

五种野生青海食用菌提取物的抗氧化活性研究

李宏吉¹, 焦迎春^{1,2}, 范琳琳¹, 董亚晨¹, 陈启和¹

(1. 浙江大学食品科学与营养系, 浙江杭州 310058) (2. 青海大学农牧学院, 青海西宁 810016)

摘要: 本文综合分析了草原白蘑菇 1 号 *Agaricus bisporus* (Lange) Sing.、毛头鬼伞 *Coprinus comatus* (Muell.:Fr.) S.F.Gray.、墨汁鬼伞 *Coprinus atramentarius* (Bull.)Fr.、长根菇 *Collybia radi-cata* (Relh.ex Fr.)Quel.和翘林丝盖伞 *Inocybe calamistrata* (Fr.)Gill.五种来自青海的野生食用真菌的抗氧化活性及相关成分。翘林丝盖伞的两种提取物均表现出了最强的 DPPH 自由基清除能力, 其甲醇提取物和乙醇提取物的 EC₅₀ 值分别为 0.90±0.06 mg/mL 和 0.85±0.14 mg/mL; 长根菇甲醇提取物 (0.45±0.01 mg/mL) 和乙醇提取物 (0.78±0.01 mg/mL) 展现出了最强的铁离子螯合能力; 翘林丝盖伞甲醇提取物 (0.26±0.002 mmol Trolox equivalents/g) 和 55% 乙醇提取物 (0.24±0.003 mmol Trolox equivalents/g) 具有最高的 Trolox 等价摩尔含量。墨汁鬼伞甲醇提取物中抗氧化活性成分-总酚的含量 (19.04±0.30 mg gallic acid equivalents/g) 显著高于其他四种提取物 (P<0.05); 翘林丝盖伞乙醇提取物的总酚含量 (11.41±0.09 mg gallic acid equivalents/g) 显著高于其他四种提取物 (P<0.05)。五种野生食用真菌均具有显著的抗氧化活性, 总体上来说, 翘林丝盖伞的抗氧化活性更强。

关键词: 青海野生食用真菌; 抗氧化活性; 总酚含量

文章编号: 1673-9078(2014)11-188-193

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.11.033

Antioxidant Activities of Five Wild Edible Mushrooms Extracts From Qinghai

LI Hong-ji¹, JIAO Ying-chun^{1,2}, FAN Lin-lin¹, DONG Ya-chen¹, CHEN Qi-he¹

(1. Department of Food Science and Nutrition, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(2. Agriculture and Animal Husbandry College, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: The aim of the present study was to comprehensively analyze the antioxidant activities and relevant components of five wild edible mushrooms: *Agaricus bisporus* (Lange) Sing., *Coprinus comatus* (Muell.: Fr.) S. F. Gray., *Coprinus atramentarius* (Bull.) Fr., *Collybia radicata* (Relh. ex Fr.) Quel., and *Inocybe calamistrata* (Fr.) Gill. from Qinghai province. The two extracts of *I. calamistrata* showed the strongest 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging capacity, and the EC₅₀ values of its methanolic crude extract (MCE) and ethanolic crude extract (ECE) were 0.90 ± 0.06 mg/mL and 0.85 ± 0.14 mg/mL, respectively. The MCE (0.45 ± 0.01 mg/mL) and ECE (0.78 ± 0.01 mg/mL) of *C. radicata* showed the strongest metal chelating capacity. Both the MCE (0.26 ± 0.002 mmol Trolox equivalents/g) and ECE (0.24 ± 0.003 mmol Trolox equivalents/g) of *I. calamistrata* possessed the highest micromolar Trolox equivalent per gram. The total content of phenols (active antioxidant components) was significantly higher in the MCE of *C. atramentarius* (19.04 ± 0.30 mg gallic acid equivalents/g) than of the other four extracts (P < 0.05). Similarly, the total phenolic content was significantly higher in the ECE of *I. calamistrata* than of the other four extracts (P < 0.05). All five edible mushrooms showed marked antioxidant capacities; *I. calamistrata* showed the strongest antioxidant activity.

