

邱胜娟, 罗世琼, 杨占南, 等. 土壤特征对黄花蒿酚类物质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 85–89.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.023

土壤特征对黄花蒿酚类物质的影响

邱胜娟¹, 罗世琼², 杨占南¹, 郑 筑¹, 胡 娟¹, 赵 铨²

(1. 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550001)

摘要:为探索影响黄花蒿酚类组分累积的土壤因素, 测定了黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量及土壤养分含量、酶活性、微生物标记性磷脂脂肪酸 (PLFAs) 含量, 并对其进行相关性分析及因子分析。结果表明, 不同产地黄花蒿东莨菪内酯含量、猫眼草酚含量、猫眼草黄素含量、根际土壤养分含量、酶活性及微生物 PLFAs 含量存在差异; 土壤有效磷含量与东莨菪内酯含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与黄花蒿猫眼草酚、猫眼草黄素含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 速效钾含量与猫眼草黄素含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 有速效钾、有效磷是影响黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的主要因子。人工栽培黄花蒿可结合当地土壤实际状况, 适量增施磷肥与钾肥, 可促进黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的增加, 这为人工栽培黄花蒿, 提高黄花蒿的品质提供了科学的理论依据。

关键词: 黄花蒿; 酚类物质; 养分; 酶活性; 磷脂脂肪酸

中图分类号: S567.21+9.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0085-05

黄花蒿 (*Artemisia annua* L.) 为菊科蒿属一年生草本植物, 具有重要的医药功能, 作为中药材已有上千年的历史^[1]。例如, 从黄花蒿叶中分离提取的青蒿素被世界卫生组织列为治疗疟疾的首选药物^[2]。受不同生长环境如气候、土壤等因素的影响, 黄花蒿药效组分含量差异明显 (青蒿素含量 0.01%~1.50%, 总多酚含量 56~530 mg/g)^[3]。目前, 有关产地、生长阶段、施肥等因素对黄花蒿药效组分的影响已有文献报道^[4], 黄花蒿主要挥发性组分随不同产地及种植环境不同而差异显著^[5]; 黄花蒿叶片中青蒿素含量在花蕾前期最高, 随着生长时间的延长, 其含量反而降低^[6]; 施肥对黄花蒿抗疟相关组分有一定的影响^[7]。然而, 关于土壤条件对黄花蒿酚类物质影响的报道较少。黄花蒿药效组分含量总是受到生长环境的影响^[8], 其土壤条件是一个重要的影响因素, 因为土壤与植物根系复杂的物理、化学及生物过程, 必然影响养分、酶活性及微生物特征^[9-13], 从而影响黄花蒿根系对养分的吸收, 进而影响黄花蒿药效组分的含量。因此, 研究土壤环境因素对黄花蒿药效组分的影响, 对提高其药效组分含量, 实现提高其药材品质具有重要意义。

我国野生黄花蒿资源丰富, 尤以西南地区品种最多, 分布面积较大。有报道指出, 位于亚热带季风气候区的贵州、广西、重庆和湖南等地适宜野生黄花蒿的人工种植^[14]。研究证实黄花蒿酚类物质包括东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素, 该类物质具有协同青蒿素提高其抗疟和抗癌作用, 并具有较高的抗氧化活性^[15]。黄花蒿酚类组分含量的变化引起了人们的广泛关注。本试验采样地点选择气候条件基本一致的贵

州省黎平县、剑河县以及榕江县等 6 个采样点, 通过采集在相似气候条件下不同土壤中生长的黄花蒿植株及根际土壤, 对野生黄花蒿叶片酚类物质 (东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素) 含量与土壤养分、酶活性以及微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 含量进行测定, 并对其进行相关性分析及因子分析, 探索黄花蒿土壤特征对黄花蒿酚类物质累积的影响因素, 为提高人工栽培黄花蒿的品质提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域选择

采样地点位于贵州省黔东南苗族侗族自治州剑河县、榕江县、黎平县, 均属亚热带湿润季风气候, 年平均气温 15.6~18.1℃, 无霜期 310~326 d, 降水量 1 093.2~1 226.5 mm, 采样地点气候条件基本一致。样地均为典型的丘陵山区地形地貌, 黄花蒿自然生长均在 3 年以上, 形成了优势植物, 群落内以及周围含有杂草, 没有木本植物。

