

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.00988

裸燕麦核心种质的抗氧化特性

任 祎^{1,2} 平 华³ 任贵兴^{2,*}

¹ 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801; ² 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; ³ 北京农产品质量检测与农田环境监测技术研究中心, 北京 100097

摘 要: 为了解裸燕麦种质资源的抗氧化特性及其抗氧化作用的物质基础, 选用和检测了 120 份国内外裸燕麦种质。其 DPPH 清除能力及总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量的变幅分别为 4.34~179.98 mg L⁻¹、250.99~807.88 mg kg⁻¹、25.21~347.55 mg kg⁻¹ 和 0.59%~9.69%, 表现出明显的基因型差异, 不同来源地和不同种质类型裸燕麦的抗氧化能力和生物碱含量差异较大。采用 K-mean cluster 快速聚类法将其聚为 6 大类群, 分别由 20、39、2、22、12 和 25 份种质组成。燕麦籽粒抗氧化能力与其总酚、生物碱含量呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 但与 β -葡聚糖含量无显著相关性。表明裸燕麦抗氧化能力与其籽粒中所含的总酚和生物碱类物质密切相关。本研究还筛选出一批高抗氧化的燕麦种质资源, 有望用于高抗氧化性燕麦品种的培育。

关键词: 裸燕麦; 生物碱; 总酚; β -葡聚糖; 抗氧化作用

Antioxidant Property of Naked Oat Core Collections

REN Yi^{1,2}, PING Hua³, and REN Gui-Xing^{2,*}

¹ Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³ Beijing Research Center for Agrifood Testing and Farmland Monitoring, Beijing 100097, China

Abstract: Naked oat (*Avena nuda* L.) originated in China, has a high values in nutrition and medicine. Besides dietary fiber and nutrients, various natural antioxidants, such as phenolic compounds, phenolic acids, avenanthramides (unique to oats) and phytochemicals are also contained in naked oat. All these compounds possess potential health-promoting properties, partly attributing to their antioxidant activity. Up to now, China has built the core of naked oat germplasm with the greatest diversity of naked oat types. The objective of this study was to determine the total phenol (TP), total avenanthramides (TAV), β -glucan contents and the antioxidant activity of oat cultivars from main productive areas of China as well as Former Soviet Union and North America. The correlation of antioxidant activities with contents of these components was also statistically investigated, which is benefit for oat breeding. The antioxidant activities, contents of TP, TAV, and β -glucan of 120 naked oat accessions were evaluated by Folin-Ciocalteu method, HPLC analysis and enzymatic method, respectively. Meanwhile, the antioxidant capacity was determined by 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH) scavenging ability method. Significantly genotypic variations were observed, and contents of TP, TAV, and β -glucan were 4.34–179.98 mg L⁻¹, 250.99–807.88 mg kg⁻¹, 25.21–347.55 mg kg⁻¹, and 0.59–9.69% respectively. The 120 accessions were clustered into six groups using K-mean cluster method, which consisted of 20, 39, 2, 22, 12, and 25 accessions respectively. There were significantly positive correlations between antioxidant activity and the contents of TP and TAV. However, the correlation between β -glucan and DPPH was not significant. These results indicated that avenanthramides contributed greatly to the antioxidant property in naked oat grains. A relative wide variations in TAV and TP contents and compositions were mainly due to differences among cultivars. Duji from Sichuan province and Yumai 38 from Qinghai province with high contents of TP and TAV are expected to be used in further quality breeding of naked oat.

Keywords: Oat; Avenanthramides; Total phenolic; Beta-glucan; Antioxidant activity

燕麦是蛋白、维他命和矿物元素的重要来源, 并被美国 FDA 认定为功能性食品。我国燕麦种质资

源丰富, 近几年, 共计编入目录资源 2 978 份, 其中裸燕麦(*Avena nuda* L.) 1 699 份(国内 1 663 份, 国外

本研究由国家公益性研究专项基金(2005DIA4J019)和山西农业大学科研启动基金(XB2009001)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 任贵兴, E-mail: renguixing@caas.net.cn, Tel: 010-62115596

第一作者联系方式: E-mail: yren7@wisc.edu

Received(收稿日期): 2009-11-30; Accepted(接受日期): 2010-02-08.

