

叶用莴苣抗氧化物及其生物活性研究进展

杨晓¹ 余志² 高丽伟¹ 黄丹枫^{1*}

[¹上海交通大学农业与生物学院, 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; ²华中农业大学园艺林学学院, 园艺植物生物学教育部重点实验室, 湖北武汉 430070]

摘要: 叶用莴苣 (*Lactuca sativa* L.) 又名生菜, 富含多酚化合物、抗坏血酸、类胡萝卜素、VE 等高活性抗氧化物质。本文从生菜抗氧化活性物质的组分及含量、抗氧化活性评价及抗氧化机理、外界因素对生菜抗氧化物的影响等方面综述了生菜抗氧化研究领域近年来的研究成果, 并对未来研究方向进行了展望。

关键词: 叶用莴苣; 抗氧化; 多酚; 生物活性; 综述

叶用莴苣 (*Lactuca sativa* L.) 又名生菜, 为菊科莴苣属一二年生草本植物, 在世界范围内广泛种植。生菜富含抗氧化物质 (如多酚化合物、抗坏血酸、类胡萝卜素、VE 等) 和膳食纤维, 备受消费者推崇。

活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 是呼吸作用中未被完全还原的氧分子及其衍生物, ROS 产生与清除进程在通常情况下处于动态平衡之中; 在慢性或急性胁迫下, 机体内 ROS 清除能力减弱, 动态平衡被打破, ROS 大量聚集, 导致生物系统受损, 并可能引发一系列的疾病或病变, 如动脉硬化、糖尿病、缺血再灌注损伤、老年痴呆症、炎症性疾病 (风湿病、胰腺炎和炎症肠病)、突变、肿瘤、循环失调和衰老 (Halliwell & Gutteridge, 1999)。人体可通过日常食用蔬菜摄入抗氧化活性物, 清除体内多余的 ROS, 从而避免疾病或病变发生。

本文从生菜抗氧化活性物质的组分及含量、抗氧化活性评价及抗氧化机理、外界因素影响等方面综述了生菜抗氧化研究领域近年来的研究进展。

杨晓, 男, 博士研究生, 专业方向: 园艺植物栽培生理, E-mail: yalxd1988@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 黄丹枫, 女, 教授, 博士生导师, 专业方向: 设施园艺技术, E-mail: hdf@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2014-10-27; 接受日期: 2014-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61233006), 国家“863”计划项目 (2012AA101903), 上海市园艺学重点学科培育与建设项目

致谢: 上海交通大学史益敏教授、华中农业大学曹敏惠副教授对此文进行了修订, 特此感谢!

1 生菜抗氧化活性物质的组成

根据作用模式不同, 可将抗氧化活性物分为初级抗氧化剂、次级抗氧化剂和共同抗氧化剂 (Singh & Singh, 2008)。抗坏血酸 (VC)、VE、多酚等初级抗氧化剂可提供氢离子, 阻止脂肪酸过氧化链式反应, 使自由基转化为更为稳定的化合物形态; 次级抗氧化剂主要包括氧化物酶、NADPH 氧化酶、苯醌还原酶、亚铁血红素氧化酶等, 它们能启动自由基反应并降低 ROS 水平; VC 和 VE 结合使得抗氧化活性增强, 它们是一对共同抗氧化剂。

生菜主要抗氧化活性物质包括多酚、VC、VE、类胡萝卜素等, 这些物质可以提高人或动物的抗氧化能力 (Serafini et al., 2002; Nicolle et al., 2004a), 抑制炎症性疾病的发生 (Pepe et al., 2015)、癌细胞的增殖 (Lin et al., 2014; Park et al., 2014), 并对糖尿病的治疗具有积极的作用 (Cheng et al., 2014a, 2014b)。

1.1 多酚

多酚是植物体主要的次级代谢产物, 蔬菜中的多酚主要包括花青素 (Anthocyanidins)、儿茶素 (Catechins)、黄烷酮 (Flavanones)、黄酮 (Flavones)、黄酮醇 (Flavonols) 和酚酸 (Phenolic Acids)。酚类是主要的抗氧化活性物质, 咖啡酸及其衍生物和槲皮素是其主要组分 (García-Macías et al., 2007)。红叶或紫叶生菜的酚类物质含量和抗氧化活性高于绿叶生菜, 多酚种类、配糖体和咖啡酸的衍生

物也更为丰富 (García-Macías et al., 2007; Llorach et al., 2008)。一般而言, 生菜中多酚含量由高到低依次为: 散叶莴苣>直立莴苣>半结球莴苣>结

球莴苣; 因环境和栽培条件不同, 相同品种中多酚含量也有差异 (Romani et al., 2002; Liu et al., 2007)。生菜酚类物质组成如表 1 所示。