1.2 样品采集

采样时间为 2015 年 8 月, 在花蕾期采集黄花蒿植株及根际土壤。每个样地随机采集长势基本一致的黄花蒿植株以及根际土壤, 采集生长土壤时, 挖取黄花蒿植株, 抖掉易脱落的土壤, 收集黏附于根系表面的土壤 (每株约 20 g)。取样后, 将土样平均分成 2 份, 装入无菌塑料样品袋, 迅速运回实验室, 剔除石块、植物残根等杂质, 一份自然风干, 检测土壤理化性质及酶活性, 另一份于 -4℃ 冰箱中保存, 用于测定土壤微生物标记性的磷脂脂肪酸含量; 收集新鲜黄花蒿叶片, 测定东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素的含量, 取少量叶片于 60℃ 烘干测定水分系数。采集黄花蒿样点的地理信息及土壤类型如表 1 所示。

1.3 测定项目与方法

采用常规方法检测土壤基本理化性质^[16], 土壤 pH 值采用玻璃电极法 (25 mL 水、5 g 土) 测定; 有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 土壤全氮、全磷、全钾含量的测定

收稿日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41461053); 贵州师范大学博士科研项目。

作者简介: 邱胜娟 (1991—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事土壤特征与植物分析研究。E-mail: dsj616368566@163.com。

通信作者: 杨占南, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事药物分析研究。E-mail: yangzhannan@163.com。

表 1 黄花蒿样地的地理信息及土壤类型

序号	样地编号	样地名称	地理位置	海拔(m)	土壤类型
1	QH-T1	贵州省榕江县	108°33'48"E,26°00' 09"N	282	黄壤
2	QH-T2	贵州省剑河县	108°25'31"E,26°43'31"N	520	棕壤
3	QH-T3	贵州省剑河县温泉镇	108°29'45"E,26°45'01"N	527	棕壤
4	QH-T4	贵州省黎平县	109°07'09" E,26°14'20"N	531	灰岩黄壤
5	QH-T5	贵州省黎平县新屯所村	109°10'45"E,26°22'16"N	430	黄棕壤
6	QH-T6	贵州省黎平北门村	109°10'26"E,26°22'50"N	439	灰岩黄壤

分别采用 HF-H₂O₂-碱性扩散法、钼锑抗比色法、火焰光度法;土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量的测定分别采用碱性扩散法、0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法、1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度法。土壤脲酶活性测定采用苯酚-次氯酸钠比色法^[17];蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[18];磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[19]。

黄花蒿叶片东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量采用高效液相色谱仪(HPLC-20AT)分析^[20],将黄花蒿新鲜叶片用研钵磨碎,精确称取 0.500 0 g,加入 20 mL 无水乙醇,静置过夜,超声处理 30 min,过滤,采用色谱柱 Waters PAH C18 (250 mm × 4.6 mm × 5 μm)、二极管阵列检测器及 Lc-solution 2.5 色谱工作站,流动相 A 相乙腈、甲醇体积比为 11:5,B 相水、甲酸体积比为 0.1:100,检测波长为 345 nm,梯度洗脱,通过外标法计算其含量。

新鲜土壤微生物 PLFAs 含量采用气相色谱-质谱联用仪(GCMS-QP2010)分析。参照 Bligh 等的方法^[21]对土壤微生物的 PLFAs 进行提取;色谱柱为 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)石英毛细管色谱柱;升温程序为 70 ℃ (5 min),以 20 ℃/min 升至 190 ℃ (1 min),以 5 ℃/min 升至 200 ℃ (2 min),再以 10 ℃/min 升至 280 ℃ (8 min);进样口温度为 250 ℃;离子源温度为 230 ℃;载气为 He (0.9 mL/min);分流比为 10:1,质量扫描范围 30~500 *m/z*。内标为十九烷酸甲酯标准品,土壤微生物脂肪酸甲酯混和标样为细菌酸甲酯混合物(bacterial acid methyl esters mix, 47080-U, Sigma-Aldrich)。