36份)^[1]。中国是裸燕麦的起源中心^[2],栽培的裸燕麦与国外的皮燕麦相比,具有裸粒、大粒、优质等特点^[3]。我国对燕麦的研究主要集中在农艺性状和主要营养成分 β -葡聚糖、膳食纤维^[4]以及降血脂、降血压等功能上^[5-6],而在抗氧化活性及其物质基础方面较少^[7-8]。

近年来,随着研究方法不断发展和先进设备的应用,国外学者对燕麦抗氧化成分组成进行了一系列的研究。早期, Peter 和 Musher^[9]将具有高抗氧化性的燕麦粉作为食品配料添加到油脂、人造奶油和花生酱中以延长这些高脂肪食品的货架寿命,或作为包装材料来提高和保持食品质量。随后的研究发现,燕麦中富含大量抗氧化活性成分,主要是酚类物质,如以游离态或结合态存在的阿魏酸、咖啡酸、香豆酸和香草醛,还有黄酮类化合物如槲皮素、邻氨基苯甲酸和燕麦生物碱(avenanthramide)等^[10]。燕麦生物碱是一种酚酸类衍生物,在麸皮中含量最高^[11],因其具有较强的抗氧化^[12-13]、抗动脉硬化^[14]和抗炎止痒^[15]作用,近年来受到广泛关注。本研究在收集国内外燕麦种质资源的基础上,选择具有代表性的种质120份,测定其抗氧化能力和总酚、生物碱、 β -葡聚糖含量,分析它们之间的相关关系,比较不同种质籽粒中抗氧化物质的组成和体外抗氧化能力的差异,以期了解其抗氧化作用的物质基础,为燕麦高抗氧化品质育种和开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料及其种植

从中国燕麦核心种质中选取具有代表性的120份裸燕麦材料(由国家种质库提供),2006—2007年在中国农业科学院作物科学研究所田间种植。其中,国内资源108份,包括山西38份、内蒙古25份、河北11份、黑龙江4份、青海6份、陕西6份、四川4份、甘肃4份、云南5份、贵州4份、吉林1份;国外资源12份,包括加拿大5份、前苏联5份、美国2份。国内材料中81份为地方品种,27份为选育品种。为便于分析,将120份裸燕麦按地理来源分组,并对材料数少的进行合并,如吉林的1份与黑龙江的4份合并为东北组群,甘肃和青海种质材料合并为甘肃+青海组群,贵州、云南和四川共13份合并为西南组群,加拿大和美国材料合并为北美组群。每份材料种一个小区,每小区3行,每行10株,3月20日播种,常规田间管理,成熟期

按小区收获。

1.2 试剂

Folin-Ciocalteu 试剂、1,1-二苯基-2-苦基苯肼(DPPH)、没食子酸(gallic acid, GA)标准品、抗坏血酸标准品(ascorbic acid)购于 Sigma-Aldrich 公司(中国北京); β -葡聚糖试剂盒购于易扩公司(中国上海);液相用色谱纯甲醇、乙腈购于 Baker 公司(中国北京);实验用水为蒸馏水,其他试剂均为分析纯,由北京化学试剂公司生产。

1.3 样品的前处理

将各种质的燕麦籽粒磨碎后,过40目筛。准确称取燕麦粉1.0 g,加入80%酸化乙醇20 mL,在45℃水浴抽提2 h,过滤,再重复提取2次,合并滤液,1 250×g离心,70℃水浴蒸干,加甲醇溶解残渣,并定容至10 mL,离心,取上清液待用。

1.4 体外抗氧化作用测定方法

清除 DPPH 有机自由基是一种快速、简便、灵敏的评估抗氧化能力的方法^[16-17]。DPPH 甲醇溶液在517 nm处有较强的吸光值,被抗氧化物还原后吸光值会降低,吸光值愈低,表示抗氧化物的供氢能力愈强,也就是样品清除 DPPH 自由基的能力愈强。参考 Yu 等^[18]的方法进行3次取样及测定。DPPH 清除能力用抗坏血酸(ascorbic acid)来定量,以抗坏血酸标准品作标准曲线,得到回归方程 $Y=8.864X+49.18$ ($R^2=0.992$)。

1.5 抗氧化物质的测定方法

1.5.1 生物碱 参照本课题组以前建立的方法^[19],分别配制3种主要生物碱 Bc、Bp 和 Bf 的标准品溶液,在同一高效液相色谱条件下进样,制作标准曲线,取待测液过0.45 μm 微孔滤膜,测定样品中的 Bc、Bp 和 Bf 含量,燕麦总生物碱含量为三者之和,取样及测定均重复3次。

