

Si 在燕麦籽粒中的富集及其与其它 8 种元素的关系

张国良^{1,2}, 樊明寿³, 陈 刚¹, 刘 娟¹, 周卫东¹, 孙国荣^{1,4,*}

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 淮阴工学院生命科学与化学工程学院, 淮安 223001

3. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 4. 滨州职业学院, 滨州 256624)

摘要:通过环境扫描电镜结合 X 射线电子探针显微分析技术, 对 22 个基因型的燕麦籽粒皮层、糊粉层、近糊粉层和颖果中部的 Si 含量进行测定。结果表明, Si 元素在燕麦籽粒不同部位的含量有明显差异, 皮层和糊粉层 Si 含量较高, 近糊粉层和颖果中部含量较低, 在颖果中 Si 主要富集在糊粉层中; 而且不同基因型燕麦籽粒同一部位或不同部位 Si 的积累量也有较大差异, 这可能是由遗传差异引起的。糊粉层中的 Si 含量影响着近糊粉层和颖果中部的 Si 含量。另外, 籽粒不同部位 Si 含量与 P、Ca、Mg、S、Al、Pb 含量之间存在显著或极显著的非线性关系, 颖果中部的 Si 含量与 K、Cd 含量之间不存在显著的非线性关系。说明 Si 在燕麦籽粒中富集的同时也影响着 P、Ca、Mg、S、Al、Pb 等元素的富集。

关键词:燕麦籽粒; Si; X 射线电子探针显微分析; 富集

文章编号: 1000-0933(2009)12-6843-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Accumulation of silicon in different genotypes of oat grains and its relationship with other eight elements

ZHANG Guo-Liang^{1,2}, FAN Ming-Shou³, CHEN Gang¹, LIU Juan¹, ZHOU Wei-Dong¹, SUN Guo-Rong^{1,4,*}

1 Key Lab for Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 College of Life Science and Chemistry Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China

3 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

4 Binzhou Vocational College, Binzhou 256624, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6843 ~ 6849.

Abstract: Silicon (Si) is the second most abundant element in the earth's crust, the beneficial effects of this element on the growth, development, yield and disease resistance have been observed in a wide variety of plant species. However, the precise distribution of silicon, and its relationship with some heavy metals in oat grain are largely unexplored. In the present study, the Si levels of 22 oat genotypes in 4 different grain parts (the cortex, aleuronic layer, near aleuronic layer and center of caryopsis) were determined by environmental scanning electron microscopy combining with X-ray electron probe microanalysis, and its relevancy with the contents of other metals in the whole oat grain, including P, Mg, K, Ca, S, Cd, Al and Pb, were analysed. There was remarkable difference in Si levels among different portions of oat grain, with higher Si contents in the cortex and aleuronic layer, while less Si in the near aleuronic layer and center of caryopsis, which implied that Si predominantly deposited in the aleuronic layer for a whole oat caryopsis. Moreover, the considerable difference in Si level was also existed among the different oat genotypes, with a comparison of the same portion of different oat cultivars, suggesting that oat genotypes had a dominant effect on Si accumulation. Si content in aleuronic layer was closely related to that in near aleuronic layer and center of caryopsis. Furthermore, a significant non-linear correlation between the content of Si and that of P, Ca, Mg, S, Al, Pb in different parts of oat grains was observed, but no significant non-linear relationship

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30770344, 30270234 和 30600073); 国家 863 重大科技专项资助项目(2007AA021402); 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目(2006); 淮安市产学研合作计划资助项目(HAC0823)

收稿日期: 2008-08-20; 修订日期: 2009-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: grsun@live.cn

existed between the content of Si and that of K, Cd in the center of caryopsis. The Si accumulation might facilitate the accumulation of P, Ca, Mg, S, Al and Pb.

