

燕麦生物碱研究进展

谢佳颖[#], 韩滢仪[#], 任虹^{*}

(北京工商大学食品学院, 北京市食品风味化学重点实验室, 食品添加剂与配料北京高校工程研究中心,
食品质量与安全北京实验室, 北京 100048)

摘要: 燕麦是全球的主要谷物之一, 燕麦生物碱是燕麦中的主要功能成分。目前已发现 20 余种, 其中主要为生物碱 A、B、C。燕麦生物碱具有抗氧化、降血脂、消炎止痒和抑制细胞增殖等多种生理活性, 燕麦生物碱的开发利用日益成为国内外学者的研究热点, 但目前对燕麦生物碱的研究还不够系统和规范, 对其种类、生理活性的探索还有待进一步发展。本文从燕麦生物碱的组成成分、提取方法、检测方法及生理活性等方面进行综述, 主要介绍溶剂提取法、超临界 CO₂ 流体萃取法和层析法等提取方法, 高效液相色谱法和高效液相色谱-质谱联用法等检测方法, 旨在为燕麦生物碱产品的深加工及开发利用提供科学依据。

关键词: 燕麦生物碱; 提取方法; 检测方法; 生理活性

Research progress of avenanthramides

XIE Jia-Ying[#], HAN Ying-Yi[#], REN Hong^{*}

(Beijing Technology & Business University, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients, Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: The oat is one of the world's major cereals, and oat alkaloids (avenanthramides) are the main functional components of oats. More than 20 species have been discovered at present, which are mainly alkaloids A, B, and C. Avenanthramides have a variety of physiological activities, such as antioxidant, hypolipidemic, anti-inflammatory and antipruritic function, inhibition of cell proliferation, so that the development and utilization of avenanthramides has increasingly become a hot research topic of domestic and foreign scholars, but the research on avenanthramides are not systematic and normative, the types and physiological activities of avenanthramides remain to be further developed. In this paper, the chemical compositions, extraction methods, detection methods and biological activities of avenanthramides were reviewed, mainly including extraction methods of solvent extraction method, supercritical CO₂ fluid extraction method and chromatography, and detection methods of high performance liquid chromatography and high performance liquid chromatography-mass spectrometry, which could provide scientific basis for the deep processing and development and utilization of alkaloids in oats.

KEY WORDS: avenanthramides; extraction method; detection method; biological activity

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2011AA060701)、北京市教委面上项目(SQKM201610011005)

Fund: Supported by the National High-Tech R&D Program (863 Program)(2011AA060701) and General Program of Beijing Municipal Education Commission (SQKM201610011005)

*通讯作者: 任虹, 副教授, 主要研究方向为天然产物化学。E-mail: renhong@th.btbu.edu.cn

*Corresponding author: REN Hong, Associate Professor, Beijing Technology & Business University, NO.11, Fucheng Road, Haidian District, Beijing 100048, China. E-mail: renhong@th.btbu.edu.cn

#为共同第一作者。

means co-first author.

1 引言

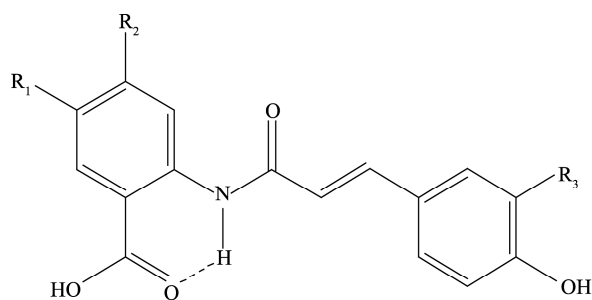
燕麦(*Avena sativa* L.), 又名雀麦、野麦, 属于禾谷类作物, 主要分布于北半球的温带地区, 最大的燕麦生产国是俄罗斯, 美国、加拿大和中国也是主要的生产国^[1]。中国栽培的燕麦以裸燕麦为主, 主要种植在内蒙古、山西、河北等省。据统计, 世界各国栽培的燕麦以皮燕麦为主^[1-3]。研究发现, 燕麦中富含蛋白质、脂肪和皂苷生物碱等多种功效成分^[2,4], 燕麦被营养学家称为是“全价营养食品”。现代药理研究表明^[3], 燕麦生物碱具有强抗氧化性、降脂性、抗增殖和止痒消炎等重要功效, 是现代健康生活所需的重要保健品原料来源和皮肤护理新型药物的有效成分。目前, 燕麦生物碱产品日益受到人们青睐, 其深加工技术也日趋成熟, 但燕麦生物碱的化学组成成分、提取和检测方法还不系统、不规范, 本文从燕麦生物碱的组成成分、提取方法、检测方法及生理活性等方面进行综述, 为燕麦生物碱产品的开发利用提供科学依据。