1.5.2 总多酚 准确称取燕麦粉1.0 g,加80%乙醇15 mL,37℃水浴振荡提取30 min,在1 250×g下离心,重复提取2次,合并上清液,70℃水浴蒸干,加10 mL 甲醇超声溶解,待测。配制0.5 mol L⁻¹ Folin-Ciocalteu,准确移取1 mL 样品甲醇提取液,加 Folin-Ciocalteu 显色剂1 mL 及1 mol L⁻¹ Na₂CO₃ 溶液3 mL,混合均匀,室温静置15 min,将反应液用去离子水定容到10 mL,1 250×g离心5 min,去除沉淀,725 nm处测定上清液吸光度值,用甲醇作空白对照,以没食子酸为标准品制作标准曲线,得到回归方程 $Y=0.0174X-0.005$ ($R^2=0.9921$),通过 GA

值来确定总多酚含量^[20-22]。

1.5.3 β -葡聚糖 参考 Peterson 等的方法^[23], 称取 80~100 mg 样品, 加 50%乙醇溶液 0.2 mL, 混合 10~30 s。再加 4 mL 磷酸钠, 沸水浴放置 1 min, 搅拌溶液后沸水浴再放置 2 min 至完全混匀。溶液在 50℃ 孵育 5 min, 加 0.2 mL 地衣多糖酶溶液, 混合, 50℃ 孵育 1 h (其间搅拌混合溶液 3~4 次, 每次 10 min)。再加 200 mmol L⁻¹ 醋酸钠缓冲液 5 mL, 混合溶液在室温下冷却 5~10 min, 1 250×g 离心 10 min。将 0.1 mL 反应液转移到 3 支新试管中, 其中一支加入 50 mmol L⁻¹ 醋酸钠溶液 0.1 mL, 另两支分别加入 0.1 mL β -葡萄糖苷酶溶液, 50℃ 水浴反应 10 min, 3 支试管同时加入 3 mL 葡萄糖氧化酶-过氧化酶混合缓冲液, 50℃ 水浴继续反应 20 min, 取出反应液, 立即在 510 nm 处测吸光度数值, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值。

1.6 统计分析

燕麦总酚、总生物碱、 β -葡聚糖含量和 DPPH 清除能力以(最大值-最小值)/N 为分布间距在种质间分布, 作直方图, 并计算各分布间距中种质数占总样本数的百分率。采用平均数的 *t* 测验分析各组分含量以及抗氧化能力的差异显著性。120 个供试种质以总酚、总生物碱、 β -葡聚糖含量和 DPPH 清除能力为变量, 采用快速聚类分析, 应用 STANDARD 过程把变量标准化后, 用 K-mean cluster 法聚类。采用相关系数法分析各组分含量与 DPPH 清除能力之间的相关性, 多元相关采用多重回归法。使用 SPSS11.5 软件包建立数据库, 并进行统计分析数据^[24]。

2 结果与分析

2.1 燕麦种质资源抗氧化能力及其抗氧化物质含量差异

120 份材料间各指标的变幅和变异系数均较大(表 1), 表明燕麦种质资源的抗氧化能力及其总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量存在明显的基因型差异。燕麦种质的总酚含量呈现正态分布, 在 418~586 mg kg⁻¹ 之间的种质数占总种质数的 66.7% (图 1-A)。总生物碱含量呈现类似偏态的单峰分布, 其中 Bc 含量在 5.2~23.4 mg kg⁻¹ 范围内最多, 占总种质数的 65.0%; Bp 含量在 11.8~103.9 mg kg⁻¹ 范围内最多, 占总种质数的 75.0%; Bf 含量在 4.00~10.00 mg kg⁻¹ 范围内最多, 占总种质数的 82.5%; 83.3% 的种质材料的总生物碱含量集中在 25.2~122.1 mg kg⁻¹ 之间(图 1-B)。 β -葡聚糖含量呈正态分布, 92.5% 的种质集中在 4.5%~7.5% 之间(图 1-C)。DPPH 清除能力也呈现正态分布, 58.3~112.6 mg L⁻¹ 之间的种质数占总数的 75.9% (图 1-D)。

2.2 不同来源地和不同种质类型燕麦的抗氧化作用及其总酚和生物碱含量

不同来源地裸燕麦的抗氧化能力、总酚和生物碱含量的变幅和变异系数较大(表 2)。就总生物碱而言, 中国甘肃和青海组群变异最大, 其次是中国内蒙和山西组群, 变异最小的是中国东北组群。对于总酚含量, 北美和前苏联组群变异最大, 中国甘肃和青海组群次之, 变异最小的是中国东北组群。对于抗氧化能力, 中国陕西组群变异最大, 其次是国外引进种质的两个组群, 再次是中国山西组群, 中

