阿魏酸和半日花烷型二萜. 而检出成分中质量分数较大的为脂肪酸类

的琥珀酸(8.26%)和乙二酸(6.80%);羟基酸类的乳酸(7.36%)和柠檬酸(1.28%)及酚酸类的反式阿魏酸(3.01%)、对羟基丙烯酸(1.28%)和对羟基苯甲酸(1.01%)(图 1 和表 1).

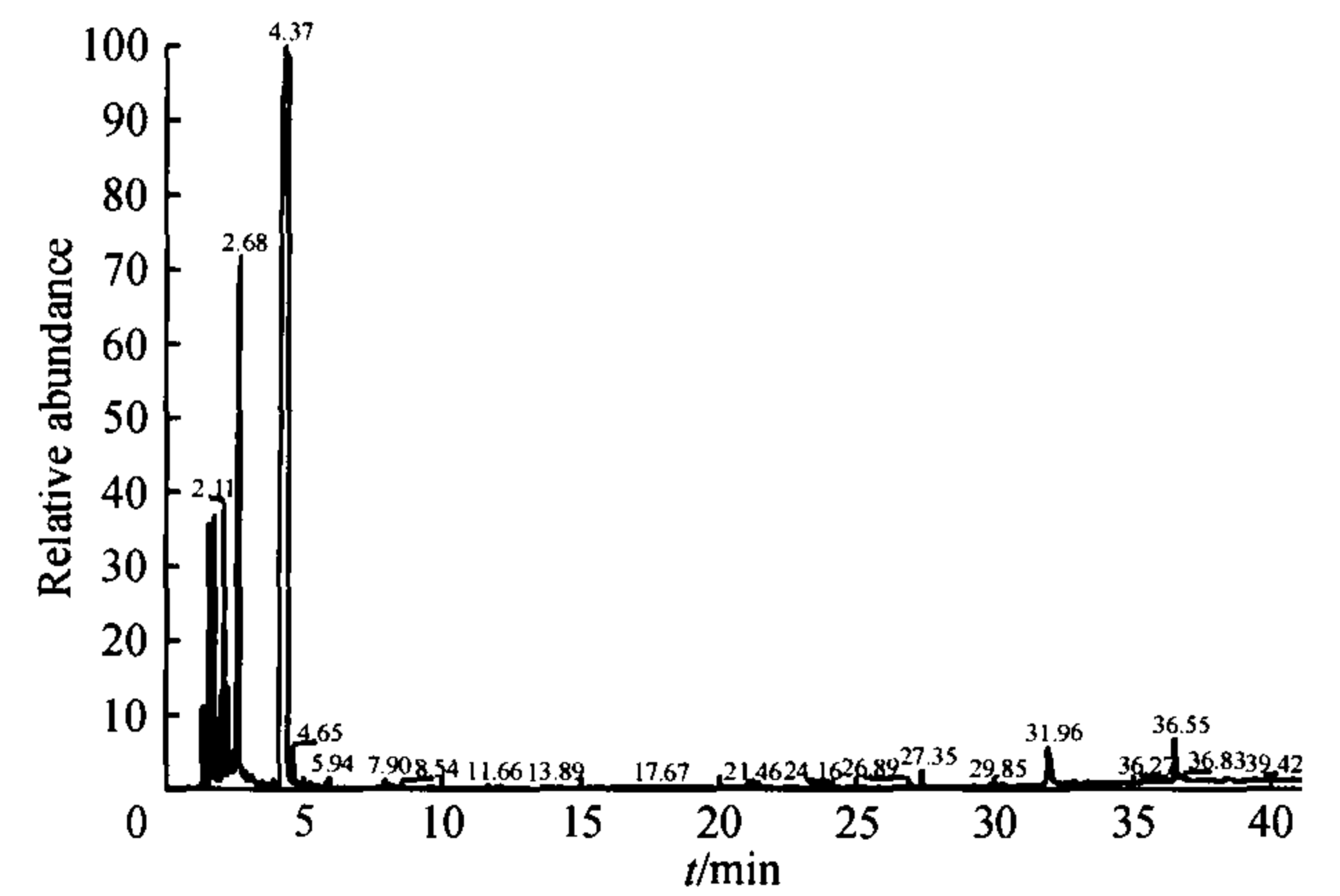


图 1 马来眼子菜水浸提液乙酸乙酯萃取物 GC-MS 分析谱图
Fig. 1 GC-MS analysed spectrogram of ethyl acetate extracts of *Potamogeton malaianus* culture solution