按照 Frostegard 等的方法^[22]对 PLFAs 进行命名。细菌类群的 PLFAs 为 2-OH 10:0、11:0、12:0、2-OH 12:0、3-OH 12:0、13:0、14:0、2-OH 14:0、15:0、i15:0、α15:0、16:0、2-OH 16:0、i16:0、i17:0、ω7c16:1、cy17:0、17:0、cy17:0。其中格兰氏阳性细菌(G⁺)为 i15:0、α15:0、i16:0、i17:0;格兰氏阴性细菌(G⁻)为 2-OH 10:0、2-OH 12:0、3-OH 12:0、2-OH 14:0、2-OH 16:0、16:1ω7c、cy17:0、cy19:0^[21-22]。真菌类群为 18:2ω6、9:18:1ω9c、18:1ω9t。放线菌类群为 10Me18:0。线虫为 20:0^[23]。

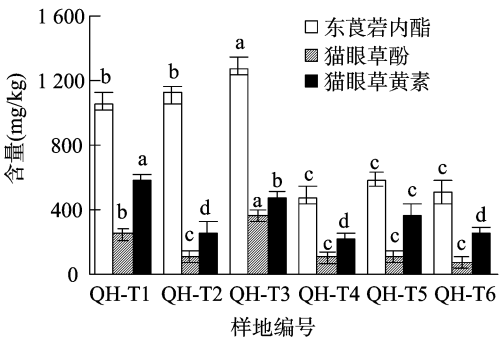
1.4 统计分析

每组试验均作空白处理和 3 组平行试验。数据通过 Excel 进行整理和绘图,采用 SPSS 18.0 统计软件进行方差分析、单因素方差分析检验样地间酚类物质、土壤特征是否存在显著性差异;多重比较采用 LSD 法;土壤特征与黄花蒿酚类组分之间的相关性采用 Pearson 相关分析;黄花蒿酚类组分的土壤影响因素采用因子分析。

2 结果与分析

2.1 黄花蒿酚类物质含量分析

由图 1 可知,东莨菪内酯、猫眼草酚和猫眼草黄素含量分别为 490.6~1 283.6、82.1~348.3、232.5~587.6 mg/kg,并且其含量表现为东莨菪内酯>猫眼草黄素>猫眼草酚;东莨菪内酯含量较高的样地为 QH-T1、QH-T2、QH-T3,猫眼草酚含量较高的样地为 QH-T1、QH-T3,猫眼草黄素含量较高的样地为 QH-T1;QH-T3、QH-T4 样地样品的东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量均差异显著;东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量最高分别是最低的 2.61、4.24、2.53 倍。说明黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量受气候条件及土壤环境等多因素的综合影响。



不同小写字母表示不同样地间在0.05水平上差异显著。下图同图1 不同样地黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量

2.2 黄花蒿土壤养分特征

由表 2 可知,不同黄花蒿样地土壤 pH 值存在差异,pH 值在 6.13~7.65 之间。棕壤和黄棕壤的 pH 值高于黄壤。土壤全量养分是衡量土壤肥力的重要指标之一,且不同土壤类型的土壤全量养分不同。测定样品土壤中全氮含量最高的是最低的 2.38 倍,土壤全磷含量最高的是最低的 6.19 倍,而全钾含量最高的是最低的 2.04 倍。黄花蒿土壤全氮、全磷含量与东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量变化没有明显的规律性关系,说明土壤全氮、全磷对黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的变化没有直接影响。不同样地样品的黄花蒿土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量分别在 16.95~75.61、5.54~47.59、42.04~613.78 mg/kg 之间。图 1 显示 QH-T4 样品的黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量均较低,其土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量也较低,说明黄花蒿土壤有效养分有助于植物根系吸收养分,提高植物内部营养元素的形成,这与相关文献报道的结果^[14]基本一致。不同样地黄花蒿土壤有机质含量在 7.00~29.70 g/kg 之间,有机质含量较高的 QH-T5、QH-T6 样品,其碱解氮和有效磷含量也较高,而有机质含量最低的 QH-T4 样品,其碱解氮和有效磷含量也较低,说明土壤有机质不但是土壤肥力的重要指标,也是土壤中氮和磷的重要来源。