表 1 生菜主要多酚类物质

分类	主要成分	参考文献
槲皮素及其糖苷化合物	槲皮素-3-O-半乳糖苷 (Quercetin-3-O-galactoside)	1
	槲皮素-3-O-葡萄糖苷 (Quercetin-3-O-glucoside)	1, 2, 3, 4, 5
	槲皮素-3-O-葡萄糖苷酸 (Quercetin-3-O-glucuronide)	1, 2, 3, 5, 6, 7
	槲皮素-3-O-(6''-O-丙二酰基)葡萄糖苷 [Quercetin-3-O-(6''-O-malonyl) glucoside]	1, 2, 3, 5, 7
	槲皮素-3-O-鼠李糖苷 (Quercetin-3-O-rhamnoside)	1
	槲皮素-3-O-芸香糖苷 (Quercetin-3-O-rutinoside)	1, 2
	槲皮素-3-O-丙二酰葡萄糖苷-7-葡萄糖苷酸 (Quercetin-3-O-malonylglucoside-7-glucuronide) 及旋光异构体	3
	槲皮素-3-O-丙二酰葡萄糖苷-7-葡萄糖苷 (Quercetin-3-O-malonylglucoside-7-glucoside)	3
	槲皮素-3-O-丙二酰葡萄糖苷 (Quercetin-3-O-malonylglucoside)	3
	槲皮素-7-O-葡萄糖苷酸-3-O-(6''-O-丙二酰)葡萄糖苷 [Quercetin-7-O-glucuronide-3-O-(6''-O-malonyl) glucoside]	2
	槲皮素-7-O-葡萄糖苷-3-O-(6''-O-丙二酰)葡萄糖苷 [Quercetin 7-O-glucoside-3-O-(6''-O-malonyl) glucoside]	2
	木樨草素及其糖苷化合物	木樨草素-7-O-葡萄糖苷酸 (Luteolin-7-O-glucuronide)
木樨草素-7-O-葡萄糖苷 (Luteolin-7-O-glucoside)		2
木樨草素-7-O-芸香糖苷 (Luteolin-7-O-rutinoside)		2
矢车菊色素及其糖苷	矢车菊色素-3-O-葡萄糖苷 (Cyanidin3-O-glucoside)	1
	矢车菊色素-3-O-(6''-O-丙二酰)葡萄糖苷 [Cyanidin3-O-(6''-O-malonyl) glucoside]	1, 5
其他黄酮化合物	杨梅素 (Myricetin)	8
	芹黄素 (Apigenin)	8, 13
	山奈酚 (Kaempferol) 及其衍生物	7, 9, 11, 13, 14
酚酸类	单咖啡酒石酸 (Caffeoyltartaric acid)	2, 3, 7
	秦皮甲素 (Esculin)	4
	绿原酸 (Chlorogenic acid)	2, 3, 5, 6, 13, 14, 15
	咖啡酸基苹果酸 (Caffeoylmalic acid)	2, 3, 5
	菊苣酸 (Dicaffeoyltaric acid, chicoric acid) 及其旋光异构体 (meso-dica eoyltartaric acid)	2, 3, 4, 5, 7
	异绿原酸 (3, 5-dica eoylquinic acid, Isochlorogenic acid)	2, 6, 7
	咖啡酸 (Caffeic acid)	3, 6, 13, 14, 15
	阿魏酸 (Ferulic acid)	14
	邻香豆酸 (o-Coumaric acid)	14
	对香豆酸 (p-Coumaric acid)	6, 13, 14
	阿魏酰奎宁酸 (Feruloylquinic acid)	4
	单阿魏酰酒石酸 (Feruloyl tartaric acid)	4
咖啡酰氧基-阿魏酰奎宁酸 (Caffeoylferuloylquinic acid)	4	
甲基-咖啡酰氧基-阿魏酰基-酒石酸异构体 (Methyl-caffeoyl-feruloyl-tartaric acid isomers)	4	
槲皮素及其糖苷含量	1~911 mg·kg ⁻¹ (FW)	8, 9, 10, 11, 12
总酚含量	103.4~291.4 mg·kg ⁻¹ (FW) (以没食子酸为标准)	7, 8, 16, 17

注: 1, Dupont et al., 2000; 2, Llorach et al., 2008; 3, Santos et al., 2014; 4, Pepe et al., 2015; 5, Becker et al., 2014; 6, Nicolle et al., 2004b; 7, Heimler et al., 2007; 8, Bahorun et al., 2004; 9, Hertog et al., 1992; 10, Hollman & Arts, 2000; 11, Bilyk & Sapers, 1985; 12, Crozier et al., 1997; 13, López et al., 2014; 14, Zlotek et al., 2014; 15, Durazzo et al., 2014; 16, Chu et al., 2002; 17, Boo et al., 2011。

1.2 类胡萝卜素

类胡萝卜素是人体自身不能合成却又必不可少的抗氧化活性物质,是植物光氧化防护机制的关键代谢物,也是不可或缺的光合辅助色素,由叶黄素类和胡萝卜素类构成。生菜中类胡萝卜素主要由叶黄素(Lutein)和 β -类胡萝卜素(β -Carotene)组成,其含量分别为 $6.24 \sim 38.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $18.8 \sim 53.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW);此外,新黄素(Neoxanthin)、黄质(Violaxanthin)、玉米黄素(Zeaxanthin)、莴苣黄素(Lactucaxanthin)、隐黄质(Cryptoxanthin)等亦存在于生菜中(Nicollo et al., 2004b; Perry et al., 2009; Cruz et al., 2014; Durazzo et al., 2014; López et al., 2014)。