表 1 不同燕麦种质抗氧化成分含量和抗氧化活性的变幅和变异系数
Table 1 Variations of antioxidant activities and components in 120 naked oat accessions

成分 Component	变幅 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	变异系数 CV
总酚 TP (mg kg ⁻¹)	260.00–807.9	517.5±118.0	0.23
生物碱 C Bc (mg kg ⁻¹)	4.99–66.5	22.4±13.4	0.60
生物碱 A Bp (mg kg ⁻¹)	11.80–318.4	76.4±51.2	0.67
生物碱 B Bf (mg kg ⁻¹)	0.04–19.3	3.7±3.6	0.95
总生物碱 TAV (mg kg ⁻¹)	25.20–347.5	103.3±70.0	0.59
β -葡聚糖含量 β -glucan content (%)	0.60–9.7	6.2±1.3	0.21
DPPH 清除能力 DPPH scavenging ability (mg L ⁻¹)	4.30–180.0	85.6±34.0	0.40

TP: total phenols; Bc: avenanthramide C; Bp: avenanthramide A; Bf: avenanthramide B; TAV: total avenanthramides; DPPH: 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical.

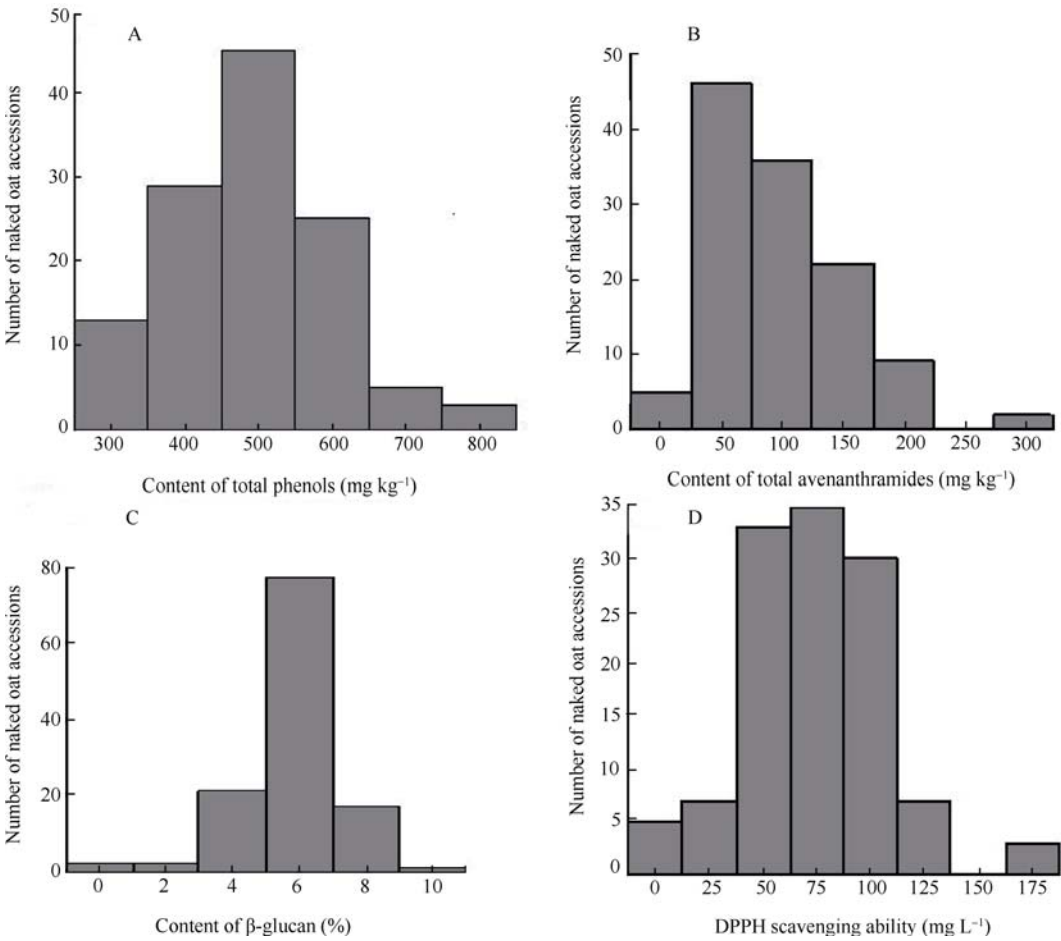


图 1 燕麦籽粒中总酚(A)、总生物碱(B)、β-葡聚糖(C)及 DPPH 自由基清除能力(D)的分布

Fig. 1 Distribution of total phenols (A), total avenanthramides (B), β-glucan (C), and DPPH scavenging ability (D) of oat accessions