表 2 黄花蒿土壤养分特征分析结果

样地编号	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
QH-T1	6.14 ± 0.05c	17.90 ± 1.07cd	0.58 ± 0.35b	0.42 ± 0.02d	31.10 ± 2.46a	66.86 ± 4.11b	25.48 ± 2.21b	155.04 ± 12.62d
QH-T2	7.65 ± 0.09a	16.60 ± 0.99d	0.50 ± 0.03c	0.58 ± 0.04b	15.24 ± 1.11c	27.15 ± 2.16d	5.54 ± 0.34d	188.73 ± 13.91c
QH-T3	7.57 ± 0.06a	19.10 ± 1.24c	0.58 ± 0.04b	0.56 ± 0.03c	23.85 ± 1.51b	30.44 ± 2.75d	8.86 ± 0.63c	122.72 ± 8.92e
QH-T4	7.62 ± 0.04a	7.00 ± 0.35e	0.29 ± 0.02d	0.16 ± 0.02e	16.57 ± 1.41c	16.95 ± 1.62e	10.51 ± 0.75c	42.04 ± 2.86f
QH-T5	7.36 ± 0.07b	26.60 ± 1.28b	0.58 ± 0.03b	0.99 ± 0.06a	25.81 ± 1.98b	56.33 ± 4.38c	47.59 ± 3.17a	613.78 ± 40.17a
QH-T6	6.13 ± 0.06c	29.70 ± 1.55a	0.69 ± 0.04a	0.65 ± 0.08b	15.37 ± 0.99c	75.61 ± 4.23a	22.15 ± 1.59b	288.31 ± 22.58b

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 3 同。

2.3 黄花蒿土壤酶活性特征

土壤酶作为土壤生态系统最为活跃的生物活性物质,能够促进物质循环与能量流动,某种程度上反映了土壤养分的动态转化^[24]。脲酶能催化尿素水解,土壤氮素状况及理化性状与其活性变化有关。由图 2 可知,不同样地土壤脲酶活性在 11.94 ~ 27.25 mg/g 之间(图 2-A),有些样地间脲酶活性差异显著,QH-T5 样品脲酶活性为 27.25 mg/g,是 QH-T4 样品脲酶活性(11.94 mg/g)的 2.28 倍;脲酶活性与碱解氮含量变化类似,QH-T5 的碱解氮含量与脲酶活性均较高,说明脲酶能够促进氮含量转换和利用。蔗糖酶反映了土壤生物活性强弱与物质转化的速度,由图 2-B 可知,不同样地黄花蒿土壤蔗糖酶活性存在差异,在 136.50 ~ 831.65 mg/g 之间,有

些样地间蔗糖酶活性差异显著,QH-T6 样品蔗糖酶活性为 831.65 mg/g,是 QH-T4 样品蔗糖酶活性(136.50 mg/g)的 6.09 倍,说明土壤生物活性强度与物质转化的速度存在差异。磷酸酶能够促进有机磷化合物分解,其活性直接影响土壤中磷的有效性,由图 2-C 可知,不同样地间黄花蒿土壤磷酸酶活性存在差异,在 6.18 ~ 43.15 mg/g 之间,有些样地间磷酸酶活性差异显著,QH-T6 样品的磷酸酶活性(43.15 mg/g)是 QH-T4 样品磷酸酶活性(6.18 mg/g)的 6.98 倍,说明不同样地间黄花蒿土壤中分解磷酸酶的能力存在差异。不同样地样品黄花蒿土壤脲酶、蔗糖酶以及磷酸酶活性的差异表明土壤类型影响土壤酶活性,从而影响其酚类物质的积累,主要体现在黄花蒿酚类物质含量的差异上。