Key Words: oat grain; silicon; X-ray electron probe microanalysis; accumulation

燕麦属于禾本科 1 年生草本植物,一般分为带稃型和裸粒型两大类。由燕麦做成的燕麦片是国外传统的方便食品,其销量之大可与啤酒和快餐相比,我国燕麦片消费也呈增长趋势。并且裸燕麦的营养价值在禾谷类作物中居首位,蛋白质含量高达 14% ~ 19%,氨基酸的含量多而种类齐全,人体必须的 8 种氨基酸的含量不仅为稻米和小麦的 2 倍多,并含有较多的儿童发育不可缺少的组氨酸、赖氨酸。此外,还含有 Ca、P、K、Mg 等多种矿质元素^[1,2]。Si 是高等植物营养的有益元素之一,对木贼科植物和禾本科植物则是必需的^[3,4],Si 在植物的生长、发育、增强抗逆性、提高产量和改善籽粒品质等方面起着重要作用^[4~9]。Si 是人体所必需的微量元素,主要集中于骨骼、肺、淋巴结、胰腺、肾上腺、指甲和头发之中,在主动脉、气管、肌腱、骨骼和皮肤等结缔组织含量最高,小动脉、角膜、巩膜也有相当高的含量;硅是胶原、弹力纤维和细胞外无定形连接物质的主要成分;硅也存在于各种酶中,硅与维持机体的正常生长和骨骼的形成有关,硅是构成成骨细胞的主要成分之一,它参与骨的钙化过程,对人体心血管等也具有保健功能^[10~14]。

尽管 Si 在植物生长发育中的作用,以及在人体中的作用已有大量报道, Powell 等^[15]测定了 207 种食物和饮料,发现燕麦制作的食品 Si 含量最高,可以成为人类补充 Si 的重要来源。但是 Si 元素在燕麦籽粒中的具体分布情况,以及其与一些影响作物生长、危害人体健康的重金属之间的关系如何等问题,尚未见报道。本文以 22 个基因型的燕麦籽粒为材料,采用环境扫描电子显微镜和 X 射线电子探针的方法,测定了不同基因型的燕麦籽粒不同部位 Si 的相对含量,并分析了其在燕麦籽粒中的分配规律、相互关系以及与 Al、Cd、Pb、K、Ca、Mg、P、S 8 种元素相对含量之间的关系。

1 材料与方法

1.1 材料

试验选用 22 个基因型燕麦:永 118、健壮、3584、3585、3569、3535、斯比特、とわりセコカ、ハヤテ、太 f、イオーマ、781、内农大燕 2 号、内农大燕 1 号、内燕三号、华北二号、2007、2013、2011、3172、103 和永 492 (在文中分别相应以 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l、m、n、o、p、q、r、s、t、u 和 v 表示),在扬州大学农牧场进行种植,土质为砂壤土,地力中等,土壤有机质含量 17.23 g/kg,全氮 10.7 g/kg,碱解氮 88.5 mg/kg,速效磷 30.6 mg/kg,速效钾 88.2 mg/kg,有效硅 185.6 mg/kg。田间试验每个品种设 3 次重复,氮磷钾肥的施用量分别为: N 75kg/hm², P₂O₅ 37.5kg/hm², K₂O 37.5kg/hm²,其他管理措施统一按常规栽培要求实施。籽粒成熟后收获,脱去颖壳分别测定皮层、糊粉层、近糊粉层和颖果中部 Al、Cd、Pb、K、Ca、Mg、P、S 和 Si 的相对含量(图 1)。

1.2 环境扫描电镜的观察

直接将干净的未经任何处理的燕麦籽粒用导电银胶粘在样品台上,在荷兰飞利浦公司的 XL-30 型环境扫描电镜下观察与能谱分析。样品室的环境条件为:冷台温度选定 5℃,样品室气压 4 Torr,加速电压 15 kV。

1.3 X 射线电子探针显微分析

燕麦籽粒样品在扫描电子显微镜下观察的同时,用美国 Thermo 公司的 Kevex 能谱仪进行 X 射线电子探针显微分析,加速电压为 20 kV,速流为 0.15 μA,样品倾角为 0°,样品与探针间的角度为 33°,工作距离为