Key words: wild edible mushrooms from Qinghai; antioxidant activity; total phenolic content

随着全球工业化和农业的发展, 含有很多自由基的污染的排放也随之增加^[1], 同时生命体的正常生理代谢也会产生超氧阴离子 (O₂⁻)、过氧化氢 (H₂O₂)、羟基自由基 (·OH) 等自由基^[2]。生物体内自由基的

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY12C20009; LY13H300003); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-0482)

作者简介: 李宏吉 (1991-), 女, 在读研究生, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 陈启和 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学

生成系统 (氧化系统) 和清除系统 (抗氧化系统) 之间存在一定的平衡。一旦平衡被破坏, 就会对体内的 DNA、蛋白质等生物大分子产生氧化损害^[3], 现代病理学研究表明, 这种氧化损害与衰老和许多疾病有关, 如动脉粥样硬化、肝硬化、糖尿病、风湿性关节炎、癌症等^[4]。为了减少活性氧对人体的伤害, 人们开发了大量的合成抗氧化剂, 如丁基羟基茴香醚 (BHA), 二丁基羟基甲苯 (BHT), 叔丁基对苯二酚 (TBHQ), 没食子酸丙酯 (PG) 等, 但由于毒性和致癌作用等原

因,许多国家已停止或严格限制其使用。寻找和开发天然、无毒的抗氧化剂已成为人们关注的焦点。食用菌安全天然,富含膳食纤维,风味和口感独特,而且食用菌中积累了各种各样的与其药用和功能价值有关的例如酚类、聚酮类、萜烯和类固醇类化合物的次级代谢产物^[5]。大量研究表明,食用菌具有显著地抗氧化活性,这种特性与菌体的总酚含量^[6]以及多糖含量^[7]密切相关。综上,食用真菌可能是寻找天然抗氧化活性物质的理想材料。

本实验选取 5 种来源青海的野生食用真菌-草原白蘑菇 1 号 *Agaricus bisporus*(Lange) Sing.(草原 1 号)、毛头鬼伞 *Coprinus comatus* (Muell. :Fr.) S.F.Gray. (白鸡腿)、墨汁鬼伞 *Coprinus atramentarius* (Bull.)Fr. (黑鸡腿)、长根菇 *Collybia radi-cata*(Relh.ex Fr.)Quel. (丝蘑)和翘林丝盖伞 *Inocybe calamistrata*(Fr.)Gill. (翘刺),它们口味鲜美,子实体肥厚,具有进行商业化人工培育,面向大众消费的价值。但尚未有关于他们的抗氧化活性方面的研究,本文采用 4 种抗氧化活性检测体系-DPPH 自由基清除能力、铁离子螯合能力、总酚含量和奎诺二甲基丙烯酸酯(Trolox)等效抗氧化活性,对上述 5 种野生真菌的甲醇提取物和 55%乙醇提取物的抗氧化活性进行了全面、细致的评价,旨在为进一步人工培养、深入研究和开发利用这 5 种真菌提供理论数据基础。

1 材料与amp;方法

1.1 试剂

DPPH 自由基、BHA 购自 Sigma 公司; Ferrozine、没食子酸、福林酚购自生工生物工程(上海)股份有限公司; EDTA 二钠盐、氯化亚铁、乙醇、甲醇、碳酸钠等购自国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均为分析纯。

1.2 仪器

紫外分光光度计, TU-1810APC, 北京普析通用仪器有限责任公司; 冷冻干燥仪, Freezone 2.5, LABCONCO; 旋转蒸发仪, RE-5299, 上海予华仪器有限公司; 恒温水浴锅, DK-S28, 上海精宏仪器设备有限公司。

1.3 材料准备与提取

5 种野生食用真菌均采自青海柴达木盆地和青海草原上。将采取的真菌子实体部分清洗干净,并剪成体积较小的块状,-45℃冷冻干燥后研磨成粉末。

真菌粉末分别与甲醇和 55%乙醇按固液比 1:8 (m/V)的比例混匀,于 60℃回流提取 2 h,过滤。滤渣同上重复提取一次,合并两次滤液。滤液于 40℃下减压旋蒸浓缩,得真菌甲醇粗提物(Methanolic crude extract, MCE)和真菌乙醇粗提物(Ethanolic crude extract, ECE)。将真菌提取物分别用相应溶剂配置成 20 g/L 的母液,4℃保存备用,保存期不超过一个星期。