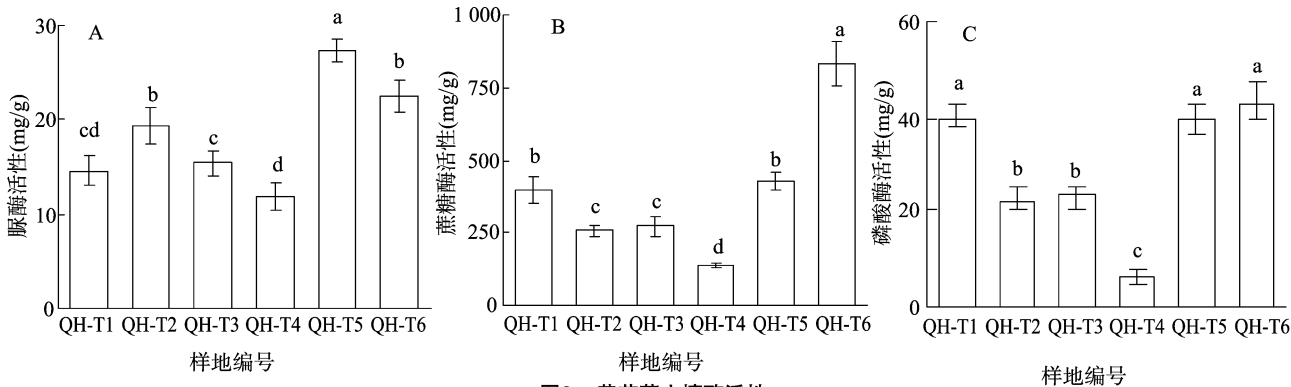


图2 黄花蒿土壤酶活性

2.4 黄花蒿土壤微生物特征

类群不同的土壤微生物,其活细胞的 PLFAs 组成成分具有相对的稳定性,通过其丰度及组成可对土壤微生物群落结构进行动态监测^[25]。本试验不同样地黄花蒿土壤中共检出 19 种 PLFAs,包括细菌 14 种、真菌(C18:2 ω 6,9,18:1 ω 9c,18:1 ω 9t)、放线菌(10Me18:0)、线虫(20:0);不同样地黄花蒿土壤微生物包括 G⁺、G⁻、细菌、真菌、放线菌、线虫。由表 3 可知,土壤微生物的 PLFAs 含量存在差异,G⁺、G⁻、细菌、真菌、放线菌、线虫以及总微生物 PLFAs 的含量范围分别为 1.38 ~ 4.10、3.54 ~ 10.68、43.71 ~ 135.05、2.83 ~ 10.80、4.77 ~ 7.87、0.48 ~ 0.84、54.87 ~ 147.62 mg/kg,有些样地间 PLFAs 含量差异显著,最高含量分别是最低含量的 2.97、3.01、3.09、3.81、1.65、1.75、2.69 倍;黄花蒿土壤微生物的 PLFAs 含量均表现为细菌最高、线虫最低,并且细菌的 PLFAs 含量占总微生物 PLFAs 的 77.30% ~ 91.48%,表明细菌在活化黄花蒿土壤养分方面起主要作用。变异系数反映了采样点之间的平均变异程度,不同样地黄花蒿土壤各种微生物 PLFAs 含量的变异系数均大于 10%,为中等变异强度,表明不同

样地黄花蒿土壤微生物群落结构、丰度和组成成分存在差异。

2.5 土壤特征与黄花蒿酚类组分含量的相关性分析

不同土壤类型,其理化性质也不同,黄花蒿酚类组分存在差异。由表 4 可知,东莨菪内酯含量与猫眼草酚、猫眼草黄素含量呈显著正相关($P < 0.05$),表明黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素的累积是相互促进的。有机质具有改善土壤理化性质的重要作用,黄花蒿土壤有机质含量与酚类物质含量均未呈显著相关,说明有机质并不直接影响黄花蒿酚类物质的累积,有机质含量与有效磷含量、碱解氮含量、全氮含量、全磷含量、磷酸酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性呈显著或极显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),表明有机质可能是土壤氮和磷的来源。土壤 pH 值与微生物总 PLFAs 含量呈显著负相关($P < 0.05$),与磷酸酶活性、蔗糖酶活性呈极显著负相关($P < 0.01$),表明 pH 值的升高不利于微生物生长,同时减小酶的活性。土壤酶是土壤中具有生物活性的蛋白质,可与微生物共同推动土壤生物化学过程。磷酸酶可催化磷酸脂类或磷酸酐的水解,其活性直接影响土壤中磷的生物有效性,磷酸酶活性与土壤有效磷含量呈极显著正相关($P < 0.01$),表明