2 燕麦生物碱的组成

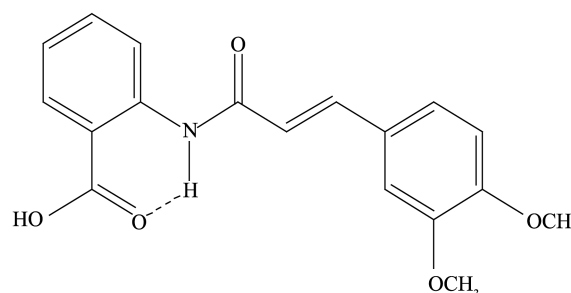
燕麦生物碱(avenanthramides)是具有环状结构的碱性

有机化合物, 是一类独特的含氮酚酸类衍生物, 也是唯一在燕麦中发现的一类含氮有机化合物^[5], 有显著的生物活性和光学活性。2003 年, 加拿大科学家 Collins 从燕麦中分离并鉴定出生物碱成分, 命名为 Avenanthramides。目前, 已从燕麦麸皮和籽粒中分离出不同形式的燕麦生物碱 20 多种^[3], 其中含量较高的有 3 种, 包括生物碱 A(N-4'-羟基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸)、生物碱 B(N-4'-羟基-3-甲氧基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸)和生物碱 C(N-3', 4'-二羟基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸), 分别占燕麦生物碱的 35%、21%和 44%^[6], 燕麦生物碱的母核结构与临床上应用的一种强效抗组胺及抗过敏药物曲尼司特(Tranilast)的结构非常相似(见图 1)^[7,8], 这为研究燕麦生物碱提供了新的思路。

燕麦生物碱虽具有明显生理活性, 但其在燕麦中含量较少, 主要分布于籽粒外层的麸皮和次级糊粉层。不同品种燕麦生物碱含量差异很大, 含量范围为 25.21~347.55 mg/kg, 其中对冠锈病高抗的品种含量相对较高^[9,10]。除了种质的决定因素, 地域性、年份、土质、栽培条件和施氮水平等对燕麦生物碱的含量都有所影响。



燕麦生物碱



曲尼司特

| 燕麦生物碱类型 | R ₁ | R ₂ | R ₃ |
|---------|----------------|----------------|------------------|
| A | OH | H | H |
| B | OH | H | OCH ₃ |
| C | OH | H | OH |
| D | H | H | H |
| E | H | H | OCH ₃ |
| F | H | H | OH |
| G | H | OH | H |
| H | H | OH | OCH ₃ |
| K | H | OH | OH |

图 1 燕麦生物碱的结构与分类

Fig. 1 Chemical structures and classification of oat alkaloid

3 燕麦生物碱的分离提取方法

目前用于燕麦生物碱提取的方法有溶剂提取法、超临界 CO₂ 流体萃取法、回流浸提法、微波辅助提取法、层析法、索氏提取法和膜提取法等。

3.1 溶剂提取法

溶剂分级提取法具有较高选择性。任祎等^[11]用乙醇作溶剂,分别对乙醇浓度、提取温度、提取时间、料液比和提取次数进行了单因素试验,又通过正交试验设计对麸皮中燕麦生物碱的提取条件进行了优化,提取物经大孔吸附树脂纯化。结果表明,最佳提取参数为:温度 60 °C,提取时间 2 h,溶剂为乙醇-水-冰醋酸体系,料液比 1:8(g/mL, *m*:*V*),此条件下得率为 5.29%,经大孔树脂纯化后粗提物中生物碱的纯度达 19.20%。而后将此燕麦生物碱提取物进行抗氧化与降血脂活性研究^[12]。运用乙醇提取法提取植物的生物碱较为普遍^[13],对于提取燕麦生物碱也同样适用。Jastrebova 等^[6]用乙醇溶液在 30 °C 下对燕麦粉依次进行 3 次萃取,然后再在 30 °C 真空环境下干燥,分离获得燕麦生物碱。Ishihara 等^[14]将燕麦粉末用 4 L 的甲醇提取 3 次,蒸发干燥后将残余物悬浮于 60% 甲醇水溶液中,再用正己烷溶液洗涤 3 次除去脂类,随后在用醋酸和甲醇水溶液(80:10:1, *V*:*V*:*V*)平衡的 ODS 柱中洗脱,将洗脱液干燥浓缩获得燕麦生物碱。