表 2 不同来源地燕麦种质抗氧化能力、总多酚和生物碱含量的变异

Table 2 Variations of antioxidant activities and components in naked oat from different geographic origins

组群 Group	总生物碱含量		总酚含量		DPPH 清除能力	
	Content of TAV (mg kg ⁻¹)		Content of TP (mg kg ⁻¹)		DPPH scavenging ability (mg L ⁻¹)	
	变幅 Range	变异系数 CV	变幅 Range	变异系数 CV	变幅 Range	变异系数 CV
中国内蒙古 Inner Mongolia, China	25.21–249.95	0.62	331.94–791.84	0.11	67.03–179.98	0.22
中国河北 Hebei, China	61.29–225.27	0.35	391.78–748.48	0.22	60.88–137.84	0.23
中国西南 Southwest, China	78.24–337.12	0.36	418.53–664.93	0.05	29.62–121.87	0.12
中国东北 Heilongjiang, China	71.32–140.64	0.28	514.44–570.12	0.03	62.48–109.73	0.23
中国陕西 Shaanxi, China	42.76–105.93	0.41	368.71–470.71	0.09	12.92–112.96	0.49
中国山西 Shanxi, China	31.68–242.17	0.55	296.66–720.38	0.21	29.24–179.05	0.39
甘肃+青海 Gansu+Qinghai, China	44.72–347.55	0.80	303.18–633.20	0.23	71.70–126.72	0.21
北美组群 North America	54.23–218.22	0.40	250.99–777.91	0.31	45.80–118.98	0.42
前苏联 Former Soviet Union	42.76–144.22	0.41	278.27–692.81	0.32	23.70–123.48	0.41

Abbreviations as in Table 1.

国西南组群变异最小。不同种质类型裸燕麦的抗氧化能力、总酚和生物碱的变幅和变异系数也较大(表 3)。国内种质生物碱含量的变异远大于国外种质,而国外种质总酚含量的变异大于国内种质。

2.3 燕麦种质抗氧化作用及其总多酚、生物碱和 β-葡聚糖含量的聚类分析

120 份燕麦种质聚为 6 大类群, 其中第 2 类群种质数量最多, 占总种质数的 32.5 %。第 1 类群、第 4

类群和第 6 类群种质数量次之, 分别占总种质数的 16.7%、18.3%和 20.8%。第 3 类群和第 5 类群的种质数量较少, 分别为 2 和 12 个(表 4), 聚类结果与燕麦的种质来源地无必然联系。分析各类群总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量以及 DPPH 清除能力最终聚类中心变量的标准化均数, 发现第 1 类群种质的总酚和 β -葡聚糖含量较高, 总燕麦生物碱含量较低, DPPH 清除能力中等; 第 2 类群种质的总酚含量中等, β -葡聚糖含量很高, 生物碱含量很低, DPPH 清除能力较低; 第 3 类群种质的总酚含量较高, β -葡聚糖含量较高, 生物碱含量很高, DPPH 清除能力较高; 第 4 类群种质的总

酚含量很低, β -葡聚糖含量很高, 生物碱含量很低, DPPH 清除能力也很低; 第 5 类群种质的总酚含量很高, β -葡聚糖含量很高, 生物碱含量较高, DPPH 清除能力最高; 第 2 类群种质的总酚含量较低, β -葡聚糖含量较高, 燕麦生物碱含量较高, DPPH 清除能力中等。6 大类群的优劣顺序: 第 3 类>第 5 类>第 1 类>第 6 类>第 2 类>第 4 类。

从类群的间距可以看出, 第 2 类与第 3 类间距最大, 第 1 类与第 3 类、第 3 类与第 4 类次之, 第 1 类与第 2、第 2 类与第 4 类、第 5 类与第 6 类再次, 第 1 类与第 6 类最小(表 5)。

表 3 不同种质类型的抗氧化能力、总酚和生物碱含量的变异
Table 3 Variations of antioxidant activities and components in naked oat from different types of group

组群 Group	总生物碱含量		总酚含量		DPPH 清除能力	
	Content of TAV (mg kg ⁻¹)		Content of TP (mg kg ⁻¹)		DPPH scavenging ability (mg L ⁻¹)	
	变幅 Range	变异系数 CV	变幅 Range	变异系数 CV	变幅 Range	变异系数 CV
国内种质 Domestic	25.21–347.55	0.62	296.66–791.84	0.20	12.09–179.98	0.39
国内地方品种 Domestic landraces	31.68–347.55	0.63	296.66–791.84	0.22	12.09–179.98	0.40
国内选育品种 Domestic cultivars	25.21–242.14	0.59	331.94–672.04	0.16	12.71–144.94	0.38
国外种质 Exotic	42.76–218.22	0.42	250.99–777.91	0.30	4.34–123.48	0.42

Abbreviations as in Table 1.