表 3 黄花蒿土壤微生物的 PLFAs 含量及组成

样品编号	PLFAs 含量 (mg/kg)						
	G ⁺	G ⁻	细菌	真菌	放线菌	线虫	总微生物
QH-T1	3.83 ± 0.27a	7.09 ± 0.73b	135.05 ± 24.01a	6.52 ± 0.73c	7.87 ± 0.92a	0.80 ± 0.08a	147.62 ± 15.86a
QH-T2	1.38 ± 0.08d	10.03 ± 1.07a	66.33 ± 14.36b	8.60 ± 0.88b	7.40 ± 0.81a	0.84 ± 0.08a	85.81 ± 17.85b
QH-T3	1.55 ± 0.08c	10.68 ± 0.94a	81.65 ± 8.53b	10.80 ± 1.06a	6.74 ± 0.57a	0.68 ± 0.06ab	99.45 ± 11.15b
QH-T4	1.52 ± 0.09c	3.54 ± 0.41d	47.34 ± 6.93c	3.93 ± 0.36d	4.77 ± 0.57b	0.48 ± 0.05c	56.52 ± 5.16c
QH-T5	1.96 ± 0.11b	4.74 ± 0.43c	43.71 ± 9.05c	5.45 ± 0.59c	5.19 ± 0.51b	0.53 ± 0.07c	54.87 ± 6.65c
QH-T6	4.10 ± 0.24a	7.27 ± 0.84b	72.38 ± 10.54b	2.83 ± 0.27e	6.47 ± 0.72a	0.73 ± 0.07a	82.38 ± 10.66b
变异系数	12.24%	15.56%	20.59%	21.60%	17.36%	19.61%	14.46%

表 4 土壤特征与黄花蒿酚类组分的相关性

指标	东莨菪内酯含量	猫眼草酚含量	猫眼草黄素含量	有机质含量	pH 值	速效钾含量	全钾含量	有效磷含量	全磷含量	碱解氮含量	全氮含量	微生物总 PLFAs 含量	磷酸酶活性	脲酶活性
猫眼草酚含量	0.426 *	1.000												
猫眼草黄素含量	0.493 *	0.757 **	1.000											
有机质含量	-0.083	-0.054	0.034	1.000										
pH 值	0.099	0.037	-0.244	-0.309	1.000									
速效钾含量	-0.280	-0.299	0.494 *	0.646 **	-0.050	1.000								
全钾含量	0.079	0.498 *	0.728 **	0.100	-0.220	0.843 **	1.000							
有效磷含量	0.507 *	0.628 **	0.653 **	0.495 *	-0.324	0.864 **	0.396	1.000						
全磷含量	-0.154	-0.066	0.077	0.720 **	-0.019	0.867 **	0.275	0.702 **	1.000					
碱解氮含量	-0.191	-0.047	0.245	0.779 **	-0.699 **	0.507 *	0.333	0.526 *	0.507 *	1.000				
全氮含量	0.001	0.143	0.217	0.816 **	-0.377	0.457	0.122	0.284	0.576 *	0.827 **	1.000			
微生物总 PLFAs 含量	0.364	0.214	0.520 *	0.230	-0.534 *	-0.106	0.533 *	0.091	0.014	0.421	0.271	1.000		
磷酸酶活性	0.319	0.439	0.388	0.713 **	-0.708 **	0.596 **	0.409	0.682 **	0.677 **	0.813 **	0.654 **	0.454	1.000	
脲酶活性	-0.354	-0.311	-0.133	0.796 **	-0.285	0.713 **	0.042	0.559 *	0.736 **	0.730 **	0.722 **	-0.005	0.594 **	1.000
蔗糖酶活性	-0.193	-0.230	-0.102	0.823 **	-0.650 **	0.444	-0.134	0.391	0.449	0.795 **	0.701 **	0.242	0.708 **	0.722 **