溶剂提取法对于化学结构独特、化学性质与一般生物碱不同且在酸中性条件下不稳定的生物碱尤为适用,能使燕麦生物碱的化学性质及生理活性保持稳定,但此法成本高,且存在防火等级高、提取时间长且能耗大等问题。

3.2 超临界 CO₂ 流体萃取法

CO₂ 超临界提取法无溶剂污染,能有效地提取植物原料中的生物碱成分,并且其优化设计出的最佳提取工艺参数符合实际要求,便于工业生产应用。曾王旻等^[9]以裸燕麦进行试验,先将燕麦进行预处理,然后通过单因素和正交实验确定了超临界 CO₂ 流体萃取燕麦麸皮中生物碱的最佳提取工艺参数,即:萃取时,压力 21.2 MPa,温度 40.4 °C,时间 1.46 h;分离时,压力 8 MPa,温度 40 °C,CO₂ 流量为 20~30 L/h,在上述条件下,实验燕麦生物碱的提取率为 655.80 μg/g。随后采用中心组合设计(central composite design, CCD)方法设计响应面实验,对数据进行回归分析表明,萃取压力是影响提取率的主要因素,其次是萃取温度,所有因素的交互项均为不显著作用。

CO₂ 超临界提取法利用压力和温度对超临界流体的影响来提取相应物质,其使用的 CO₂ 成本低、纯度高,便于在生产过程中循环使用,并且能有效防止燕麦生物碱活性物质的氧化和逸散,操作简便。由于其设备投资度大,未能普遍应用,并且在萃取时常需要加入夹带剂,影响溶

剂的溶解度和选择性。因此要在大量的实验数据基础上选择合适的夹带剂和用量。

3.3 层析法

近年来,大孔吸附树脂在天然产物的提取分离领域得到广泛应用。其吸附是范德华引力或产生氢键的结果,分子筛性则取决于其本身多孔性结构的性质,适合于提取和富集极性和弱极性物质。朱礼艳等^[15]将燕麦乙醇提取物经 AB-8 大孔树脂分离后,得到的有起泡性和皂苷显色反应的部分,再经微孔树脂凝胶(MCI GEL)柱、八烷基硅烷键合硅胶柱(octadecylsilyl, ODS)、ODS-AQ 反相柱分离,最终得到 1 种皂苷化合物 avenacoside A。任祎等^[11]在最佳溶剂提取工艺条件下提取燕麦生物碱,将所得的粗提液在树脂 AB-8 动态上样,待树脂吸附饱和后停止上样,6 倍柱床体积的 0.1% 醋酸洗脱水溶性杂质后,95% 乙醇洗脱充分解析,收集部分洗脱液,合并、浓缩,经高效液相色谱法测定,AB-8 对燕麦生物碱的吸附量为 58.48 mg/g,解析率为 31.96%。Li 等^[16]利用 H103 树脂填料,30% 乙醇和 25% 氨水的混合溶液(15:1, *V*:*V*)在 2.0 mL/min 流速下进行洗脱,最终生物碱得率为 78.19%。

大孔树脂提取燕麦生物碱时,溶剂用量少、稳定性好,且仪器简单,树脂经过洗脱、浸泡、冲洗等过程处理后再生可重复使用,但其在使用过程中易破损,重现性有待提高。

4 燕麦生物碱的检测方法

生物碱是燕麦中主要的化学和生物活性成分之一,目前关于生物碱含量分析的测定方法很多,主要包括比色法、酸碱滴定法、分光光度法、薄层色谱法、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)以及高效液相色谱-质谱联用法(high performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS)等。近年来,离子对萃取比色法、化学发光法也常用于药材中生物碱的含量检测。