表 4 120 份燕麦种质的聚类结果及各类别的最终聚类中心
Table 4 Cluster analysis of 120 oat accessions and final cluster centers

聚类群 Cluster	种质数 No. of accessions	总酚含量 Content of TP (mg kg ⁻¹)	总生物碱含量 Content of TAV (mg kg ⁻¹)	β -葡聚糖含量 Content of β -glucan (%)	DPPH 清除能力 DPPH scavenging ability (mg L ⁻¹)
1	20	642.81	83.53	5.95	92.42
2	39	516.65	66.12	6.39	74.96
3	2	659.07	342.34	6.05	128.72
4	22	350.35	68.73	6.27	60.11
5	12	684.73	197.05	6.26	140.18
6	25	474.81	143.61	5.87	89.90

Abbreviations as in Table 1.

表 5 各类群中心之间距离
Table 5 Distances between foci of cluster

聚类群 Cluster	1	2	3	4	5
2	13.41				
3	46.49	53.08			
4	29.21	23.62	42.63		
5	30.47	27.19	35.75	27.79	
6	10.46	30.45	41.09	14.86	22.58

2.4 燕麦抗氧化作用与其总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量相关性分析

燕麦 DPPH 清除能力分别与总酚和总生物碱含量呈显著正相关($P<0.01$)(图 2)。表明燕麦籽粒的清

除自由基 DPPH 能力与其所含的总酚和生物碱类物质关系密切, 其中生物碱类物质在总酚酸类物质中对抗氧化能力的贡献最大。而 β -葡聚糖与 DPPH 清除能力之间不存在显著的相关性。可将 DPPH 清除

能力(Y)与总酚(X_1)、生物碱 Bc (X_2)、生物碱 Bp (X_3)和生物碱 Bf (X_4)之间建立 $Y = 0.113X_1 + 0.554X_2 +$

$0.134X_3 + 0.966X_4$ 的回归方程($F=24.380$, Signif $F=0.0003$)。

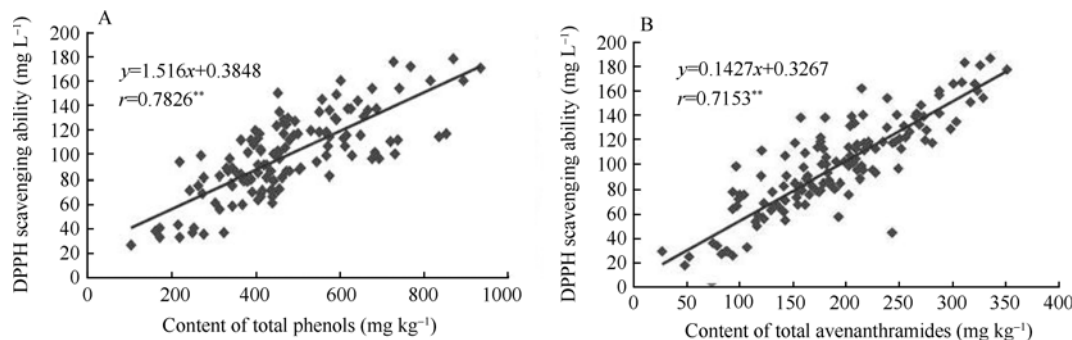


图 2 DPPH 清除能力与总酚(A)和总生物碱(B)含量的关系
Fig. 2 Correlation of DPPH scavenging ability with contents of total phenols (A) and total avenanthramides (B)

3 讨论

3.1 燕麦抗氧化特性的物质基础及其种质资源分布特点

总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量以及抗氧化能力在裸燕麦种质间存在显著差异,说明裸燕麦种质抗氧化性和抗氧化物含量具有遗传多样性。Peterson 等^[25]和 Emmons 等^[26]比较了不同种质在不同地点的抗氧化物质含量和抗氧化活性,评价了基因型和环境对抗氧化能力及其抗氧化物含量的影响。结果表明,基因型和环境对抗氧化物的含量均有影响,不同基因型和环境间生物碱含量有显著差异。本研究发现在同一环境中燕麦生物碱和总酚含量以及抗氧化能力在种质间存在显著差异($P < 0.01$),且抗氧化能力与生物碱和总酚含量之间显著相关($P < 0.01$),说明燕麦生物碱和总酚是其抗氧化能力的主要物质基础。虽然中国四川组群总生物碱含量高于河北组群,但后者生物碱 Bc 的含量高于前者,其抗氧化能力也稍高于前者,究其原因,是 3 种主要的生物碱的抗氧化能力为 $Bc > Bf > Bp$ ^[27]。国内种质生物碱含量的变异幅度和变异系数远大于国外引进种质,而在国内种质中,地方种的变异幅度和变异系数大于选育品种。这些广泛的变异,为进一步的品质育种提供了基础。