注：“*”表示显著相关($P < 0.05$)；“**”表示极显著相关($P < 0.01$)。

磷酸酶能将土壤中有机磷或无机磷转化为植物可吸收利用的形态。黄花蒿土壤有效磷含量与东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量呈显著或极显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)，说明土壤有效磷能够促进黄花蒿叶片东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的增加，主要源于磷酸酶的活化；土壤速效钾含量与猫眼草黄素含量呈显著正相关($P < 0.05$)，全钾含量与猫眼草酚、猫眼草黄素含量分别呈显著正相关($P < 0.05$)、极显著正相关($P < 0.01$)，表明速效钾可以促进猫眼草黄素含量的增加；土壤微生物总 PLFAs 含量与全钾含量呈显著正相关($P < 0.05$)，说明黄花蒿土壤微生物可以活化土壤中的钾，使得土壤中有效磷和速效钾的含量得到提高，有利于黄花蒿对有效磷和速效钾的吸收利用，从而促进黄花蒿植株的生长以及叶片中东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素的累积。

2.6 土壤养分及微生物与黄花蒿酚类物质含量因子分析

对黄花蒿土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、脲酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、微生物总 PLFAs 含量以及 pH 值影响黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的 12 项指标进行因子分析，通过 KMO (Kaiser - Meyer - Olkin)、Bartlett 检验，结果得到 KMO 值为 0.573， P 值为 0.000，小于显著水平 0.05，表示适合做因子分析。由表 5 可知，前 3 个公共因子的特征值均大于 1，累积方差贡献率达到 88.221%，表明前 3 个公共因子基本可以反映影响整个黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草

酚、猫眼草黄素含量因子的信息。

由于各因子负载值趋于两极分化，对前 3 个公共因子采用方差极大正交旋转后的因子载荷矩阵具有一定的生物学意义。基于各因子在某一成分的载荷大小确定其所起作用，由表 6 可知，速效钾、有效磷含量和 pH 值 3 项指标对第 1 个公共因子起主要作用，方差贡献率为 54.293%。有机质含量、碱解氮含量、全氮含量、脲酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、微生物总 PLFAs 含量等 7 个指标对第 2 个公共因子起主要作用，其方差贡献率为 19.452%，全钾、全磷含量这 2 项指标对第 3 个公共因子起主要作用，其方差贡献率为 14.068%。结果表明，影响黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的主要因子有速效钾、有效磷含量，其次为有机质含量、碱解氮含量、全氮含量、磷酸酶活性、脲酶活性、蔗糖酶活性、微生物总 PLFAs 含量，这和分析土壤特征与黄花蒿酚类组分相关性的结果基本一致。

3 结论

通过不同样地土壤特征与黄花蒿酚类物质含量的相关分析及因子分析，初步明确土壤有效磷含量能够促进黄花蒿叶片东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素含量的增加，速效钾含量能够促进猫眼草黄素含量的增加；人工栽培黄花蒿可结合当地土壤实际状况，适量增施磷肥与钾肥，可促进黄花蒿东莨菪内酯、猫眼草酚、猫眼草黄素的累积。这为人工栽培黄花

表 5 特征值和累积贡献率

因子	初始特征值			抽去后特征值			旋转平方和载入		
	总特征值	方差贡献率 (%)	累积贡献率 (%)	总特征值	方差贡献率 (%)	累积贡献率 (%)	总特征值	方差贡献率 (%)	累积贡献率 (%)
1	5.972	54.293	54.293	5.972	54.293	54.293	4.221	38.375	38.375
2	2.185	19.452	74.153	2.185	19.860	74.153	3.820	34.731	73.106
3	1.547	14.068	88.221	1.547	14.068	88.221	1.663	15.115	88.221
4	0.684	6.215	94.437						
5	0.329	2.992	97.428						
6	0.143	1.302	98.731						
7	0.061	0.551	99.282						
8	0.039	0.351	99.633						
9	0.022	0.324	99.831						
10	0.018	0.311	99.839						
11	0.016	0.116	99.975						
12	0.003	0.025	100.000						