1.3 VC

VC可直接清除植物体内的ROS,也可通过抗坏血酸-谷胱甘肽(ASA-GSH)循环清除 H_2O_2 ,还能维持VE的还原态,协同VE发挥抗氧化作用。不同品种生菜的VC含量为 $25 \sim 195 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW)(Nicollo et al., 2004b; Durazzo et al., 2014; López et al., 2014)。

1.4 VE

VE是一类脂溶性维生素,根据侧链结构可分为饱和的生育酚(Tocopherol)和不饱和的生育三烯酚(Tocotrienol);根据取代基甲基($-\text{CH}_3$)的位置和数量不同又分为 α 、 β 、 γ 、 δ 等4种构型。VE具有很强的还原性,能先于细胞内的其他结构被氧化,从而起到保护细胞的作用;还能迅速捕获并泯灭ROS,保护生物膜(包括光合膜)系统;亦能保护PS II系统,避免光抑制的危害(Havaux et al., 2005)。 α -Tocopherol、 γ -Tocopherol是生菜VE的主要组分,其含量分别为 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW),VE总量为 $577 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW)(Nicolle et al., 2004b; Altunkaya et al., 2009; Cruz et al., 2014)。

2 生菜抗氧化活性评价及抗氧化机理

抗氧化活性的评价方式有3种:体外抗氧化能力评估、体内抗氧化能力评估和细胞损伤体外模型评价。已有的研究多采用体外方式评估生菜抗氧化能力,主要检测方法包括:清除或抑制自由基(ROS、氮自由基、硫自由基)的能力、测定还

原能力、评估螯合金属离子能力、检测抗氧化酶活性以及测定抑制氧化酶活性的能力。常用的方法包括:1,1-二苯基-2-三硝基苯肼清除能力检测法(DPPH法)、氧自由基清除能力检测法(ORAC法)、总抗氧化能力检测法(ABTS法)、铁离子还原能力检测法(FRAP法)和羟基自由基清除能力检测法。DPPH法测定快速、简便,但对反应体系中的物质存在特定要求(如517 nm附近有吸收的胡萝卜素会对该反应体系造成干扰);ORAC法是国际通用的蔬菜抗氧化能力评价方法,适用于亲水和亲脂体系,但对温度要求苛刻,分析时间长;ABTS法是一种间接检测方法,不能直接表征被测物质抗氧化活性;FRAP法测定简单、快速、便捷,但不能准确的表征断链式和保护性抗氧化活性(Singh & Singh, 2008)。抗氧化剂在不同体系中的活性受诸多因素的影响,单一的评估方法不能较好的表征其活性,因此需要选择多种方法来测定不同的氧化产物,从而获得较为客观的生菜提取物的抗氧化活性。

2.1 抗氧化活性评价及生物活性

Llorach等(2008)使用3种方法(DPPH法、ABTS法和FRAP法)评估了5个生菜品种的抗氧化活性,结果表明不同品种生菜自由基清除率差异极显著,罗莎红(Lollo rosso)具有最高的抗氧化活性,其次为直立生菜(Romaine),结球生菜(Iceberg)抗氧化活性最低;罗莎红的TEAC值是结球生菜的10倍,红叶生菜品种的自由基清除率显著高于绿叶生菜品种,这种抗氧化活性差异可能是由于罗莎红含有大量的花青素造成的(Nicolle et al., 2004b; Liu et al., 2007)。Cano和Arnao(2005)使用ABTS法评估了3个生菜品种的亲水性抗氧化活性(HAA)和亲脂性抗氧化活性(IAA),结果表明Romaine的HAA和IAA最高;生菜各器官中IAA大小依次为外叶>内叶>中间叶>根,而HAA则表现出不同趋势,为外叶>中间叶>内叶>根。Liu等(2007)使用DPPH法评估了在科罗拉多种植的25种生菜的抗氧化能力,结果表明相同环境下栽培的不同品种生菜抗氧化活性差异显著,其中叶用生菜(Leaf lettuce)抗氧化活性最高;季节因素也会影响生菜的抗氧化活性,7月种植的生菜抗氧化活性显著高于9月种植的,这与7月温度和光