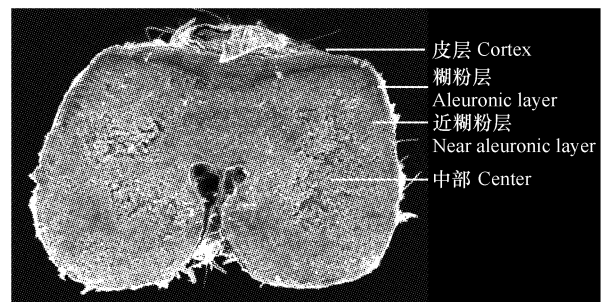


图 1 X 射线电子探针显微分析的部位

Fig. 1 Part of oat grain for X-ray electron probe microanalysis

10.0 mm。对样品进行点分析,测定 Al、Cd、Pb、K、Ca、Mg、P、S 和 Si 的相对含量,以 Cnts/s 表示元素的相对含量。每个基因型籽粒制样重复测定 7~8 次。

1.4 数据统计分析

采用 SigmaPlot 10.0 统计软件进行相关分析并作图,图中数据均为 7~8 次重复测定的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同基因型燕麦籽粒不同部位 Si 含量差异

从 22 个基因型燕麦籽粒不同部位 Si 含量的变化范围来看,由大到小的顺序为:皮层(A) > 糊粉层(B) > 近糊粉层(C) > 颖果中部(D) (图 2)。说明燕麦籽粒不同部位 Si 含量之间存在明显差异。

从不同基因型燕麦不同部位 Si 含量比较来看,皮层 Si 的平均含量以 n 最高,而 d 最低(图 2A);糊粉层、近糊粉层和颖果中部均以基因型 3584 Si 的平均含量最高,糊粉层 Si 的平均含量以 o 最低,近糊粉层 Si 的平均含量以 j 最低,籽粒中部 Si 平均含量以 m 最低(图 2 B~D)。说明不同基因型的燕麦对 Si 的富集量存在遗传差异,这种差异体现在不同种子同一部位的 Si 含量及其在不同部位之间分布特征上。