1.4 抗氧化活性测定

1.4.1 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) 自由基清除能力测定

DPPH 自由基清除能力测定参照 Shimada 方法^[8]。分别移取各样品溶液 4 mL 加入 1 mL 0.2 mM DPPH 甲醇溶液,混匀,黑暗环境下静置 30 min 后于 515 nm 波长下测定其 OD 值。每个样品平行测定 3 次,取其平均值。以 BHA 作为阳性对照。根据下面公式计算真菌提取物对 DPPH 自由基的清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

注: A_0 为 DPPH 溶液本身的 OD 值(空白对照), A_1 为加有样品或者阳性对照的 DPPH 溶液的 OD 值。

1.4.2 铁离子螯合能力测定

铁离子螯合能力测定参照 Dinis 方法^[9]。在 1 mL 不同浓度(0.25~8 g/L)的真菌样品溶液中均加入 3.7 mL 甲醇、0.1 mL 2 mmol/L 氯化亚铁和 0.2 mL 5 mmol/L ferrozine,混匀,室温下静置 20 min,于 562 nm 处测定其 OD 值。OD 值越低,表明金属离子螯合能力越强。每个样品平行测定 3 次,取其平均值。以 55%乙醇和甲醇作为空白对照,EDTA 二钠盐作为阳性对照。根据下面公式计算真菌提取物的铁离子螯合能力:

$$\text{铁离子螯合能力}/\% = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

注: A_0 为空白对照的 OD 值, A_1 为加有样品或者阳性对照的 OD 值。

1.4.3 总酚含量测定

总酚含量测定参照 Sudha 方法^[10]。将 1 mL 浓度为 3 g/L 的真菌样品溶液与 1 mL 福林酚混合,静置 3 min 后,加入 1 mL 35%的饱和碳酸钠,然后加入去离子水使反应体系稀释至 10 mL。混匀,室温下黑暗处放置 90 min,于 725 nm 波长下测定其 OD 值。以没食子酸标准品(GAE)作标准曲线计算块菌样品溶液中相应的总酚含量。每个样品平行测定 3 次,取其平均值。

1.4.4 奎诺二甲基丙烯酸酯(Trolox)等效抗氧化活性测定

Trolox 等效抗氧化活性测定参照 Miller &

Rice-Evans 方法^[1]。正铁肌红蛋白和过氧化氢会结合生成 ferryl 肌红蛋白自由基, 会氧化 ABTS (2, 2'-连氨基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸))生成自由基阳离子 ABTS⁺, 该自由基阳离子是呈绿色的可溶性的发色体, 可以在 405 nm 处利用紫外分光光度计进行定量检测。

1.5 数据分析

利用 SPSS 软件对实验数据进行分析。实验数据采用单向方差分析法 (Analysis of variance, ANOVA) 进行检验, 平均数之间的差异显著性则利用 Duncan 多重比较法 (Duncan's multiple range test, DMRT) 进行判断, 若 P<0.05, 则认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 DPPH 自由基清除能力

DPPH 自由基是一种稳定的自由基, 被广泛的用于评价抗氧化剂的自由基清除能力。从图 1 中可以看出, 无论是甲醇提取物还是乙醇提取物, DPPH 自由基清除能力都呈现出了剂量依赖性, 在一定得浓度范围内, 随着浓度的升高, 自由基清除能力均先有升高后到达其稳定值。当提取物浓度为 8 mg/mL 时, 各种真菌的两个提取物所达到的自由基清除率均比较接近, 翘刺 MCE(62.89±0.39)>翘刺 ECE(62.07±0.84)>白鸡腿 MCE(61.98±0.81)>黑鸡腿 MCE(60.99±0.74)>草原 1 号 ECE(60.12±0.42)>草原 1 号 MCE(59.98±0.33)>白鸡腿 ECE(59.88±1.93)>黑鸡腿