4.1 高效液相色谱法

Bartt 等^[17]在对燕麦生物碱的抗氧化活性进行研究时,采用 HPLC 检测燕麦生物碱。通过与合成燕麦生物碱标准品比对,对燕麦生物碱进行分析鉴定。任贵兴等^[11]将燕麦生物碱提取液真空干燥后,溶解于甲醇即得供试品溶液。在 Prosphere C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×150.0 mm, 5 μm)上用水为流动相 A(含 10 mmol/L 甲酸)、乙腈为流动相 B 进行梯度洗脱,检测波长 340 nm,样品进样量为 25 μL。检测得样品色谱图同标准品图谱对比,检测到燕麦生物碱 A、B、C。Koenig^[18]等在 12 h 内特定时间点通过 HPLC 测定被灌燕麦生物碱大鼠的血浆、肝脏、心脏和腓肠肌中的燕麦生物碱,以研究燕麦生物碱的生物利用度。Ren 等^[19]利用 HPLC 来鉴定燕麦麸皮中的生物碱对 D-半乳糖诱导的氧化应激小

鼠的活性和抗氧化酶基因表达的影响。

4.2 高效液相色谱-质谱联用法

Jastrebova 等^[6]以乙腈-水-甲酸为流动相对 C_{18} 柱进行梯度洗脱分离得燕麦生物碱, 选择正离子模式的电喷雾质谱, 依据燕麦生物碱中 A、B、C 的质荷比分别为 316、300 和 330, 通过选择性离子检测(selected ion monitor, SIM)检测质子化分子离子来量化燕麦生物碱。任祎等^[3]也曾参照 Jastrebova 的方法, 利用合成的 3 种生物碱 A、B、C 的标准品, 运用 HPLC 法测定生物碱含量。Francisco 等^[20]运用高效液相色谱-电喷雾质谱联用技术(high performance liquid chromatography-electrospray ionization-mass spectrometry, HPLC-ESI-MS)快速地鉴定出燕麦中的生物碱。实验发现在 HPLC-MS 实验中, 燕麦生物碱类化合物主要出现 $[M-H]^-$ 、 $[2M-H]^-$ 、 $[3M-H]^-$ 和 $[4M-H]^-$ 等离子峰, 且丰度较大。通过 HPLC-ESI-MS 负离子谱获得的化合物的相对分子质量和化合物的紫外-可见吸收光谱确定 1~4 号化合物分别为 avenanthramide A、avenanthramide B、avenaluminic acid 和 3'-methoxyavenaluminic acid 4 种生物碱类化合物。Izumi 等^[21]利用激光微取样和 HPLC-MS 来检测单个叶肉细胞中的燕麦生物碱的含量。

5 燕麦生物碱的生理活性

经研究发现燕麦生物碱提取物具有强抗氧化性、降血脂、抑制细胞增殖和消炎止痒的生理功效^[22-24]。

5.1 抗氧化活性

燕麦生物碱是燕麦抗氧化活性的物质基础^[25]。通过 DPPH 自由基清除实验和亚油酸氧化系统氧气消耗实验, 发现燕麦生物碱的抗氧化能力高于咖啡酸和阿魏酸, 其中燕麦生物碱 A 的活性最高, 其次为 B 和 C^[3]。动物整体水平抗氧化实验表明^[12], 燕麦生物碱可增强小鼠超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化酶的活性, 减少活性氧(reactive oxygen species, ROS)对细胞的氧化损伤, 能有效预防或缓解慢性疾病。Peterson 等^[26]通过 DPPH 法和 β -胡萝卜素法比较燕麦生物碱、水溶性维生素 E(trolox)、合成抗氧化剂 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)的抗氧化活性, 发现 3 种燕麦生物碱都具有较强的抗氧化性。Hassanein 等^[27]则通过比较百里醌(thymoquinone, TQ)和燕麦生物碱(AVA)对受二氧化钛毒性和氧化应激作用的大鼠的影响, 发现燕麦生物碱和百里醌对二氧化钛的有害性具有抗氧化作用。Yang 等^[28]采用氧化自由基吸收能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC), 羟自由基吸收能力(hydroxyl radical absorbance capacity, HORAC), 超氧自由基吸收能力(superoxide radical absorbance capacity, SORAC), 单线态氧的吸收容量(singlet oxygen absorbance capacity, SOAC), 和过氧自由基吸收能力(peroxynitrite radical absorbance

capacity, NORAC)分析方法分别检测燕麦生物碱 A、B、C 对过氧自由基、羟基自由基、超氧阴离子、纯态氧和过氧亚硝基阴离子的抗氧化能力, 实验表明, 由于燕麦生物碱具有结构变化能力, 所以具有氧化性, 也因此成为重要的天然抗氧化剂^[29-31]。