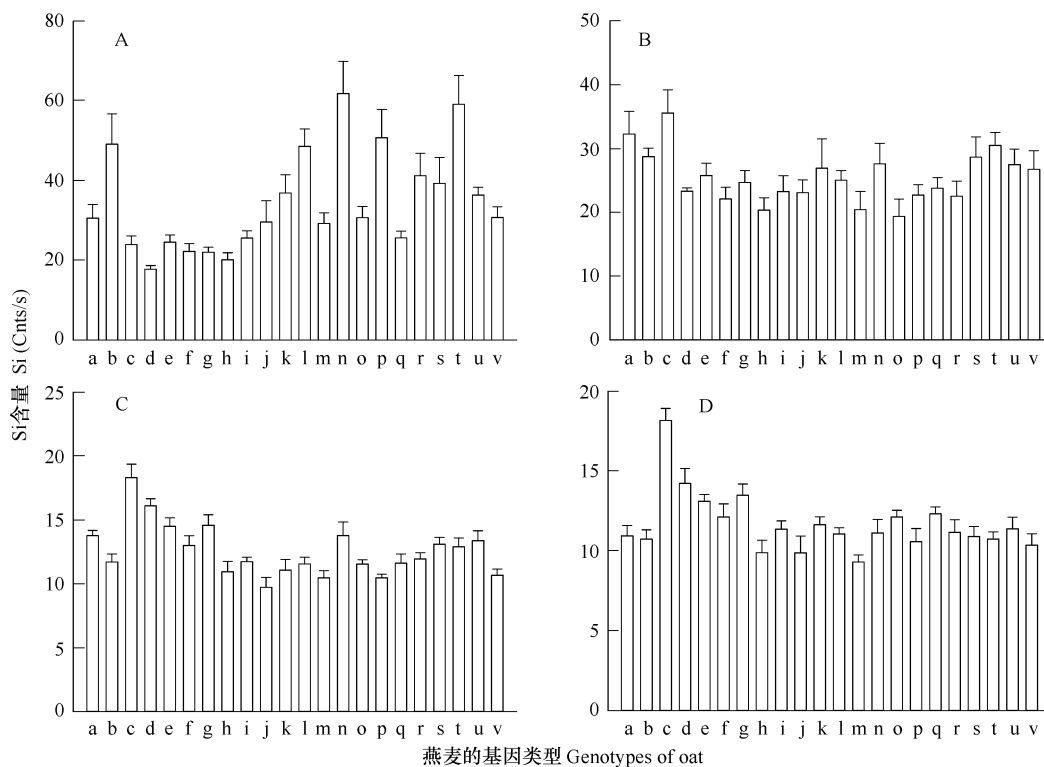


图 2 燕麦籽粒不同部位 Si 含量

Fig. 2 The relative content of Si in different part of 22 genotype oat grains

A. 皮层 cortex of oat grains; B. 糊粉层 aleuronic layer; C. 近糊粉层 near aleuronic layer; D. 颖果中部 the center of caryopsis

2.2 燕麦籽粒不同部位 Si 含量之间的关系

从表 1 可知,燕麦籽粒皮层部位的 Si 含量与中部 Si 含量之间存在显著的非线性关系,而与糊粉层和近糊粉层 Si 含量不存在显著的非线性关系,说明皮层部位的 Si 含量对颖果中部 Si 含量有影响。表 1 还说明燕麦籽粒糊粉层 Si 含量与近糊粉层和颖果中部 Si 含量之间存在显著的非线性关系,且糊粉层部位的 Si 含量与近糊粉层 Si 含量的相关系数($r^2 = 0.3893$)小于其与颖果中部 Si 含量的相关系数($r^2 = 0.4557$),近糊粉层 Si 含量与颖果中部 Si 含量之间存在极显著的非线性关系,以上说明糊粉层部位的 Si 含量影响着近糊粉层和颖果中部的 Si 含量,近糊粉层的 Si 含量也影响着颖果中部的 Si 含量,颖果中部 Si 含量与糊粉层的关系比其与近糊粉层更密切。

表 1 22 个基因型燕麦籽粒皮层、糊粉层、近糊粉层和颖果中部硅含量之间的关系

Table 1 Relationship between the relative content of Si in the grain cortex, and that of aleuronic layer, near aleuronic layer, center of 22 genotype oat grains

部位 Part	皮层 Cortex	糊粉层 Aleuronic layer	近糊粉层 Near aleuronic layer	颖果中部 Caryopsis center
皮层 Cortex		$y = 779.1470 - 92.5554x + 3.7099x^2 + -0.0480x^3$, $r^2 = 0.3119$, $P = 0.0750$	$y = -637.3258 + 145.7576x - 10.2196x^2 + 0.2307x^3$, $r^2 = 0.1574$, $P = 0.3668$	$y = -1300.5758 + 317.2486x - 24.3748x^2 + 0.6015x^3$, $r^2 = 0.4105$, $P = 0.0207$
糊粉层 Aleuronic layer	$y = 5.8791 + 1.5552x - 0.0402x^2 + 0.0003x^3$, $r^2 = 0.1006$, $P = 0.5806$		$y = -177.7390 + 44.1269x - 3.1947x^2 + 0.0774x^3$, $r^2 = 0.3893$, $P = 0.0279$	$y = -349.6714 + 88.6713x - 6.8636x^2 + 0.1734x^3$, $r^2 = 0.4557$, $P = 0.0105$
近糊粉层 Near aleuronic layer	$y = 23.7494 - 0.6754x + 0.0109x^2 - 4.4103 \times 10^{-5}x^3$, $r^2 = 0.2351$, $P = 0.1753$	$y = -102.8068 + 13.2986x - 0.5113x^2 + 0.0066x^3$, $r^2 = 0.4758$, $P = 0.0077$		$y = 16.4373 - 2.7216x + 0.2934x^2 - 0.0076x^3$, $r^2 = 0.7446$, $P < 0.0001$
颖果中部 Caryopsis center	$y = 21.6562 - 0.6310x + 0.0119x^2 - 7.2878 \times 10^{-5}x^3$, $r^2 = 0.2225$, $P = 0.1992$	$y = -176.6160 + 22.1185x - 0.8561x^2 + 0.0109x^3$, $r^2 = 0.5976$, $P = 0.0008$	$y = -35.7636 + 10.5615x - 0.8175x^2 + 0.0219x^3$, $r^2 = 0.8529$, $P < 0.0001$	