ECE (59.39±0.73) > 丝蘑 MCE (57.99±0.37) > 丝蘑 ECE (57.21±0.42)。而选为阳性对照的商业化抗氧化剂 BHA 在浓度为 0.25 mg/mL 时的清除率就已达到 53.53±0.51, 但在 6 mg/mL 时已稳定在 55.88% 左右, 并且小于样品提取物的自由基清除率。

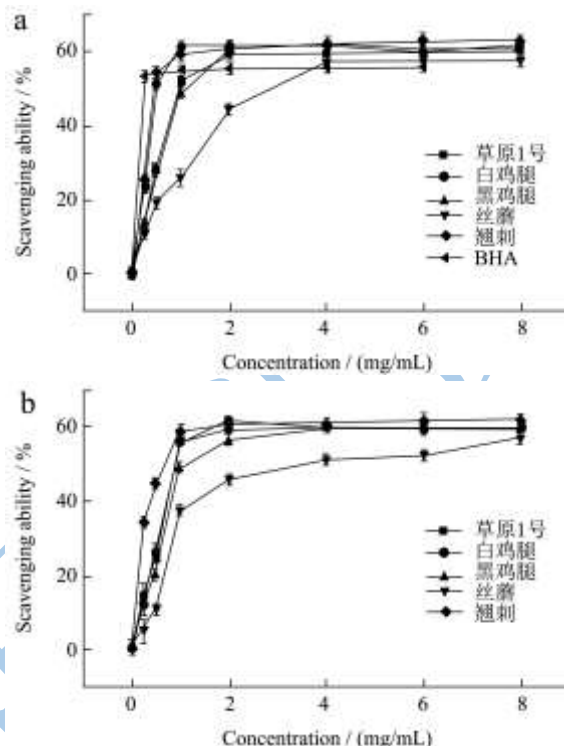


图 1 五种真菌的甲醇提取物 (a) 和乙醇提取物 (b) 的 DPPH 自由基清除活性

Fig.1 DPPH radical scavenging activity of MCE(a) and ECE (b) from five different species of edible mushrooms

表 1 来自五种食用真菌的两种提取物的 DPPH 自由基清除和铁离子螯合能力的 EC₅₀ 值

Table 1 EC₅₀ values of two extracts from five edible mushrooms for DPPH scavenging ability and metal chelating effect

	EC ₅₀ value/(mg/mL)				
	草原 1 号	白鸡腿	黑鸡腿	丝蘑	翘刺
甲醇提取物					
DPPH 自由基清除能力	2.22±0.09 ^{aB}	1.00±0.21 ^{bC}	2.06±0.04 ^{bB}	3.66±0.06 ^{bA}	0.90±0.06 ^{aC}
铁离子螯合能力	0.85±0.06 ^{bC}	1.13±0.03 ^{bA}	0.91±0.01 ^{bC}	0.45±0.01 ^{bD}	1.04±0.02 ^{aB}
55%乙醇提取物					
DPPH 自由基清除能力	1.95±0.06 ^{bC}	2.07±0.07 ^{aC}	2.43±0.07 ^{aB}	4.04±0.11 ^{aA}	0.85±0.14 ^{aD}
铁离子螯合能力	1.58±0.01 ^{aA}	1.59±0.13 ^{aA}	1.33±0.02 ^{aB}	0.78±0.01 ^{aC}	0.83±0.03 ^{bC}

注: EC₅₀值: 分别指 DPPH 自由基清除率为 50% 时对应的样品浓度和铁离子螯合能力为 50% 时对应的样品浓度。EC₅₀ 值与抗氧化活性呈负相关, 即 EC₅₀ 值越大说明抗氧化活性越小。每个值均被表示为平均数±标准差 (n=3), 一行内各平均值具有不同大写字母表示差异显著 (P<0.05); 一列内相应指标对应的不同提取物具有不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。

EC₅₀ 值的结果也与上述结果类似 (见表 1)。翘刺的甲醇提取物的 EC₅₀ 值 (0.90±0.06 mg/mL) 显著低于黑鸡腿 (2.06±0.04 mg/mL), 草原 1 号 (2.22±0.09 mg/mL) 和丝蘑 (3.66±0.06 mg/mL) (P<0.05), 小于