表 1 经 GC-MS 分析马来眼子菜水培液的主要组分及保留时间
Tab. 1 Major components and retention time of GC-MS analysed *Potamogeton malaianus* culture solution

类型	化合物	分子式	<i>t</i> _{保留} /min	<i>w</i> /%	匹配度(SI)
醇类	2-丙醇	C ₃ H ₈ O	1.37	0.98	784
	2,3-丁二醇	C ₄ H ₁₀ O ₂	2.68	1.63	681
	丙三醇	C ₃ H ₈ O ₃	11.66	0.65	658
	1,2-戊二醇	C ₅ H ₁₂ O ₂	13.89	0.53	631
	小计			3.97	
脂肪酸类	乙二酸	C ₂ H ₂ O ₄	2.37	6.80	595
	丁酸	C ₃ H ₆ O ₂	3.96	1.34	559
	琥珀酸	C ₄ H ₆ O ₄	4.37	8.26	800
	己酸	C ₆ H ₁₂ O ₂	7.90	0.89	615
	癸二酸	C ₁₀ H ₁₈ O ₄	7.97	0.10	654
	壬二酸	C ₉ H ₁₆ O ₄	14.21	2.15	708
	顺式乌头酸	C ₆ H ₆ O ₆	15.32	1.20	843
	亚麻酸	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	16.23	0.85	736
	小计			21.59	
酚酸类	苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₂	1.98	0.21	552
	对羟基苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₃	2.11	1.01	732
	香草酸	C ₈ H ₈ O ₄	2.37	0.69	582
	对羟基丙烯酸	C ₉ H ₈ O ₃	4.50	1.28	661
	反式阿魏酸	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	5.64	3.01	867
	小计			6.20	
羟基酸类	乳酸	C ₃ H ₆ O	2.11	7.36	696
	甲基琥珀酸	C ₅ H ₈ O ₄	7.90	0.20	614
	柠檬酸	C ₆ H ₈ O ₇	10.02	1.28	636
	半日花烷型二萜	C ₂₀ H ₂₈ O ₄	20.96	0.30	874
	小计			8.94	

2.2 黑藻水培液化感物质的检测

由图 2 和表 2 可知,黑藻水培液检出成分中匹配度超过 500 的成分有 13 种,主要成分为脂肪酸类的丁酸($w = 5.74\%$)和顺式乌头酸($w = 4.20\%$),匹配度分别为 829 和 780;酚酸类的顺式阿魏酸($w = 1.14\%$)及羟基酸类的乳酸($w = 6.26\%$),匹配度分别为 671 和 756.