5.2 降血脂活性

脂蛋白脂酶(lipoprotein lipase, LPL)是一种调节脂蛋白代谢的关键酶, 能降解血浆脂蛋白中甘油三酯, 当脂蛋白脂酶活性降低时, 甘油三酯增加, 导致动脉硬化。Peterson 等^[26]的研究发现, 小鼠进食了燕麦麸皮生物碱提取物后, 小鼠血脂水平和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量减少, 而血清抗氧化酶活性显著增强, 胰蛋白酶信使 RNA 的表达也显著增强。任祎等^[12]观测燕麦生物碱提取物对肝脏脂蛋白脂酶 mRNA 表达的影响, 发现衰老模型小鼠与正常组比较 LPL mRNA 的表达量减少, 差异不显著; 与衰老模型组比较, 高、中、低剂量组生物碱提取物均可上调 LPL mRNA 的表达, 差异均显著($P < 0.05$), 表明燕麦麸皮生物碱提取物可提高小鼠肝脏脂蛋白脂酶 mRNA 的表达, 从而达到预防动脉粥样硬化的效果^[32,33]。

5.3 抑制细胞增殖活性

Nie 等^[34,35]的研究表明, 燕麦生物碱可以抑制血管平滑肌细胞(vascular smooth muscle cells, VSMCs)的增殖, 防止引发动脉粥样硬化和血管成形术后的再狭窄, 这同药物曲尼司特(Tranilast)相似, 具有抗血管平滑肌细胞增殖的作用, 在临床上可用于防止经皮冠状动脉腔内成形术后的再狭窄。美国 Turfs 大学的专家从营养和衰老角度研究发现^[36], 燕麦生物碱提取物及合成的燕麦生物碱 A 及 A 甲酯都能抑制结肠癌、乳腺癌和前列腺癌细胞的生长, 并且对结肠癌增殖细胞的抑制作用最显著。实验中利用燕麦生物碱对人克隆结肠腺癌(Caco-2)细胞进行 48 h 的治疗后发现 3 种燕麦生物碱都能有效抑制细胞在生长期的增殖, 其中, 40 $\mu\text{mol/L}$ 合成燕麦生物碱 C($\text{CH}_3\text{-Avn-C}$)的细胞增殖抑制率为 50%, 160 $\mu\text{mol/L}$ 燕麦生物碱 C 和燕麦生物碱提取物对 Caco-2 细胞增殖的抑制率都是 60%。此外, 发现燕麦生物碱提取物对人类结肠癌细胞系 HCT116、LS174、和 HT-29 都有生长抑制作用。Wang 等^[37]的实验表明, 燕麦生物碱 C 及其主要代谢产物 M6(dihydroavenanthramide-C)是人结肠癌细胞的生物活性化合物, 可诱导细胞凋亡。塔夫斯大学人类营养研究中心的研究人员也提出^[38], 燕麦生物碱能抑制环氧化酶活性和脂多糖刺激后的小鼠腹膜巨噬细胞产生前列腺素 E, 从而能抑制结肠癌细胞的增殖。

5.4 消炎止痒功能

Sur 等^[39]的一系列研究结果表明, 燕麦生物碱提取物可抑制内皮细胞炎性细胞因子的表达, 其作用机制是通过抑制 I κ B 激酶(inhibitor of nuclear factor kappa-B kinase,