照强度较高有关 (Wang & Zheng, 2001)。

综上所述, 生菜抗氧化活性受品种、器官、栽培条件等影响较大。

2.2 抗氧化活性机理

多酚和 VC 是生菜中的主要抗氧化活性物, 其抗氧化活性的贡献率分别为 64% 和 3.2%~24.5% (Nicolle et al., 2004b), 其他组分的贡献率鲜有报道。黄酮化合物、花青素和酚酸是生菜中酚类的主要组分, 其中黄酮化合物含量最高, 主要由槲皮素、山奈酚、木犀草素、杨梅素、芹黄素等构成。黄酮类化合物不仅可以通过物理途径泯灭单线态氧 (1O_2), 而且其自身的酚羟基可供给氢原子与过氧化物和自由基反应生成酚氧自由基, 从而阻断自由基的链式反应, 其结构中的 3, 5-二羟基使得该分子具有很强的自由基吸附和消除能力, B 环上的 O-二羟基结构使得酚氧自由基更为稳定、B 环上的 2, 3-双键与 4-酮基结构形成共轭, 有利于电子的偏移 (Benavente-García et al., 1997); 在黄酮类化合物中, 又以槲皮素清除 1O_2 的化学反应活性最高 (Tournaire et al., 1993)。过氧化物通过 Fe^{2+} 催化氧化形成多种有机物的反应是体内 ROS 的重要来源。多酚可螯合 Fe^{2+} , 抑制芬顿 (Fenton) 反应, 从源头抑制自由基链式反应和体内 ROS 的产生。叶黄素和 β -类胡萝卜素结构内存在着 8 个异戊二烯单位, 与其自身结构两端的结构单位形成共轭体系, 该体系具有泯灭 1O_2 和清除自由基的作用, 并能减轻自由基对 DNA、RNA 和细胞膜的损伤 (Maiani et al., 2009)。VE 和 VC 也是生菜中重要的抗氧化活性物。VE 分子的酚氧基能迅速捕获并泯灭 ROS, 与脂类过氧基反应生成不饱和脂肪酸, 其自身被氧化成生育酚过氧自由基; 其疏水侧链可直接还原氧化型巯基, 也可联合谷胱甘肽间接还原巯基 (Grusak & Dellapenna, 1999)。VC 不仅可以直接清除氧化应激反应中生成的过量 ROS, 还能通过 AsA-GsH 循环间接清除 H_2O_2 (Asada, 1999)。

在生菜中, 抗氧化活性物还存在着协同效应, 主要表现在以下两方面: 一是保护与再生作用。机体中的 VE 总是优先被氧化成生育酚过氧自由基, 从而保护其他具有抗氧化活性的物质; 机体内也存在可将生育酚过氧自由基还原为 VE、避免其降解的一类物质, 如 VC、胡萝卜素、酚类等; 同时,

生育酚也能使氧化态的胡萝卜素、酚类等物质再生 (Mortensen & Skibsted, 1997a, 1997b; Asada, 1999)。二是通过发挥不同机制, 增强抗氧化作用效果。在机体内, 抗氧化活性组分具有协同效应, 各组分通过发挥不同的作用机制, 可增加彼此抗氧化作用的效果。Altunkaya 等 (2009) 研究表明, 生菜中 α -生育酚和槲皮素具有协同抗氧化作用, 其共同抗氧化活性大于两者活性之和, 这与两者在清除 ROS 的进程中相互保护的协同作用有关 (Becker et al., 2004)。

3 外界因素对生菜抗氧化物的影响

生菜的抗氧化活性既受本身遗传因素影响, 也受到光照、温度和营养因子等外界因素的影响。光照和紫外线、低温、干旱或水涝、伤害、蔗糖浓度、植物激素等因素均能影响多酚积累和诱导酚类合成的相关基因的表达, 从而影响生菜的抗氧化活性。

3.1 光照对生菜抗氧化物的影响

光胁迫下, 生菜类黄酮和花青素大量积累, 使得植株能有效抵抗太阳辐射, 保护光合器官免受损坏, 其体内的抗氧化活性也随之发生改变。紫外光处理下, 生菜酚类含量 (特别是花青素含量) 显著提高 (Li & Kubota, 2009; Samuoliene et al., 2012); UV-A 和 UV-B 处理能显著提高总酚、类黄酮含量和抗氧化活性 (Lee et al., 2014); 蓝光处理下, 花青素含量提高 31%, 类胡萝卜素含量显著增加 6%~8%, 总酚酸在补充红光处理后显著提高 6% (Li & Kubota, 2009); 橙光增加了酚类含量 (Lee et al., 2014)。随着这些物质的积累, 生菜抗氧化活性也随之提高。远红光辐照下生菜中花青素含量显著降低 40%, 类胡萝卜素生物合成受阻 (Li & Kubota, 2009); 外源光处理对 VE 和 VC 的合成均有抑制作用 (Samuoliene et al., 2012)。

3.2 温度对生菜抗氧化物的影响

低温有利于生菜叶片中矢车菊色素-3-O-(6"-O-丙二酰基)葡萄糖苷和咖啡酸基苹果酸的积累 (Becker et al., 2014); 相对低温 (日均温 20 °C, 夜均温 13 °C) 有利于总多酚 (包括花青素) 的积累, 多酚氧化酶 (PPO) 和苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的活性及生菜抗氧化活性提高 (Boo et al., 2011)。夏季收获的生菜抗氧化活性显著高于秋季, 但酚类含

量差异不显著,推测较高的温度和较强的光照有利于生菜抗氧化活性的提高,这与酚类、类胡萝卜素、VC和VE等物质积累有关(Liu et al., 2007)。

3.3 其他因素对生菜抗氧化物的影响

糖是酚类物质合成的前体,可以提供能量和碳架。在多酚合成过程中,糖还是一种渗透调节物质和信号分子(Villadsen & Smith, 2004)。已有的研究表明蔗糖可以促进多酚类物质的积累(Guo et al., 2005; Zheng et al., 2009),上调酚类合成酶的表达式(Ohto et al., 2001; Baier et al., 2004; Teng et al., 2005; Solfanelli et al., 2006)。