斜体表示两者关系为显著或极显著,下同 The italics mean significant or extremely significant relations between horizontal and vertical column, the same below

2.3 燕麦籽粒不同部位 Si 含量和 Al、Cd、Pb 含量之间的关系

从表 2 可知,22 个基因型燕麦籽粒皮层 Si 含量与 Al、Cd 和 Pb 含量之间不存在显著关系,糊粉层和近糊粉层 Si 含量与 Al、Cd 和 Pb 含量之间存在着显著或极显著的非线性关系,而且糊粉层的 Al、Cd 和 Pb 含量随着 Si 含量的增加而增加,同时 Si 含量与 Pb 含量的相关系数大于其与 Al、Cd 含量的相关系数,说明在燕麦籽粒糊粉层中,Pb 含量与 Si 含量关系更密切。近糊粉层也曾有类似现象,但其 Si 含量与 Al 含量的相关系数大于其与 Cd、Pb 含量的相关系数,说明在燕麦籽粒近糊粉层中,Al 含量与 Si 含量关系更密切。颖果中部 Si 含量与 Al、Pb 含量之间存在极显著的非线性关系,但与 Cd 含量关系不显著,并且 Al、Pb 含量随着 Si 含量的增加而明显增加,其 Si 含量与 Al 含量的相关系数大于其与 Pb 含量的相关系数,说明在燕麦颖果中部,Al 含量与 Si 含量关系更密切。

表 2 22 个基因型燕麦籽粒皮层、糊粉层、近糊粉层和颖果中部硅含量与 Al, Cd, Pb 之间的关系

Table 2 Relationship between the relative content of Si and Al, Cd, Pb in the grain cortex, and aleuronic layer, near aleuronic layer, center of 22 genotype oat grains

部位 Part	Al	Cd	Pb
皮层 Cortex	$y = -69.0799 + 7.2191x - 0.2013x^2 + 0.0018x^3$, $r^2 = 0.2920$, $P = 0.0946$	$y = 3.4460 + 0.3409x - 0.0120x^2 + 0.0001x^3$, $r^2 = 0.2307$, $P = 0.1833$	$y = 4.7957 + 0.1283x - 0.0021x^2 + 8.0991 \times 10^{-6}x^3$, $r^2 = 0.0385$, $P = 0.8670$
糊粉层 Aleuronic layer	$y = 210.1586 - 24.5547x + 0.9774x^2 - 0.0124x^3$, $r^2 = 0.3349$, $P = 0.0567$	$y = -112.4536 + 13.5941x - 0.5054x^2 + 0.0062x^3$, $r^2 = 0.3440$, $P = 0.0506$	$y = -95.1841 + 12.2219x - 0.4757x^2 + 0.0061x^3$, $r^2 = 0.5522$, $P = 0.0020$
近糊粉层 Near aleuronic layer	$y = -64.5709 + 13.5792x - 0.8012x^2 + 0.0158x^3$, $r^2 = 0.4294$, $P = 0.0157$	$y = 72.6489 - 15.1762x + 1.0901x^2 - 0.0250x^3$, $r^2 = 0.3715$, $P = 0.0354$	$y = 106.4466 - 20.9792x + 1.4349x^2 - 0.0312x^3$, $r^2 = 0.3990$, $P = 0.0244$
颖果中部 Caryopsis center	$y = -37.0288 + 8.9414x - 0.5779x^2 + 0.0130x^3$, $r^2 = 0.5411$, $P = 0.0024$	$y = 28.9874 - 5.9495x + 0.4576x^2 - 0.0109x^3$, $r^2 = 0.2309$, $P = 0.1831$	$y = -2.8283 + 2.1853x - 0.1733x^2 + 0.0053x^3$, $r^2 = 0.5166$, $P = 0.0038$