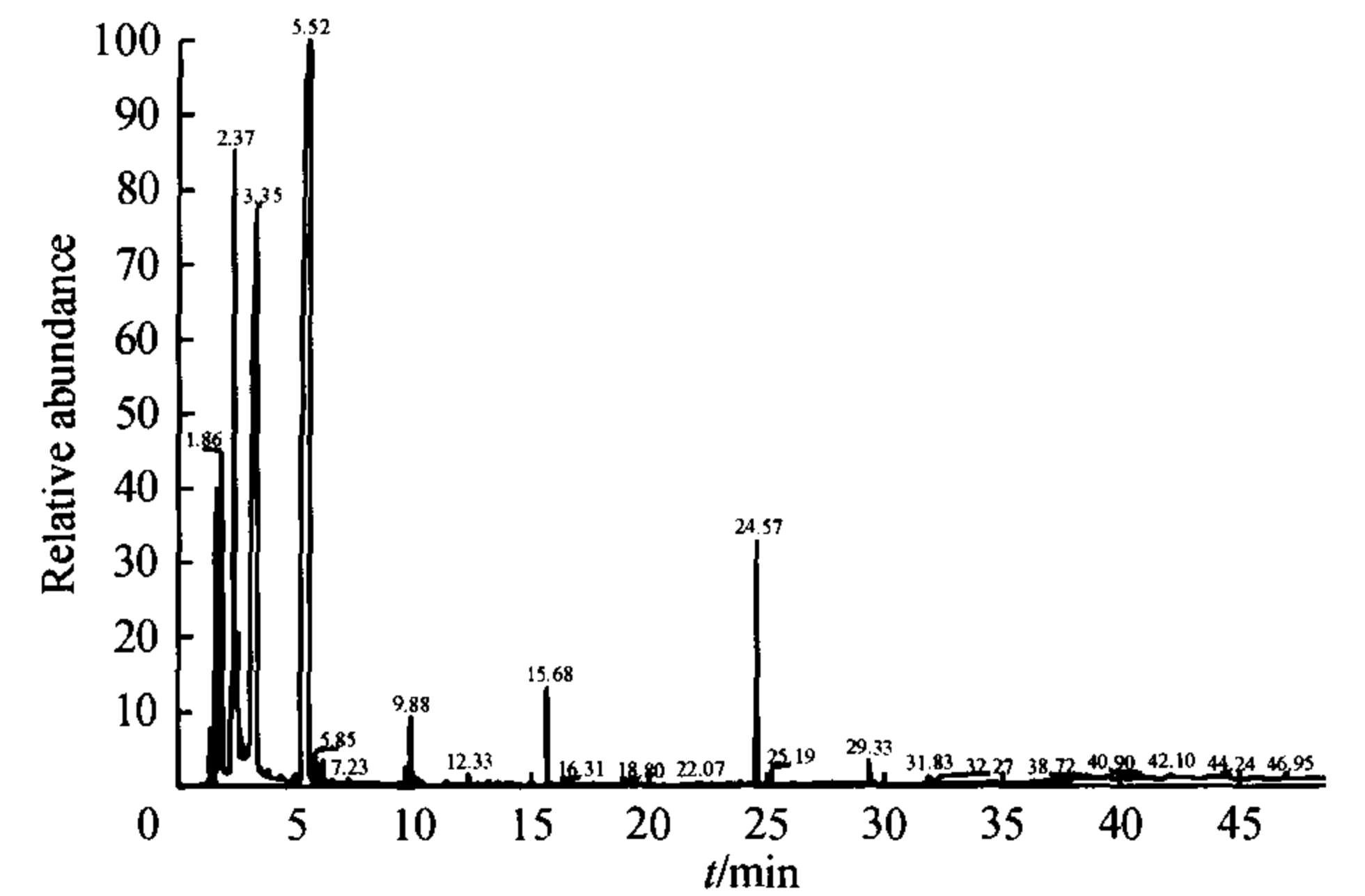


图 2 GC-MS 分析黑藻水浸提液乙酸乙酯萃取物谱图
Fig. 2 GC-MS analysed spectrogram of ethyl acetate extracts of *Hydrilla verticillata* culture solution

表 2 经 GC-MS 分析黑藻水培液的主要组分及保留时间
Tab. 2 Major components and retention time of GC-MS analysed *Hydrilla verticillata* culture solution

类型	化合物	分子式	$t_{\text{保留}}/\text{min}$	$w/\%$	匹配度 (SI)
醇类	乙醇	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	1.37	0.24	851
	2,3-丁二醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$	2.68	2.34	569
	2-甲基-1,3-丙二醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_2$	7.23	0.36	858
	小计			2.94	
脂肪酸类	丙酰胺酸	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_4$	1.77	1.76	782
	乙二酸	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	2.37	2.94	626
	丁酸	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	3.96	5.74	829
	琥珀酸	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	5.52	3.42	889
	己酸	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	7.90	0.13	680
	顺式乌头酸	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$	15.68	4.20	780
	小计			18.19	
酚酸类	顺式阿魏酸	$\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$	5.64	1.14	671
	对羟基苯甲酸	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$	15.21	0.14	672
	3-甲氧基-4-羟基苯甲酸	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_4$	25.01	0.38	560
	小计			1.66	
羟基酸类	乳酸	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	2.11	6.26	756
	小计			6.26	