白鸡腿 (1.00±0.21 mg/mL) 但无显著性差异。而翘刺的乙醇提取物的 EC₅₀ 值 (0.85±0.14 mg/mL) 显著小于另外四种食用真菌 (P < 0.05), 其中草原 1 号 (1.95±0.06 mg/mL) 和白鸡腿 (2.07±0.07 mg/mL) 的

EC₅₀ 值无显著性差异,而 BHA 的 EC₅₀ 值仍是最小的,为 0.01±0.01 mg/mL。食用真菌 *A. Bisporus* 甲醇提取物 DPPH 自由基清除能力的 EC₅₀ 值为 3.13±0.09 mg/mL^[12]。另外,四种人工培育的食用菌的乙醇提取物的 EC₅₀ 值从 2.56±0.31 mg/mL 变化到 34.60±0.44 mg/mL^[13]。可见,五种真菌的两种提取物对 DPPH 自由基均有显著地清除能力,具有充当抗氧化剂的潜能,其中翘刺对 DPPH 自由基的清除能力最强,而丝蘑在 DPPH 自由基清除方面的抗氧化活性则相对较弱。

2.2 铁离子螯合能力

在生物系统中,铁离子可通过 Haber-Weiss 和 Fenton 反应激发脂质过氧化反应,这一过程会产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$);而在食物系统中,铁离子则是最有效的氧化强化剂。同时,金属离子具有催化能力,与关节炎和癌症的发病率有关^[14]。Ferrozine 可以定量的与 Fe²⁺ 形成化合物,而抗氧化剂则可以干扰这一过程,使得形成的红色化合物的量减少。本研究中的五种真菌的十个提取物和阳性对照均干扰了 ferrozine 与 Fe²⁺ 化合物的形成,说明五种真菌均有螯合能力,能先于 ferrozine 与 Fe²⁺ 结合。如图 3 所示,当甲醇提取物浓度为 2 mg/mL 时,丝蘑的铁离子螯合能力就已达到 81.74%,高于翘刺(74.11%)、白鸡腿(72.45%)、草原 1 号(68.73%)和黑鸡腿(68.28%),但仍低于阳性对照 EDTA 二钠盐(97.00%)。浓度小于 2 mg/mL 时,铁离子螯合能力增长较快,高于 2 mg/mL 时,增长放缓,最终在 8 mg/mL 时分别达到 83.57%(丝蘑)、81.49%(白鸡腿)、80.93%(黑鸡腿)、80.27%(翘刺)和 79.34%(草原 1 号)。而乙醇提取物浓度为 4 mg/mL 时,翘刺的铁离子螯合能力达到 79.08%,高于丝蘑(77.71%)、黑鸡腿(77.43%)、白鸡腿(68.68%)和草原 1 号(67.69%),此后铁离子螯合能力仍在升高,只是速度有所放缓,在 8 mg/mL 时分别达到黑鸡腿(81.82%)、丝蘑(81.36%)、翘刺(79.83%)、草原 1 号(75.35%)和白鸡腿(73.87%)。

EC₅₀ 值(表 1)也表明,丝蘑的甲醇提取物 EC₅₀ 值(0.45±0.01 mg/mL)显著低于另外四种受试食用菌(P<0.05),其乙醇提取物的 EC₅₀ 值(0.78±0.01 mg/mL)与翘刺的 EC₅₀ 值(0.83±0.03 mg/mL)无显著性差异的同时显著低于另外三种受试食用菌(P<0.05)。同时,丝蘑甲醇提取物的 EC₅₀ 值显著低于乙醇提取物的 EC₅₀ 值(P<0.05)。说明丝蘑与其余四种食用菌相比具有更优异的铁离子螯合能力,而白鸡腿提取物干扰 ferrozine 与 Fe²⁺ 形成化合物的能力则相对比较弱(MCE EC₅₀ 值为 1.13±0.03 mg/mL; ECE EC₅₀