3.2 富含生物碱抗氧化燕麦新品种的选育

120 个燕麦种质的总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量以及 DPPH 清除能力均呈现正态或偏正态分布,表现出受微效多基因控制的数量性状的遗传特征。120 个燕麦种质聚成 6 大类群,各类群的总多酚、生物碱和 β -葡聚糖含量以及 DPPH 清除能力各有特

点。在育种实践中,可以根据这一聚类结果,选择遗传距离较大或中等的种质进行单交或复交,从杂交后代中选育有利成分含量均较高的材料。随着人们生活水平的提高,评价和筛选具有强抗氧化活性的天然资源已成为生物学、医学和食品科学研究的热点之一。本研究结果表明,总酚和生物碱是燕麦抗氧化能力的重要物质基础,其中生物碱属于总酚酸中的一类化合物,对抗氧化能力的贡献较大,因此,可以把生物碱作为一个育种指标;同时,因 β -葡聚糖有较强的降血脂作用^[28],在育种中,可兼顾二者的含量,选育高抗氧化、高降血脂的优异燕麦种质。

4 结论

不同裸燕麦种质的抗氧化能力、总酚、生物碱和 β -葡聚糖含量的变幅和变异系数较大,存在显著的基因型差异,具数量性状的遗传特点。与国外种质比较,国内种质生物碱含量差异较大。聚类结果表明,6 大类群的优劣为第 3 类 > 第 5 类 > 第 1 类 > 第 6 类 > 第 2 类 > 第 4 类。燕麦生物碱是其抗氧化作用的重要物质基础。四川地方品种堵吉和青海地方品种玉麦 L38 等生物碱含量较高,均大于 300 mg kg^{-1} ,具有较强的清除自由基的能力,可为燕麦抗氧化品质育种及功能性产品开发提供材料。

References

- [1] Zhao X-F(赵秀芳), Rong Y-P(戎郁萍), Zhao L-X(赵来喜). The collection and evaluation of oat (*Avena sativa*) in China. *Pratacult Sci* (草业科学), 2007, 24(3): 36–39 (in Chinese with English abstract)
- [2] Yang H-P(杨海鹏). History of naked oats. *Inner Mongolia Agric Sci & Tech* (内蒙古农业科技), 1979, (5): 33 (in Chinese)