2.3 苦草水培液化感物质的检测

由图 3 和表 3 可知,苦草水培液检出成分共 20

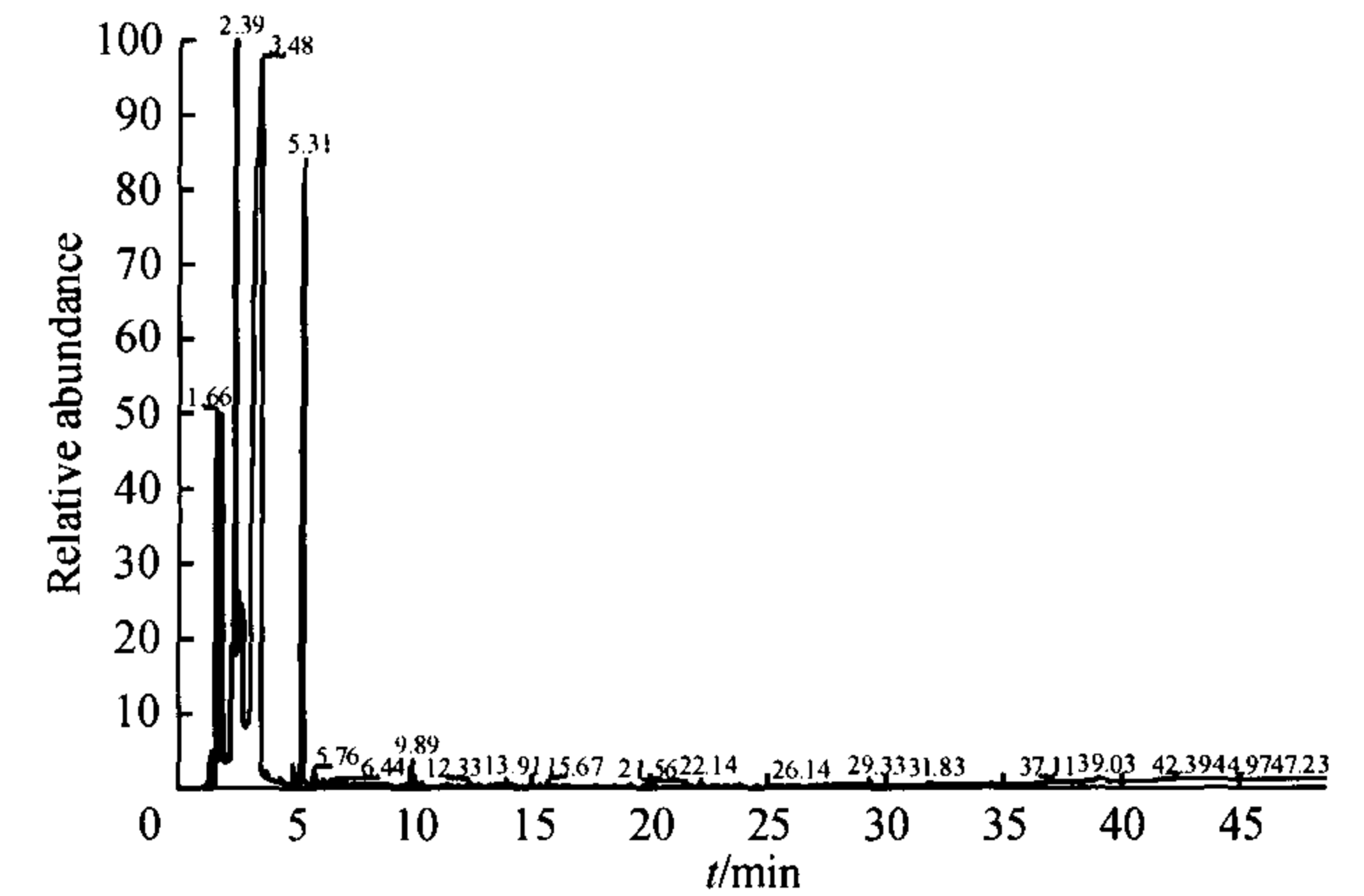


图 3 GC-MS 分析苦草水浸提液乙酸乙酯萃取物谱图
Fig. 3 GC-MS analysed spectrogram of ethyl acetate extracts of *Vallasneria asiatica* culture solution