值为 1.59±0.13 mg/mL)。Guo 等^[15]实验表明, *Tuber indicum* 的乙醇提取物的 EC₅₀ 值为 0.98±0.003 mg/mL。而在 Witkowska 等^[16]研究发现,受试 16 种食用菌的甲醇提取物 EC₅₀ 值均高于本研究的数据。由此可以得出结论,这五种蘑菇均可以有效阻止 Fe²⁺-ferrozine 化合物的形成,即这十项提取物都具有显著地铁离子结合能力,而它们作为防止食物发生过氧化反应的保护剂也可能正是出于该结合能力。

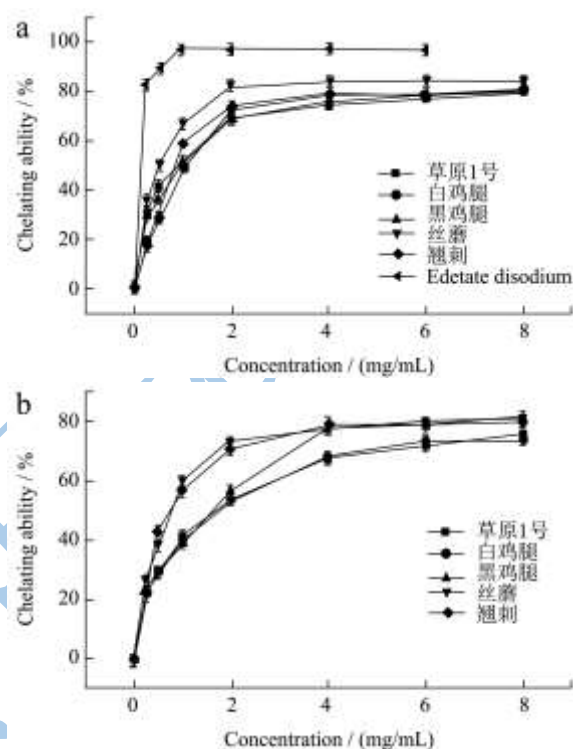


图 2 五种食用真菌的甲醇提取物 (a)、乙醇提取物 (b) 和阳性对照乙二胺四乙酸二钠的铁离子螯合能力

Fig.2 Metal chelating effects of different concentrations of two extracts (A for MCE and B for ECE) of five mushrooms, and the iron chelating capacity of disodium edetate (used as a control)

2.3 Trolox 等效抗氧化活性分析 (TEAC)

TEAC 法被广泛的用于在多种领域中分析组织溶解物、血浆、血清、尿液、唾液和细胞的抗氧化活性。Trolox 是一种水溶性微生物 E 类似物,可作为标准或对照抗氧化剂,相关受试物的抗氧化活性用毫摩尔 Trolox 等价物/克提取物 (mmol Trolox equivalents/g extract) 表示。如表 2 所示,五种食用真菌的甲醇提取物的 Trolox 等价摩尔含量均高于其对应的乙醇提取物的含量,与总酚含量的结果相同。翘刺(0.26±0.002 mmol/g)和白鸡腿(0.25±0.002 mmol/g)甲醇提取物显示出了较高的抗氧化活性,其结果显著高于黑鸡腿(0.24±0.002 mmol/g)、草原 1 号(0.23±0.01 mmol/g)

和丝蘑 (0.23 ± 0.004 mmol/g), 其中后三种真菌的甲醇提取物 Trolox 含量无显著性差异, 在乙醇提取物中也显示出了相同的结果, 而白鸡腿的乙醇提取物的 Trolox 含量 (0.17 ± 0.001 mmol/g) 却显著低于另外四种真菌。通过 Trolox 等效抗氧化活性分析和总酚含量结果的对比, 可以发现其试验数据变化比较类似, 甲醇提取物的抗氧化活性强于乙醇提取物, 而翘刺的抗氧化活性总体上来说是最强的。

2.4 总酚含量

Velioglu等^[17]早在1998年就已报道了植物原料的抗氧化活性可能与它们的酚类化合物的含量有关, Dubost等^[18]在2007年报道氧自由基吸收能力和酚类含量有良好的线性相关性 ($R^2=0.86$)。提取物中的总酚含量在一定程度上与抗氧化活性呈正相关, 这种关系可能与总酚物质的氧化还原性质有关, 该性质使得其可作为还原剂、提供氢原子以及单线态氧清除剂^[19]。表2总结了五种食用真菌的十份提取物的总酚含量, 总酚含量用毫克没食子酸等价物/克提取物 (mg gallic acid equivalents/g extract) 表示。五种食用真菌的相同