CO₂、O₂等气体也能调节生菜抗氧化活性,同时补充CO₂和强光照或补充CO₂和盐含量都能使生菜的抗氧化活性增高(Pérez-López et al., 2013);在低气压和低O₂浓度条件下,生菜抗氧化活性提高,酚类和花青素含量增加(He et al., 2013)。

硒(Se)是一类可抗氧化营养素(antioxidant nutrients),主要通过提高抗氧化酶的活性进而提高抗氧化水平;碘(I)也具有抗氧化活性,是一种无机抗氧化剂(Küpper et al., 2008)。已有的研究表明,在植物中I和Se可以通过与被过度还原的光合反应中心发生反应从而阻止ROS的产生,避免由高强度的光诱导产生ROS从而对细胞造成氧化损伤(Szabó et al., 2005; Küpper et al., 2008)。在生菜栽培过程中外源添加适量的Se或I,不仅可以提高植株的Se含量或I含量,以及抗氧化活性物(多酚、黄酮、VC、酚酸及其糖苷)的含量,且不会抑制植株生长(Blasco et al., 2008; Ríos et al., 2008, 2013; Smolen et al., 2014)。

使用含氯的水溶液(100~200 mg·L⁻¹游离态氯)处理生菜可显著降低PAL活性,提高异绿原酸含量(Baur et al., 2004)。生菜植株受伤后,其抗氧化活性也会增加,这与伤害造成的多酚类物质含量增加有关(Kang & Saltveit, 2002; Fernando et al., 2007)。

4 展望

近年来,学者们就生菜抗氧化问题开展了大量的研究工作,在一些方面已经取得了较大进展,如生菜具有抗氧化活性物质的种类鉴定与分析,生菜抗氧化活性物质的合成与环境调控,(非)生物胁迫

与植物激素对抗氧化系统的影响。但仍有一些问题需要深入研究:①生菜抗氧化物合成代谢途径的解析。生菜多酚和VE等抗氧化物生物合成途径尚不明晰,关键酶基因尚需进一步克隆与鉴定;酚类物质积累规律较为复杂,受到糖苷化、甲基化、氧化、聚合作用等影响,都需要进行进一步的研究。②生菜多糖的鉴定解析与抗氧化活性功能研究。许多植物多糖具有抗氧化活性,但目前鲜有针对生菜多糖的抗氧化研究;生菜多糖的提纯与鉴定、多糖构效关系解析、多糖抗氧化活性及其他生物活性(如降血压、降血脂等作用)、具有高附加值的产品开发等方面值得深入研究。③优化栽培措施,培育高抗氧化活性生菜。展开不同品种生菜抗氧化活性差异研究,探究不同环境因子对抗氧化活性物的种类和含量的影响,这对选育具有高抗氧化活性生菜品种和确定周年种植方案具有重大意义。④生菜抗氧化活性物的提取与纯化。制备高纯度的生菜抗氧化提取物是开展生菜营养与人体健康研究、开发具有附加值的深加工产品的基础。通过这些工作的开展,有利于进一步认识生菜抗氧化活性,对指导健康膳食具有重要意义。

参考文献

- Altunkaya A, Becker E M, Gokmen V, Skibsted L H. 2009. Antioxidant activity of lettuce extract (*Lactuca sativa*) and synergism with added phenolic antioxidants. *Food Chemistry*, 115 (1): 163-168.
- Asada K. 1999. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annual Review of Plant Biology*, 50 (1): 601-639.
- Bahorun T, Luximon-Ramma A, Crozier A, Aruoma O. 2004. Total phenol, flavonoid, proanthocyanidin and vitamin C levels and antioxidant activities of Mauritian vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (12): 1553-1561.
- Baier M, Hemmann G, Holman R, Corke F, Card R, Smith C, Rook F, Bevan M W. 2004. Characterization of mutants in *Arabidopsis* showing increased sugar-specific gene expression, growth, and developmental responses. *Plant Physiology*, 134 (1): 81-91.
- Baur S, Klaiiber R G, Kobl A, Carle R. 2004. Effect of different washing procedures on phenolic metabolism of shredded, packaged iceberg lettuce during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (23): 7017-7025.
- Becker E M, Nissen L R, Skibsted L H, Krumbein A. 2004. Antioxidant evaluation protocols: food quality or health effects. *European Food Research and Technology*, 146 (6): 561-571.