表 3 经 GC-MS 分析苦草水培液的主要组分及保留时间
Tab. 3 Major components and retention time of GC-MS analysed *Vallasneria asiatica* culture solution

类型	化合物	分子式	$t_{\text{保留}}/\text{min}$	$w/\%$	匹配度 (SI)
醇类	2,3-丁二醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2$	2.68	4.04	463
	2-甲基-1,3-丙二醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_2$	7.23	0.36	618
	小计			4.40	
脂肪酸类	丙酰胺酸	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_4$	1.77	1.80	771
	丁酸	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	3.96	1.38	724
	琥珀酸	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	5.31	10.07	850
	2-甲基乙酰乙酸乙酯	$\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_3$	5.84	3.25	654
	马来酸二乙酯	$\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}_4$	6.07	0.33	605
	草酸	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	9.89	6.75	932
	壬二酸	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_4$	14.21	2.69	669
	顺式乌头酸	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$	15.68	0.99	897
	肉豆蔻酸	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_3$	19.36	0.09	720
	小计			27.70	
酚酸类	石炭酸	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	6.44	0.25	657
	苯基丙烯酸	$\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_2$	12.33	1.16	898
	Iso-ferulic acid		21.56	0.11	654
	小计			1.52	
羟基酸类	乳酸	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	2.11	2.82	734
	3-羟基丁酸	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$	9.88	0.50	946
	柠檬酸	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	10.02	4.03	878
	7-Hydroxy-heptanoic acid		16.48	0.59	709
	12-羟基-9-十八烯酸	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_3$	21.56	1.12	650
	2,3-Dihydroxy-propanoic acid	$\text{HO-CH}_2\text{-CH(OH)-COOH}$	22.02	0.32	736
	小计			9.26	

种,匹配度在800以上的成分有6种.主要成分为:脂肪酸类的琥珀酸($w = 10.07\%$)和2-甲基乙酰乙酸乙酯($w = 3.25\%$);酚酸类的苯基丙烯酸($w = 1.16\%$)及羟基酸类的柠檬酸($w = 4.03\%$)和12-羟基-9-十八烯酸($w = 1.12\%$).苦草水培液中也检测到顺式乌头酸,但质量分数仅为0.99%,匹配度达897.同时检测到脂肪酸类的2-甲基乙酰乙酸乙酯,质量分数高达3.25%,但其匹配度只有654.

2.4 3种沉水植物水培液的成分比较分析

马来眼子菜、黑藻和苦草水培液的乙酸乙酯萃取物经GC-MS分析,检出40种以上化合物,主要为多元醇、脂肪酸、酚酸和羟基酸等4类成分.这4类成分中,质量分数最大的是脂肪酸类,其次是羟基酸类.脂肪酸的质量分数都超过18%,脂肪酸主要由多元酸组成,主要成分为乙二酸、丁二酸、壬二酸、琥珀酸和顺式乌头酸等.水培液中羟基酸所占的比例也较大,3种沉水植物羟基酸质量分数从6%~10%不等,主要为乳酸和柠檬酸.

在这3种沉水植物的水培液中脂肪酸类均检测到琥珀酸、壬二酸和顺式乌头酸,其中琥珀酸质量分数均在3%以上,且苦草中质量分数最高,达10.07%,马来眼子菜中质量分数次之,为8.26%.苦草水培液中检测到的脂肪酸种类在3种水培液中最,有9种,马来眼子菜和黑藻水培液检测到脂肪酸分别有8和6种.本研究所检测到的脂肪酸组分中,2-甲基乙酰乙酸乙酯($w = 3.25\%$)、马来酸二乙酯($w = 0.33\%$)、草酸($w = 6.75\%$)以及肉豆蔻酸($w = 0.09\%$)是苦草独有的,2-甲基乙酰乙酸乙酯是已被李锋民等^[5]从芦苇中分离出并确认具有抑藻活性的物质.亚麻酸($w = 0.85\%$)是马来眼子菜中独有的.