IKK)和抑制蛋白(inhibitor of κ B, I κ B)的磷酸化以及降低内皮细胞 I κ B 活性而实现的。还证实低浓度燕麦生物碱(1~3 mg/L)可抑制角质形成细胞中核因子 NF- κ B(nuclear factor kappa B)的活化,降低炎症细胞因子白细胞介素-8(interleukin-8, IL-8)的释放量^[40-43]。并且,对小鼠局部施用(1~3) $\times 10^3$ mg/mL 燕麦生物碱提取物,可缓解其接触性过敏皮炎、神经性皮炎的临床症状。Kang 等^[44]的研究发现,在小鼠成肌细胞系(C2C12 细胞)的骨骼细胞中,燕麦生物碱可以通过 NF- κ B 通路实现对 C2C12 细胞的抗炎作用。研究发现^[45],燕麦生物碱是通过抑制组胺信号转导来达到抗炎和止痒的作用。胶体燕麦用于特应性皮炎、牛皮癣、药物性皮炎等皮肤疾病的治疗已有很长的历史^[46,47],目前已开发了一种燕麦生物碱衍生物的药物即二羟基-燕麦生物碱(dihydroxy-avenanthramides, DHA_{vn}),被用于治疗与组胺有关的皮肤病如瘙痒、红斑、水疱、晒伤、湿疹等^[48-50]。

6 展望

近年来,我国的燕麦产业迅速发展,尤其在食品、化妆品行业,燕麦被广泛利用。虽然目前我国的燕麦研究与生产加工发展较快,但与先进国家相比,还存在较大的差距。我国对燕麦活性成分的研究刚刚起步,涉及到活性单体研究的很少,尤其对燕麦中的生物碱、黄酮及皂苷等功效成分的分离纯化,仅止步于总生物碱、总黄酮、总皂苷的提取方法与性质研究。此外,关于燕麦生物碱分离纯化技术的基础性理论研究还很薄弱,如生物碱的溶解度、相平衡、生物利用度、作用机制等都有待进一步深入研究。另外,目前几乎没有对燕麦生物碱结构鉴定及构效关系方面的报道。

随着燕麦生物碱功能因子和保健作用的逐步明确,作为保健食品、化妆品、药品的功能因子添加剂将是今后燕麦生物碱营养保健价值开发的主要方向,具有广泛应用,开发潜力巨大,其深加工技术将日益产业化。

参考文献

- [1] 刘影. 燕麦的营养成分与保健作用[J]. 中国食物与营养, 2009, (3): 55-57.
Liu Y. Nutrition and function in health protection of oats [J]. Food Nutr China, 2009, (3): 55-57.
- [2] 任顺成, 马瑞萍. 燕麦的增效因子及其保健功能[J]. 粮食科技与经济, 2013, 38(3): 59-60.
Ren SC, Ma RP. Efficacy factor and health care function of oat [J]. Grain Sci Technol Econ, 2013, 38(3): 59-60.
- [3] 任祎, 马挺军, 崔林. 燕麦生物碱及其潜在的保健作用[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(1): 124-128.
Ren Y, Ma TJ, Cui L. Avenanthramides and their potential health benefits in oats [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2012, 27(1): 124-128.
- [4] Liu H, Zhou HT, Ren GX. Using fourier transform near infrared spectroscopy to estimate the nutritional value in whole and milled naked oats [J]. J Near Infrared Spec, 2014, 22(2): 93-102.
- [5] Fagerlund A, Sunnerheim K, Dimberg LH. Radical-scavenging and antioxidant activity of avenanthramides [J]. Food Chem, 2009, 113(2): 550-556.
- [6] Jastrebova J, Skoglund M, Nilsson J, et al. Selective and sensitive LC-MS determination of avenanthramides in oats [J]. Chromatogr, 2006, 63(9-10): 419-423.
- [7] Anonymous. Agriculture and food Science, Study data from University of Ulster update knowledge of agriculture and food science [J]. Agric Bus Week, 2009.
- [8] Lee-Manion AM, Price RK, Strain JJ, et al. In vitro antioxidant activity and antigenotoxic effects of avenanthramides and related compounds [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(22): 10619-10624.
- [9] 曾王旻, 李巨秀. 燕麦抗氧化活性物质提取及抗氧化活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Zeng WM, Li JX. Study on extraction and antioxidant activity of antioxidant active substances from oat [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [10] 任祎, 平华, 任贵兴. 裸燕麦核心种质的抗氧化特性[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 988-994.
Ren Y, Ping H, Ren GX. Antioxidant property of naked oat core collections [J]. Acta Agron Sin, 2010, 36(6): 988-994.
- [11] 任祎, 任贵兴, 马挺军, 等. 燕麦生物碱的提取及其抗氧化活性研究[J]. 农业工程报, 2008, 24(5): 265-269.
Ren Y, Ren GX, Ma TJ, et al. Extraction and antioxidant activity of avenanthramides from oat bran [J]. Trans CSAE, 2008, 24(5): 265-269.
- [12] 任祎, 马挺军, 牛西午, 等. 燕麦生物碱提取物的抗氧化与降血脂作用研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(6): 103-106.
Ren Y, Ma TJ, Niu XW. Hypolipidemic and antioxidation effects of oat bran avenanthramides extract [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2008, 23(6): 103-106.
- [13] Zhang Y, Bolige A, Bai X, et al. Study on extraction conditions and content determination in total alkaloids in aquilegia viridiflora [J]. J North Pharm, 2014, 6(1): 1-6.
- [14] Ishihara A, Kojima K, Fujita T, et al. New series of avenanthramides in oat seed [J]. Biosci Biotech Biochem, 2014, 78(12): 1-9.
- [15] 朱礼艳, 徐德平. 燕麦中活性成分的提取、分离与结构鉴定[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
Zhu LY, Xu DP. Extraction, isolation and structure determination of active components from oats [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [16] Li X, Du AL, Du AQ, et al. Isolation of oxymatrine from alkaloids of sophora flavescens ait. by h103 macroporous resin [J]. Adv Mater, 2013, 634-638(1): 403-407.
- [17] Bratt K, Sunnerheim K, Bryngelsson S, et al. Avenanthramides in oats (*Avena sativa* L.) and structure-antioxidant activity relationships [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51: 594-600.
- [18] Koenig RT, Dickman JR, Wise ML, et al. Avenanthramides are bioavailable and accumulate in hepatic, cardiac, and skeletal muscle tissue following oral gavage in rats [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(12): 6438-6443.
- [19] Ren Y, Yang X, Niu X, et al. Chemical characterization of the avenanthramide-rich extract from oat and its effect on D-galactose-induced oxidative stress in mice [J]. J Agric Food Chem, 2011,