- Becker C, Klaering H P, Kroh L W, Krumbein A. 2014. Cool-cultivated red leaf lettuce accumulates cyanidin-3-O-(6"-O-malonyl) glucoside and caffeoylmalic acid. *Food Chemistry*, 146: 404-411.
- Benavente-García O, Castillo J, Marin F R, Ortuño A, DelRío J A. 1997. Uses and properties of Citrus flavonoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (12): 4505-4515.
- Bilyk A, Sapers G M. 1985. Distribution of quercetin and kaempferol in lettuce, kale, chive, garlic chive, leek, horseradish, red radish, and red cabbage tissues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33 (2): 226-228.
- Blasco B, Ríos J J, Cervilla L M, Sánchez-Rodríguez E, Ruiz J M, Romero L. 2008. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health. *Annals of Applied Biology*, 152 (3): 289-299.
- Boo H, Heo B, Gorinstein S, Chon S. 2011. Positive effects of temperature and growth conditions on enzymatic and antioxidant status in lettuce plants. *Plant Science*, 181 (4): 479-484.
- Cano A, Arnao M B. 2005. Hydrophilic and lipophilic antioxidant activity in different leaves of three lettuce varieties. *International Journal of Food Properties*, 8 (3): 521-528.
- Cheng D M, Pogrebnyak N, Kuhn P, Krueger C G, Johnson W D, Raskin I. 2014a. Development and phytochemical characterization of high polyphenol red lettuce with anti-diabetic properties. *Plos One*, 9 (3): 91571.
- Cheng D M, Pogrebnyak N, Kuhn P, Poulev A, Waterman C, Rojas-Silva P, Johnson W, Raskin I. 2014b. Polyphenol-rich rutgers scarlet lettuce improves glucose metabolism and liver lipid accumulation in diet-induced obese c57bl/6 mice. *Nutrition*, 30 (7): 52-58.
- Chu Y, Sun J, Wu X, Liu H R. 2002. Antioxidant and antiproliferative activities of common vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (23): 6910-6916.
- Crozier A, Lean M E, Mcdonald M S, Black C. 1997. Quantitative analysis of the flavonoid content of commercial tomatoes, onions, lettuce, and celery. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (3): 590-595.
- Cruz R, Gomes T, Ferreira A, Mendes E, Baptista P, Cunha S, Pereira J A, Ramalhosa E, Casal S. 2014. Antioxidant activity and bioactive compounds of lettuce improved by espresso coffee residues. *Food Chemistry*, 145: 95-101.
- Dupont M S, Mondin Z, Williamson G, Price K R. 2000. Effect of variety, processing, and storage on the flavonoid glycoside content and composition of lettuce and endive. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (9): 3957-3964.
- Durazzo A, Azzini E, Lazzé M C, Raguzzini A, Pizzala R, Maiani G, Palomba L, Maiani G. 2014. Antioxidants in Italian head lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) grown in organic and conventional systems under greenhouse conditions. *Journal of Food Biochemistry*, 38 (1): 56-61.
- Fernando R L, Emilio V J, Cisneros-Zevallos L. 2007. The increase in antioxidant capacity after wounding depends on the type of fruit or vegetable tissue. *Food Chemistry*, 101 (3): 1254-1262.
- García-Macías P, Ordidge M, Vysini E, Waroonphan S, Battey N H, Gordon M H, Hadley P, John P, Lovegrove J A, Wagstaffe A. 2007. Changes in the flavonoid and phenolic acid contents and antioxidant activity of red leaf lettuce (Lollo rosso) due to cultivation under plastic films varying in ultraviolet transparency. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 55 (25): 10168-10172.
- Grusak M A, Dellapenna D. 1999. Improving the nutrient composition of plants to enhance human nutrition and health. *Annual Review of Plant Biology*, 50 (1): 133-161.
- Guo J C, Hu X W, Duan R J. 2005. Interactive effects of cytokinins, light, and sucrose on the phenotypes and the syntheses of anthocyanins, lignins in cytokinin overproducing transgenic *Arabidopsis*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 24 (2): 93-101.
- Halliwell B, Gutteridge J M. 1999. Free radicals in biology and medicine. Oxford: Oxford University Press.
- Havaux M, Eymery F, Porfirova S, Rey P, Dörmann P. 2005. Vitamin E protects against photoinhibition and photooxidative stress in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell*, 17 (12): 3451-3469.
- He C, Jacobo-Velazquez D A, Cisneros-Zevallos L, Davies F J. 2013. Hypobaric and hypoxia affects phytochemical production, gas exchange, and growth of lettuce. *Photosynthetica*, 51 (3): 465-473.
- Heimler D, Isolani L, Vignolini P, Tombelli S, Romani A. 2007. Polyphenol content and antioxidative activity in some species of freshly consumed salads. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (5): 1724-1729.
- Hertog M G, Hollman P C, Katan M B. 1992. Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of 28 vegetables and 9 fruits commonly consumed in the Netherlands. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40 (12): 2379-2383.
- Hollman P, Arts I. 2000. Flavonols, flavones and flavanols—nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80 (7): 1081-1093.
- Kang H, Saltveit M E. 2002. Antioxidant capacity of lettuce leaf tissue increases after wounding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (26): 7536-7541.
- Küpper F C, Carpenter L J, McFiggans G B, Palmer C J, Waite T J, Boneberg E M, Woitsch S, Weiller M, Abela R, Grolimund D, Potin P, Butler A, Luther G W, Kroneck P M, Meyer-Klaucke W, Feiters M C. 2008. Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (19): 6954-6958.
- Lee M J, Son J E, Oh M M. 2014. Growth and phenolic compounds of *Lactuca sativa* L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or-C lamp. *Journal of the Science of Food and*