3种水培液中酚酸类质量分数差别较大,马来眼子菜水培液的组分最多,且总质量分数最高,达6.20%,其中,反式阿魏酸的质量分数达到了3.01%;还发现了2种烯酸,分别是对羟基苯甲酸和对羟苯丙烯酸,其质量分数分别为1.01%和1.28%;而在其他2种水培液中检测到的酚酸类有3种,且总质量分数都不到2%.

3种植物水培液的羟基酸类物质在全部组分中所占的比例也比较大,均能检测到乳酸,并且质量分数都很高.马来眼子菜和苦草水培液的主要成分都是乳酸和柠檬酸.苦草水培液中检测到3-羟基丁酸,其质量分数达到0.50%,马来眼子菜水培液中发现了质量分数为0.30%的半日花烷型二萜化合物;

另外,在苦草水培液中还检测到一种十八烯酸——12-羟基-9-十八烯酸,其质量分数为1.12%.

本次受试沉水植物检测到的醇类2~4种不等,均以2,3-丁二醇的质量分数最高,其他醇类的质量分数均很微量,不超过1%.

3 讨论与结论

3.1 马来眼子菜水培液抑藻化感物质

汤仲恩等^[6]曾研究发现马来眼子菜水培液对蓝藻铜绿微囊藻及绿藻沙角衣藻 *Chlamydomonas sa-jao*、蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa* 和四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda* 的生长具有极显著的抑制.张庭延等^[7]研究发现,对羟基苯甲酸和阿魏酸对水华鱼腥藻 *Anabaena aquae* 和蛋白核小球藻均有低促高抑作用.丁惠君等^[8]探讨了对苯二酚和3,4,5-三羟基苯甲酸(五倍子酸)对铜绿微囊藻生长的影响,结果表明,随着浓度的增加,2种物质对铜绿微囊藻的抑制作用显著增强.Nakai等^[9]从穗花狐尾藻 *Microcystis spicatum* 体内分离提取出不饱和酚酸类物质,对蓝藻具有抑制作用.结合本次分析检测结果,推测马来眼子菜水培液中含有的酚酸类物质反式阿魏酸(匹配度867)、对羟基苯甲酸(匹配度732)和对羟基丙烯酸(匹配度661)可能具有抑藻活性物质.

吴晓辉^[10]研究表明,24.2 mg/L的亚麻酸对羊角月牙藻 *Selenastrum capricornutum* 的抑制率为25%.Aliotta等^[11]对宽叶香蒲 *Typha latifolia* 的乙醚提取物进行分析时,得到的3种具有抑藻活性的脂肪酸类物质中就有 α -亚麻酸.本研究中,马来眼子菜水培液中也发现了质量分数较少(0.85%)分子式为 $C_{18}H_{30}O_2$ 的脂肪酸,是亚麻酸或亚麻酸的一种异构体,也可能是马来眼子菜水培液中的抑藻活性成分之一.

有研究发现眼子菜科植物中的萜类是具有抑藻活性的化合物,Marina等^[12]从该科植物中提取的许多半日花烷型内酯萜类化合物具有明显的抑藻活性,Waridel^[13]对二氯甲烷提取的篦齿眼子菜 *Potamogeton pectinatus* L. 的非极性化合物进行了较全面分析,得到了比脂肪酸极性略大的化合物——半月花烷二萜,有明显的抑藻效应.在本研究中,从马来眼子菜水培液中也检测到一种半日花烷型二萜化合物(匹配度874),可能是具有抑藻活性的成分,但是质量分数很低(0.30%),究竟是马来眼子菜本身释放萜类化合物较少还是由于提取剂乙酸乙酯极性较弱以及萜类化合物部分分解还有待进一步验证.

3.2 黑藻水培液抑藻化感物质

早前有研究发现黑藻水培液对蓝藻铜绿微囊藻、纤细席藻 *Phormidium tenue* 及绿藻蛋白核小球藻、四尾栅藻的生长具有极显著的抑制作用^[6]。从GC-MS检测到的成分看,顺式乌头酸(匹配度780)和顺式阿魏酸(匹配度671)可能是黑藻水培液中所具有的抑藻活性物质。顺乌头酸能参与植物体内的三羧酸循环及乙醛酸循环,破坏植物体的线粒体,从而降低其光合作用效率,抑制植物生长^[14];顺阿魏酸能抑制细胞的分裂,促进细胞体内自由基的分泌,加速细胞内膜的分解,从而达到抑制藻细胞的生长^[15]。