- [3] Wang M-Y(王茅雁), Qi X-L(齐秀丽), Zhang F-Y(张凤英). Progress in the research of oat molecular biology abroad. *J Inner Mongolia Agric Univ* (内蒙古农业大学学报), 2001, 22(4): 139–144 (in Chinese with English abstract)
- [4] Zheng D-S(郑殿升), Lü Y-C(吕耀昌), Tian C-Y(田长叶), Zhao W(赵伟). Analysis on beta-glucan content of naked oat. *J Plant Genet Resour* (植物遗传资源学报), 2006, 7(1): 54–58 (in Chinese with English abstract)
- [5] Deng W-H(邓万和), Wang Q(王强), Lü Y-C(吕耀昌), Zhou S-M(周素梅). Effects of cultivar and environment on β -glucan content in oats. *J Chin Cereals & Oils Assoc* (中国粮油学报), 2005, 20(2): 30–32 (in Chinese with English abstract)
- [6] Dong J-L(董吉林), Shen R-L(申瑞玲). Compositional analysis of naked oat bran and nutrient β -glucan extraction. *J Shanxi Agric Univ* (山西农业大学学报), 2005, 25(1): 70–73 (in Chinese with English abstract)
- [7] Wei H(魏红), Zhang Z-S(张泽生), Zhang M(张民), Gao W-W(高薇薇). Study on anti-oxidative activity: the extracts from naked oat bran. *Food Res & Devel* (食品研究与开发), 2007, 28(2): 14–17 (in Chinese with English abstract)
- [8] Shi D-F(时东方), Ren C-Z(任长忠), Li L(李丽), Wang Q(王强), Zheng M-Z(郑梅竹), Liu C-M(刘春明). Analysis of components and study on antioxidant activity of phenolics in oats. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2008, 36(30): 13000–13002 (in Chinese with English abstract)
- [9] Peters F N, Musher S. Oat flour as an antioxidant. *Ind Eng Chem*, 1937, 29: 146–151
- [10] Peterson D M. Oat antioxidants. *J Cereal Sci*, 2001, 33: 115–129
- [11] Dimberg L H, Theander O, Lingnert H. Avenanthramides: a group of phenolic antioxidants in oats. *Cereal Chem*, 1993, 70: 637–641
- [12] Peterson D M, Hahn M J, Emmons C L. Oat avenanthramides exhibit antioxidant activities in vitro. *Food Chem*, 2002, 79: 473–478
- [13] Ji L L, Lay D, Chung E, Fu Y, Peterson D M. Effects of avenanthramides on oxidant generation and antioxidant enzyme activity in exercised rats. *Nutr Res*, 2003, 23: 1579–1590
- [14] Liu L P, Zubik L, Collins F W, Marko M, Meydani M. The antiatherogenic potential of oat phenolic compounds. *Atherosclerosis*, 2004, 175: 39–49
- [15] Sur R, Nigam A, Grote D, Liebel F, Southall M D. Avenanthramides, polyphenols from oats, exhibit anti-inflammatory and anti-itch activity. *Arch Dermatol Res*, 2008, 300: 569–574
- [16] Peng C-L(彭长连), Chen S-W(陈少薇), Lin Z-F(林植芳), Lin G-Z(林桂珠). Detection of antioxidative capacity in plants by scavenging organic free radical DPPH. *Prog Biochem Biophys* (生物化学与生物物理进展), 2000, 27(6): 658–661 (in Chinese with English abstract)
- [17] Brand W W, Cuvelier M E, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensm-Wiss Technol*, 1995, 28: 25–30
- [18] Yu L, Haley S, Perret J, Harris M, Wilson J, Qian M. Free radical scavenging properties of wheat extracts. *J Agric Food Chem*, 2002, 50: 1619–1624
- [19] Ren Y(任伟), Ren G-X(任贵兴), Ma T-J(马挺军), Ping H(平华), Niu X-W(牛西午). Extraction and antioxidant activity of avenanthramides from oat bran. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(5): 265–269 (in Chinese with English abstract)
- [20] Wang W-H(王稳航), Li Y(李玉), Li K(李琨). The phenolics composition and antioxidative properties in stored apple. *Food Res & Devel* (食品研究与开发), 2006, 27(1): 5–8 (in Chinese with English abstract)
- [21] Yan S-L(严守雷), Wang Q-Z(王清章), Peng G-H(彭光华). Folin method to determine the total phenols content in the joints of lotus roots. *J Huazhong Agric Univ* (华中农业大学学报), 2003, 22(4): 412–414 (in Chinese with English abstract)
- [22] Pan Y M, Wang K, Hang S Q, Wang H S, Mu X M. Antioxidant activity of microwave-assisted extract of longan (*Dimocarpus Longan* Lour) peel. *Food Chem*, 2008, 106: 1264–1270
- [23] Peterson D M, Wesenberg D M, Burrup D E. β -glucan content and its relationship to agronomic characteristics in elite oat germplasm. *Crop Sci*, 1995, 35: 965–970
- [24] Xu J-R(徐金瑞), Zhang M-W(张名位), Liu X-H(刘兴华). Correlation between antioxidation, and content of total phenolics and anthocyanin in black soybean accessions. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2006, 39(8): 1545–1552 (in Chinese with English abstract)
- [25] Peterson D M, Wesenberg D M, Burrup D E, Erickson C A. Relationships among agronomic traits and grain composition in oat genotypes grown in different environments. *Crop Sci*, 2005, 45: 1249–1255
- [26] Emmons C L, Peterson D M. Antioxidant activity and phenolic content of oat as affected by cultivar and location. *Crop Sci*, 2001, 41: 1676–1681
- [27] Bratt K, Sunnerheim K, Bryngelsson S, Fagerlund A, Engman L, Andersson R E, Dimberg L H. Avenanthramides in oats (*Avena sativa* L.) and structure-antioxidant activity relationships. *J Agric Food Chem*, 2003, 51: 594–600
- [28] Kevin C M, Fred S, Marlyn A S, Patricia E V, Laura C Q, Pamela G H, Arlene T, Michael H D. Food products containing free tall oil-based phytosterols and oat β -glucan lower serum total and LDL cholesterol in hypercholesterolemic adults. *J Nutr*, 2003, 133: 808–813