- 59(1): 206–211.
- [20] Francisco García Sánchez, Aurora Navas Díaz, Ignacio Medina Lama, *et al.* HPLC Enantioseparation of the alkaloid canadine and determination of enantiomeric purity with chiral/photometric and achiral/polarimetric detection [J]. *J Liq Chromatogr Related Technol*, 2014, 37(1): 26–38.
- [21] Izumi Y, Kajiyama S, Nakamura R, *et al.* High-resolution spatial and temporal analysis of phytoalexin production in oats [J]. *Planta*, 2009, 229(4): 931–943.
- [22] Singh R, De S, Belkheir A. *Avena sativa* (Oat), a potential nutraceutical and therapeutic agent: an overview[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2013, 53(2): 126–144.
- [23] Meydani M. Potential health benefits of avenanthramides of oats [J]. *Nutr Rev*, 2009, 67(12): 731–5.
- [24] Boz H. Phenolic amides (avenanthramides) in oats - a review [J]. *Czech J Food Sci*, 2015, 33(5): 399–404.
- [25] Skoglund M, Peterson DM, Andersson R, *et al.* Avenanthramide content and related enzyme activities in oats as affected by steeping and germination [J]. *J Cereal Sci*, 2008, 48(2): 294–303.
- [26] Peterson DM, Hahn MJ, Emmons CL. Oat avenanthramides exhibit antioxidant activities in vitro [J]. *Food Chem*, 2002, 79(4): 473–478.
- [27] Hassanein KMA, El-amir YO. Protective effects of thymoquinone and avenanthramides on titanium dioxide nanoparticles induced toxicity in Sprague-Dawley rats [J]. *Pathol Res Pract*, 2016, 48(2).
- [28] Yang J, Ou B, Wise ML, *et al.* In vitro total antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of three common oat-derived avenanthramides [J]. *Food Chem*, 2014, 160(11): 338–345.
- [29] Pike PR, Abdel-Aal ESM, Mcelroy AR. Antioxidant activity of oat malt extracts in accelerated corn oil oxidation [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2007, 84(7): 663–667.
- [30] Ortiz-Robledo F, Villanueva-Fierro I, Oomah BD, *et al.* Avenanthramides and nutritional components of four Mexican oat (*Avena sativa* L.) varieties [J]. *Agrociencia*, 2013, 47(3): 225–232.
- [31] Chen CY, Milbury PE, Collins FW, *et al.* Avenanthramides are bioavailable and have antioxidant activity in humans after acute consumption of an enriched mixture from oats [J]. *J Nutr*, 2007, 137(6): 1375–1382.
- [32] Wise ML. Effect of chemical systemic acquired resistance elicitors on avenanthramide biosynthesis in oat (*Avena sativa*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(13): 7028–7038.
- [33] Rosaliemarion B. Oats: cooling inflammation and unhealthy cell proliferation [J]. *Agric Res*, 2010, 58(2).
- [34] Nie L, Wise M, Peterson DM, *et al.* Avenanthramide, a polyphenol from oats, inhibits vascular smooth muscle cell proliferation and enhances nitric oxide production [J]. *Atherosclerosis*, 2006, 186(2): 260–266.