3.3 苦草水培液抑藻化感物质

苦草水培液对铜绿微囊藻、纤细席藻、沙角衣藻和蛋白核小球藻的生长都具有显著性的抑制作用^[6]。

本次研究分析苦草水培液中,2-甲基乙酰乙酸乙脂、酚酸类的苯基丙烯酸可能是主要的抑藻活性物质。李峰民等^[16]对芦苇 *Phragmites australis* 浸提液分离出的2-甲基乙酰乙酸乙脂对蛋白核小球藻有明显的抑制作用,而本次研究中2-甲基乙酰乙酸乙脂在苦草水培液中质量分数高达3.25%,由此可以推断出该脂肪酸是苦草的化感活性物质之一。

综上所述,马来眼子菜水培液、黑藻水培液和苦草水培液中存在具有抑藻特性的活性成分。但是,这些活性成分的作用还需要进一步深入研究,包括:1)对这些成分进行分离提取;2)对单个确定的目标物质进行抑藻剂量效应关系的探讨;3)具有抑藻作用的活性成分,其发挥作用时的环境因子的影响等。

参考文献:

[1] LI Feng-min, HU Hong-ying. Isolation and characterization of a novel allelochemical from *Phragmites communis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71 (11): 6545-6553.

[2] 门玉洁, 李锋民, 胡洪营, 芦苇化感组分对羊角月牙藻和雷氏衣藻生长特性的影响[J]. *湖泊科学*, 2007, 19 (4): 473-478.

[3] 吴程, 常学秀, 董红娟, 等. 粉绿狐尾藻 *Myriophyllum aquaticum* 对铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 的化感

抑制效应及其生理机制[J]. *生态学报*, 2008, 28 (6): 2595-2603.

- [4] ZHU H, MALLIK A U. Interactions between *Kalmia* and black spruce: Isolation and identification of allelopathic compounds [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20: 407-421.
- [5] 李锋民, 胡洪营, 种云霄, 等. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生理特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27 (3): 377-381.
- [6] 汤仲恩, 种云霄, 吴启堂, 等. 3种沉水植物对5种富营养化藻类生长的化感效应[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28 (4): 42-46.
- [7] 张庭延, 吴安平, 何梅, 等. 酚酸类物质对水华藻类的化感作用及其机理[J]. *中国环境科学*, 2007, 27 (4): 472-476.
- [8] 丁惠君, 张维昊, 周伟斌, 等. 两种酚酸类化感物质对铜绿微囊藻生长的影响[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30 (7): 1-3.
- [9] NAKAI S. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. *Water Science and Technology*, 2005, 543 (1): 71-78.
- [10] 吴晓辉, 张兵之, 邓平, 等. 马来眼子菜化感作用对斜生栅藻同工酶的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2007, 25 (5): 479-483.
- [11] ALIOTTA G, DELLA G M, MONACO P, et al. *In vitro* algal growth inhibition by phytotoxins of *Typha latifolia* L. [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16 (9): 2637-2646.
- [12] MARINA D G M, LUCIO P. Prednisolone biotransformation by the green alga T76 *Scenedesmus quadricauda* [J]. *Tetrahedron*, 1997, 24 (53): 8273-8280.
- [13] WARIDEL P, WOLFENDER J L, LACHAVANNE J B, et al. Ent-labdane diterpenes from the aquatic plant *Potamogeton pectinatus* [J]. *Phytochemistry*, 2003, 7 (63): 1309-1317.
- [14] 张文利, 沈文飏, 叶茂炳, 等. 植物顺乌头酸酶及其生理功能[J]. *植物生理学通讯*, 2003, 39 (4): 391-398.
- [15] 孙文浩, 余叔文, 杨善元. 凤眼莲根系分泌物中的抑藻化合物[J]. *植物生理学报*, 1993, 19 (1): 92-96.
- [16] 李锋民, 胡洪营. 芦苇抑藻化感物质的分离及其抑制蛋白核小球藻效果研究[J]. *环境科学*, 2004, 25 (5): 89-92.

【责任编辑 周志红】