提取物之间都具有显著性差异 ($P<0.05$), 同一种食用真菌的不同提取物之间也具有显著性差异 ($P<0.05$), 而且可以看出五种食用真菌的甲醇提取物的总酚含量均显著高于乙醇提取物 ($P<0.05$)。在甲醇提取物中, 黑鸡腿的总酚含量最高 (19.04 ± 0.30 mg/g), 显著高于翘刺 (13.23 ± 0.53 mg/g)、草原1号 (9.95 ± 0.13 mg/g)、白鸡腿 (8.84 ± 0.05 mg/g) 和丝蘑 (5.77 ± 0.27 mg/g)。而乙醇提取物中, 丝蘑的总酚含量是最低的 (4.16 ± 0.22 mg/g), 显著低于白鸡腿 (6.18 ± 0.18 mg/g)、草原1号 (9.04 ± 0.09 mg/g)、黑鸡腿 (10.54 ± 0.23 mg/g) 和翘刺 (11.41 ± 0.09 mg/g)。西班牙 *A. biosporus* 甲醇提取物的总酚含量仅为 3.4 mg/g^[20], 而美国 *A. biosporus* 乙醇提取物的总酚含量为 8.00 ± 0.48 mg/g^[18]。通过与现有报道的食用真菌总酚含量的比较, 我们可以得知受试的五种食用真菌提取物中具有相对较高的总酚含量。翘刺和黑鸡腿在DPPH自由基清除能力和铁离子螯合能力中的优异表现可能与它们含有高总酚相关, 而丝蘑在DPPH自由基清除能力中的高EC₅₀值也可能与其低总酚含量有关。

表2 五种食用真菌的提取物的总酚含量和Trolox等效抗氧化活性

Table 2 Total phenolic contents and Trolox equivalent antioxidant capacity of various extracts from five edible mushrooms

	Content				
	草原1号	白鸡腿	黑鸡腿	丝蘑	翘刺
甲醇提取物					
总酚含量(mg gallic acid equivalents/g)	9.95 ± 0.13 ^{aC}	8.84 ± 0.05 ^{aD}	19.04 ± 0.30 ^{aA}	5.77 ± 0.27 ^{aE}	13.23 ± 0.53 ^{aB}
抗氧化活性分析(mmol Trolox equivalents/g)	0.23 ± 0.01 ^{aB}	0.25 ± 0.002 ^{aA}	0.24 ± 0.002 ^{aB}	0.23 ± 0.004 ^{aB}	0.26 ± 0.002 ^{aA}
55%乙醇提取物					
总酚含量(mg gallic acid equivalents/g)	9.04 ± 0.09 ^{bC}	6.18 ± 0.18 ^{bD}	10.54 ± 0.23 ^{bB}	4.16 ± 0.22 ^{bE}	11.41 ± 0.09 ^{bA}
抗氧化活性分析(mmol Trolox equivalents/g)	0.18 ± 0.01 ^{bB}	0.17 ± 0.001 ^{bC}	0.19 ± 0.004 ^{bB}	0.20 ± 0.003 ^{bB}	0.24 ± 0.003 ^{bA}

注: 每个值均被表示为平均数±标准差 (n=3), 一行内各平均值具有不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 一列内相应指标对应的不同提取物具有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 结论

本研究从 DPPH 自由基清除能力、铁离子螯合能力、总酚含量和 Trolox 等效抗氧化活性分析四个方面评估了草原白蘑菇 1 号、毛头鬼伞、墨汁鬼伞、长根菇和翘刺林丝盖伞五种野生食用真菌的甲醇和 55% 乙醇提取物的抗氧化活性。所有受试样品 DPPH 自由基清除能力和铁离子螯合能力的 EC₅₀ 值均小于 10 mg/mL, 表明五种野生食用真菌均具有良好的抗氧化活性。其