- [35] Nie L, Wise M, Peterson D, *et al.* Mechanism by which avenanthramide-c, a polyphenol of oats, blocks cell cycle progression in vascular smooth muscle cells [J]. *Free Radical Bio Med*, 2006, 41(5): 702–708.
- [36] Guo WM, Nie L, Wu DY, *et al.* Avenanthramides inhibit proliferation of human colon cancer cell lines in vitro [J]. *Nutr Cancer*, 2010, 62(8): 1007–1016.
- [37] Wang P, Chen H, Zhu Y, *et al.* Oat avenanthramide-C (2c) is biotransformed by mice and the human microbiota into bioactive metabolites 1–3 [J]. *J Nutr*, 2015, 145(2): 239–45.
- [38] Anonymous. Colon Cancer: Studies from Tufts University, human nutrition research center on aging yield new data on colon cancer [Z]. *Sci Lett*, 2011.
- [39] Sur R, Nigam A, GROTE D, *et al.* Avenanthramides, polyphenols from oats, exhibit anti-inflammatory and anti-itch activity [J]. *Arch Dermatol Res*, 2008, 300: 569–574.
- [40] Guo W, Kong E, Meydani M. Dietary polyphenols, inflammation, and cancer [J]. *Nutr Cancer*, 2009, 61(6): 807–810.
- [41] Anonymous. Life Sciences, New life sciences research from Johnson & Johnson described [Z]. *Biotech Bus Week*, 2009.
- [42] Chu YF, Wise ML, Gulvady AA, *et al.* In vitro antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of seven common oats [J]. *Food Chem*, 2013, 139(1–4): 426–431.
- [43] Guo W, Wise ML, Collins FW, *et al.* Avenanthramides, polyphenols from oats, inhibit IL-1beta-induced NF-kappaB activation in endothelial cells [J]. *Free Radical Bio Med*, 2008, 44(3): 415–429.
- [44] Kang CH, Shin WS, Yeo D, *et al.* Anti-inflammatory effect of avenanthramides via nf-kb pathways in c2c12 skeletal muscle cells.: 2076 Board #228 June 2, 2: 00 PM - 3: 30 PM [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2016, 48(5): 583.
- [45] Cerio R, Jeanine DS, Mahe E. Mechanism of action and clinical benefits of colloidal oatmeal for dermatologic practice [J]. *J Digest Dis*, 2010, 9(9): 1116–1120.
- [46] Eichenfield LF, Jr FJ, Rigel DS, *et al.* Natural advances in eczema care [J]. *Cutis*, 2007, 80(6Suppl): 2–16.
- [47] Soap, Perfumery and Cosmetics Group. Colloidal oat flour protects damaged skin [J]. *SPC*, 2010, 83(11).
- [48] Heuschkel S, Wohlrab J, Schmaus G, *et al.* Modulation of dihydroavenanthramide release and skin penetration by 1,2-alkanediols [J]. *Eur J Pharm Biopharm*, 2008, 70(1): 239–247.
- [49] Cosmetics & Toiletries Group. Anti-irritant oat extract [J]. *C&T*, 2010, 125(8): 59.
- [50] Jr FJ. Colloidal oatmeal formulations and the treatment of atopic dermatitis [J]. *JDD*, 2014, 13(10): 1184–1185.

(责任编辑: 刘 丹)

作者简介



谢佳颖, 主要研究方向为天然产物化学。

E-mail: xiejy0716@163.com



韩滢仪, 硕士, 助理实验师, 主要研究方向为分子细胞生物学

E-mail: hanyi@btbu.edu.cn



任虹, 博士, 副教授, 主要研究方向为天然产物化学。

E-mail: renhong@th.btbu.edu.cn