- Agriculture, 94 (2): 197–204.
- Li Q, Kubota C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (1): 59–64.
- Lin Y, Yngve A, Lagergren J, Lu Y. 2014. A dietary pattern rich in lignans, quercetin and resveratrol decreases the risk of oesophageal cancer. *British Journal of Nutrition*, 112 (12): 2002–2009.
- Liu X, Ardo S, Bunning M, Parry J, Zhou K, Stushnoff C, Stoniker F, Yu L, Kendall P. 2007. Total phenolic content and DPPH radical scavenging activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in Colorado. *LWT—Food Science and Technology*, 40 (3): 552–557.
- Llorach R, Martínez-Sánchez A, Tomás-Barberán F A, Gil M I, Ferreres F. 2008. Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108 (3): 1028–1038.
- López A, Javier G, Fenoll J, Hellín P, Flores P. 2014. Chemical composition and antioxidant capacity of lettuce: comparative study of regular-sized (Romaine) and baby-sized (Little Gem and Mini Romaine) types. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33 (1): 39–48.
- Maiani G, Castón M J, Catasta G, Toti E, Cambrodón I G, Bysted A, Granado-Lorenzo F, Olmedilla-Alonso B, Knuthsen P, Valoti M, Böhm V, Mayer-Miebach E, Behnlian D, Schemmer U. 2009. Carotenoids: actual knowledge on food sources, intakes, stability and bioavailability and their protective role in humans. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53 (s2): 194–218.
- Mortensen A, Skibsted L H. 1997a. Real time detection of reactions between radicals of lycopene and tocopherol homologues. *Free Radical Research*, 27 (2): 229–234.
- Mortensen A, Skibsted L H. 1997b. Relative stability of carotenoid radical cations and homologue tocopheroxyl radicals: a real time kinetic study of antioxidant hierarchy. *FEBS Letters*, 417 (3): 261–266.
- Nicolle C, Cardinault N, Gueux E, Jaffrelo L, Rock E, Mazur A, Amouroux P, Rémesy C. 2004a. Health effect of vegetable-based diet: lettuce consumption improves cholesterol metabolism and antioxidant status in the rat. *Clinical Nutrition*, 23 (4): 605–614.
- Nicolle C, Carnat A, Fraisse D, Lamaison J, Rock E, Michel H, Amouroux P, Remesy C. 2004b. Characterisation and variation of antioxidant micronutrients in lettuce (*Lactuca sativa* folium). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (15): 2061–2069.
- Ohto M, Onai K, Furukawa Y, Aoki E, Araki T, Nakamura K. 2001. Effects of sugar on vegetative development and floral transition in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 127 (1): 252–261.
- Park J, Kim M, Kwon D, Jeong S, Noh S, So B, Chae S, Cha Y. 2014. Organic and conventional farming: differences in polyphenol content and antioxidant activity of lettuce cultivated on developed nature-friendly compost. *The FASEB Journal*, 28 (1): 830–836.
- Pepe G, Sommella E, Manfra M, de Nisco M, Tenore G C, Scopa A, Sofo A, Marzocco S, Adesso S, Novellino T, Campiglia P. 2015. Evaluation of anti-inflammatory activity and fast UHPLC–DAD–IT–TOF profiling of polyphenolic compounds extracted from green lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Maravilla de Verano). *Food Chemistry*, 167: 153–161.
- Pérez-López U, Miranda-Apodaca J, Muñoz-Rueda A, Mena-Petite A. 2013. Lettuce production and antioxidant capacity are differentially modified by salt stress and light intensity under ambient and elevated CO₂. *Journal of Plant Physiology*, 170 (17): 1517–1525.
- Perry A, Rasmussen H, Johnson E. 2009. Xanthophyll (lutein, zeaxanthin) content in fruits, vegetables and corn and egg products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22 (1): 9–15.
- Ríos J J, Blasco B, Leyva R, Sanchez-Rodriguez E, Wilhelm M M, Romero L, Ruiz J M. 2013. Nutritional balance changes in lettuce plant grown under different doses and forms of selenium. *Journal of Plant Nutrition*, 36 (9): 1344–1354.
- Ríos J J, Rosales M A, Blasco B, Cervilla L M, Romero L, Ruiz J M. 2008. Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. *Scientia Horticulturae*, 116 (3): 248–255.
- Romani A, Pinelli P, Galardi C, Sani G, Cimato A, Heimler D. 2002. Polyphenols in greenhouse and open-air-grown lettuce. *Food Chemistry*, 79 (3): 337–342.
- Samuoliene G, Sirtautas R, Brazaityte A, Duchovskis P. 2012. Led lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chemistry*, 134 (3): 1494–1499.
- Santos J, Oliveira M B P P, Ibanez E, Herrero M. 2014. Phenolic profile evolution of different ready-to-eat baby-leaf vegetables during storage. *Journal of Chromatography A*, 1327: 118–131.
- Serafini M, Bugianesi R, Salucci M, Azzini E, Raguzzini A, Maiani G. 2002. Effect of acute ingestion of fresh and stored lettuce (*Lactuca sativa*) on plasma total antioxidant capacity and antioxidant levels in human subjects. *British Journal of Nutrition*, 88 (6): 615–623.
- Singh S, Singh R P. 2008. In vitro methods of assay of antioxidants: an overview. *Food Reviews International*, 24 (4): 392–415.
- Smolen S, Kowalska I, Sady W. 2014. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 166: 9–16.
- Solfanelli C, Poggi A, Loreti E, Alpi A, Perata P. 2006. Sucrose-specific induction of the anthocyanin biosynthetic pathway in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 140 (2): 637–646.
- Szabó I, Bergantino E, Giacometti G M. 2005. Light and oxygenic photosynthesis: energy dissipation as a protection mechanism against photo-oxidation. *EMBO Reports*, 6 (7): 629–634.
- Teng S, Keurentjes J, Bentsink L, Koornneef M, Smeekens S. 2005. Sucrose-specific induction of anthocyanin biosynthesis in *Arabidopsis* requires the MYB75/PAP1 gene. *Plant Physiology*, 139 (4): 1840–1852.