中翘刺的抗氧化活性最强, 表现为总酚含量 (甲醇提取物 13.23 ± 0.53 mg gallic acid equivalents/g, 乙醇提取物 11.41 ± 0.09 mg gallic acid equivalents/g)、Trolox 等价摩尔含量高 (甲醇提取物 0.26 ± 0.002 mmol Trolox equivalents/g, 乙醇提取物 0.24 ± 0.003 mmol Trolox equivalents/g), DPPH 自由基清除能力 (甲醇提取物 0.90 ± 0.06 mg/mL, 乙醇提取物 0.85 ± 0.14 mg/mL) 和铁离子螯合能力 (甲醇提取物 1.04 ± 0.02 mg/mL, 乙醇提取物 0.83 ± 0.03 mg/mL) 的 EC₅₀ 值低。本研究结果

可为野生食用真菌中天然抗氧化活性成分的提取,及其在食品、化妆品和医药等行业的应用研究提供参考。

参考文献

- [1] Stajic M, Vukojevic J, Knezevic A, et al. Antioxidant protective effects of mushroom metabolites [J]. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 2013, 13(21): 2660-2676
- [2] Wagner J R, Hu C C, Ames B N. Endogenous oxidative damage of deoxycytidine in DNA [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1992, 89(8): 3380-3384
- [3] Stajic M, Vukojevic J, Knezevic A, et al. Antioxidant protective effects of mushroom metabolites [J]. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 2013, 13(21): 2660-2676
- [4] Lee J, Koo N, Min D B. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2004, 3(1): 21-33
- [5] Turkoglu A, Duru M E, Mercan N, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill [J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(1): 267-273
- [6] Bai M S, Wang C, Zong S C, et al. Antioxidant polyketide phenolic metabolites from the edible mushroom *Cortinarius purpurascens* [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3424-3427
- [7] Xiao J H, Xiao D M, Chen D X, et al. Polysaccharides from the medicinal mushroom *Cordyceps taii* show antioxidant and immunoenhancing activities in a D-galactose-induced aging mouse model [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, 2012
- [8] Shimada K, Fujikawa K, Yahara K, et al. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992, 40(6): 945-948
- [9] Dinis T C P, Madeira V M C, Almeida L M. Action of phenolic derivatives (acetaminophen, salicylate, and 5-aminosalicylate) as inhibitors of membrane lipid peroxidation and as peroxyl radical scavengers [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1994, 315(1): 161-169
- [10] Sudha G, Vadivukkarasi S, Shree R B I, et al. Antioxidant activity of various extracts from an edible mushroom *Pleurotus eous* [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2012, 21(3): 661-668
- [11] Miller N J, Rice-Evans C A. Factors influencing the antioxidant activity determined by the ABTS⁺ radical cation assay [J]. *Free Radical Research*, 1997, 26(3): 195-199
- [12] Reis F S, Martins A, Barros L, et al. Antioxidant properties and phenolic profile of the most widely appreciated cultivated mushrooms: A comparative study between *in vivo* and *in vitro* samples [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(5): 1201-1207
- [13] Vaz J A, Barros L, Martins A, et al. Chemical composition of wild edible mushrooms and antioxidant properties of their water soluble polysaccharidic and ethanolic fractions [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(2): 610-616
- [14] Halliwell B, Murcia M A, Chirico S, et al. Free radicals and antioxidants in food and *in vivo*: what they do and how they work [J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 1995, 35(1-2): 7-20
- [15] Guo T, Wei L, Sun J, et al. Antioxidant activities of extract and fractions from *Tuber indicum* Cooke & Masee [J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(4): 1634-1640
- [16] Witkowska A M, Zujko M E, Mironczuk-Chodakowska I. Comparative study of wild edible mushrooms as sources of antioxidants [J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2011, 13(4): 335-341
- [17] Velioglu Y S, Mazza G, Gao L, et al. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46(10): 4113-4117
- [18] Dubost N J, Ou B, Beelman R B. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity [J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(2): 727-735
- [19] Chang S T, Wu J H, Wang S Y, et al. Antioxidant activity of extracts from *Acacia confusa* bark and heartwood [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(7): 3420-3424
- [20] Palacios I, Lozano M, Moro C, et al. Antioxidant properties of phenolic compounds occurring in edible mushrooms [J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(3): 674-678