表 6 方差极大正交旋转后因子载荷矩阵

指标	第 1 公共因子	第 2 公共因子	第 3 公共因子
有机质含量	0.653	0.697	0.016
速效钾含量	0.921	0.189	0.012
全钾含量	0.139	-0.028	0.979
有效磷含量	0.802	0.339	0.158
全磷含量	0.437	0.098	0.776
碱解氮含量	0.208	0.942	0.073
全氮含量	0.528	0.577	0.335
脲酶活性	0.104	0.764	-0.249
磷酸酶活性	0.356	0.854	0.139
蔗糖酶活性	0.203	0.875	-0.300
微生物总 PLFAs 含量	-0.334	0.657	0.560
pH 值	-0.641	0.141	-0.594

蒿,提高黄花蒿的品质提供了科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 马进,向极钎,杨永康,等. 黄花蒿新品种选育现状及其系统选育研究进展[J]. 湖北农业科学,2014,53(19):4520-4524.
- [2] Organization W H. World malaria report 2010[J]. Working Papers, 2010,30(82):189-206.
- [3] Peng W X, Wang K L, Song T Q, et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(2):811-820.
- [4] 张小波,郭兰萍,黄璐琦,等. 广西青蒿生产适宜性的区域差异分析[J]. 资源科学,2008,30(5):759-764.
- [5] Yang Z N, Zhu S Q, Yu Z W. Comparison of terpene components from flowers of *Artemisia annua*[J]. Bangladesh Journal of Pharmacology, 2012,7(2):420-434.
- [6] Liu K C, Yang S L, Roberts M F, et al. Antimalarial activity of *Artemisia annua* flavonoids from whole plants and cell cultures[J]. Plant Cell Reports,1992,11(12):637-640.
- [7] 罗世琼,黄建国,袁玲. 野生黄花蒿土壤的养分状况和微生物特征[J]. 土壤学报,2014,51(4):868-879.
- [8] Bhakuni R S, Jain D C, Sharma R P, et al. Secondary metabolites of *Artemisia annua* and their biological activity[J]. Current Science, 2000,80(1):35-48.
- [9] 吴丹,罗世琼,杨占南,等. 土壤养分及微生物特征对鱼腥草多酚和总黄酮的影响及相关性分析[J]. 中国中药杂志,2015,40(8):1444-1452.
- [10] 漆小雪,韦霄,蒋运生,等. 青蒿素含量与土壤、植株养分含量

关系的研究[J]. 广西植物,2009,29(5):627-630,598.

- [11] Hawkes C V, Wren I F, Herman D J, et al. Plant invasion alters nitrogen cycling by modifying the soil nitrifying community[J]. Ecology Letters,2005,8(9):976-985.
- [12] 吴海荣,强胜. 加拿大一枝黄花生物生态学特性及防治[J]. 杂草科学,2005(1):52-56.
- [13] 牛红榜,刘万学,万方浩. 紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响[J]. 生态学报,2007,27(7):2051-2060.
- [14] 张小波,郭兰萍,黄璐琦. 我国黄花蒿中青蒿素含量的气候适宜性等级划分[J]. 药科学报,2011,46(4):475-477.
- [15] Ferreira J F, Luthria D L, Sasaki T, et al. Flavonoids from *Artemisia annua* L. as antioxidants and their potential synergism with artemisinin against malaria and cancer[J]. Molecules, 2010, 15(5):3135-3170.
- [16] 杨剑虹,王成林,代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京:中国大地出版社,2008:42-48.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业出版社,1986:274-313.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:13-18.
- [19] 赵兰坡,姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报,1986(3):138-141.
- [20] 余正文,王伯初,杨占南,等. 高效液相色谱法同时测定青蒿中东莨菪内酯、猫眼草酚及猫眼草黄素[J]. 中国酿造,2011(9):175-178.
- [21] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. Canadian Journal of Biochemistry & Physiology, 1959,37(8):911-917.
- [22] Frostegard A, Tunlid A, Baath E. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1993,59(11):3605-3617.
- [23] 颜慧,蔡祖聪,钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报,2006,43(5):851-859.
- [24] 吴蜀瑶,李敏,王佳黎. HPLC 测定青蒿植株不同部位的东莨菪内酯含量[J]. 中国现代中药,2010,12(6):20-22.
- [25] Ika D, Franz Z, Axel M, et al. Microbial community composition and activity in different Alpine vegetation zones[J]. Soil Biology & Biochemistry,2010,42(2):155-161.