- Tournaire C, Croux S, Maurette M, Beck I, Hocquaux M, Braun A M, Oliveros E. 1993. Antioxidant activity of flavonoids: efficiency of singlet oxygen ($^1\Delta_g$) quenching. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 19 (3): 205–215.
- Villadsen D, Smith S M. 2004. Identification of more than 200 glucose-responsive *Arabidopsis* genes none of which responds to 3-O-methylglucose or 6-deoxyglucose. *Plant Molecular Biology*, 55 (4): 467–477.
- Wang S Y, Zheng W. 2001. Effect of plant growth temperature on antioxidant capacity in strawberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (10): 4977–4982.
- Zheng Y, Tian L, Liu H, Pan Q, Zhan J, Huang W. 2009. Sugars induce anthocyanin accumulation and flavanone 3-hydroxylase expression in grape berries. *Plant Growth Regulation*, 58 (3): 251–260.
- Zlotek U, Swieca M, Jakubczyk A. 2014. Effect of abiotic elicitation on main health-promoting compounds, antioxidant activity and commercial quality of butter lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Food Chemistry*, 148: 253–260.

Research Progress of Antioxidants and Its Bioactivity in Lettuces

YANG Xiao¹, YU Zhi², GAO Li-wei¹, HUANG Dan-feng^{1*}

[¹Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; ²Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China]

Abstract: Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is rich in antioxidant compounds such as polyphenols, ascorbic acid, carotenoid and Vitamin E. The paper summarized the recent studies on lettuce antioxidant and mainly focused on three perspectives including the constitution and content of antioxidant, the assessment and mechanism of oxidation resistance, and the influence of environmental, and other factors on antioxidant. Furthermore, the prospect in the field of lettuce antioxidant is discussed in detail.

Key words: Lettuce; Antioxidant; Polyphenols; Bio-activity; Review

· 蔬菜史话 ·

芋

芋为天南星科芋属中能形成地下球茎的栽培种，多年生草本植物作一年生栽培。古名蹲鸱，别名芋头、芋艿、毛芋等。叶柄和花梗可作菜用。世界各地均有分布，以中国、日本及太平洋诸岛栽培最多。

芋原产于亚洲南部的热带沼泽地带。蔬菜学者吴耕民先生说：“芋为印度、马来半岛等热带地方原产，在埃及、菲律宾、印度尼西亚等地盛行栽培”。芋的原始种生长在沼泽地带，经长期自然选择和人工培育形成了水芋、水旱兼用芋和旱芋等栽培类型，但至今仍保留着湿生植物的基本特征。野生芋的球茎及叶柄均不发达，涩味极浓，有的有毒，不能食用。

《孝经芋纬·援神契》中所说的莒芋和《汉书》中“岷山之沃野下有蹲鸱”的蹲鸱均为今之芋。据考察，现在滇西、藏东南一带，东南沿海的台湾、福建、广东、广西和浙江等省都有野生芋的分布。这说明我国有着丰富的野生芋资源，为我们的先人在农业起源期栽培、驯化芋奠定了基础。

芋在中国的栽培历史悠久。据现有的古文献资料分析，我国古代栽培芋的重点产区有四川、广东和台湾等地。《史记·货殖列传》云：“汶山之下，沃野，下有蹲鸱，至死不饥”。《正义》：“蹲鸱，芋也”。《华阳国志》亦说：“汶山郡都安县有大芋，如蹲鸱也”。“汶”读“岷”，即岷山，汉汶山郡治所在汶江（即今天的四川茂汶羌族自治县北）。岷山地区自汉即广植芋头，至唐宋仍盛不衰。杜甫有“紫收岷岭芋”的诗句；苏东坡被贬于儋州（今海南）时吃上芋头，联想起家乡吃芋时的风味，也说：“一饱忘故山，不思马少游”。苏东坡的故乡是四川眉山，芋头是当地的重要物产，他在《东坡杂记》及《湘素杂记》中曾经说：“岷山之下，凶年以蹲鸱为粮食，不复疫疠，知此物之宜人也”。可见，四川为我国芋集中产地之一的猜测是能够成立的。

广东自古以来也盛行栽培芋。韩琦（1008–1075）在《中书东厅山芋》、高廉（1573–1620）在《遵生八笺》中称芋为薯、蕷、山芋。熟悉广东物产的清人屈大均说：“东粤多薯。其生山中，纤细而坚实者，曰白鸱苽。似山药而小，亦曰土山药。最补益人”。芋类作物最早被驯化栽培是华南原始农业的重要特征。这表明中国芋的栽培起源是无需向东南亚地区寻找故乡的。

张德纯（中国农业科学院蔬菜花卉研究所，北京 100081）