2.4 燕麦籽粒不同部位 Si 含量与 K、Ca、Mg、P、S 含量之间的关系

从表 3 可知,不同基因型的燕麦籽粒,皮层 Si 含量与 K、Ca、Mg、P、S 含量之间均存在显著或极显著的非线性关系,这些元素含量随 Si 含量的增加而增加,并且皮层 Si 含量与与 P 含量的相关系数远远大于其与其它元素含量的相关系数,说明在燕麦籽粒皮层, Si 含量影响着 K、Ca、Mg、P、S 含量,而且与 P 含量关系更密切,皮层 Si 含量对 P 的富集有促进作用。

糊粉层 Si 含量与 Ca、Mg、P、S 含量之间存在显著或极显著的非线性关系,而与 K 之间不存在显著的非线性关系,糊粉层 Si 含量与 Ca 含量的相关系数略小于其与 Mg 含量的相关系数,而大大小于其与 P、S 含量的相关系数,说明糊粉层 Si 含量影响着 Ca、Mg、P、S 含量,而且与 P、S 含量关系更密切。

近糊粉层 Si 含量与 K、Ca、Mg、P、S 含量之间存在极显著的非线性关系,并且其 Si 含量与 P 含量的相关系数最大,说明近糊粉层 Si 含量影响着 K、Ca、Mg、P、S 含量,而且与 P 含量关系更密切。

颖果中部 Si 含量与 Ca、Mg、P、S 含量之间存在极显著的非线性关系,与 K 含量关系不显著,并且其 Si 含量与 P 含量的相关系数最大,说明颖果中部 Si 含量影响着 Ca、Mg、P、S 含量,而且与 P 含量关系更密切。

表 3 22 个基因型燕麦籽粒皮层、糊粉层、近糊粉层和颖果中部硅含量与 K, Ca, Mg, P, S 之间的关系
Table 3 Relationship between the relative content of Si and K, Ca, Mg, P, S in the grain cortex, and aleuronic layer, near aleuronic layer, center of 22 genotype oat grains

部位 Part	K	Ca	Mg	P	S
皮层 Cortex	$y = 49.8476 + 5.5822x - 0.2512x^2 + 0.0027x^3$, $r^2 = 0.6188$, $P = 0.0005$	$y = -30.5660 + 3.2514x - 0.0683x^2 + 0.0005x^3$, $r^2 = 0.4515$, $P = 0.0113$	$y = 156.8253 - 8.9142x + 0.1740x^2 - 0.0011x^3$, $r^2 = 0.5255$, $P = 0.0032$	$y = 760.3600 - 43.4523x + 0.8085x^2 - 0.0048x^3$, $r^2 = 0.6511$, $P = 0.0002$	$y = 45.2689 - 2.6231x + 0.0617x^2 - 0.0005x^3$, $r^2 = 0.4145$, $P = 0.0196$
糊粉层 Aleuronic layer	$y = -311.6806 + 37.3128x - 1.1336x^2 + 0.0113x^3$, $r^2 = 0.1883$, $P = 0.2774$	$y = 222.8790 - 25.2409x + 0.9812x^2 - 0.0122x^3$, $r^2 = 0.3675$, $P = 0.0374$	$y = 852.4262 - 100.3873x + 3.9816x^2 - 0.0510x^3$, $r^2 = 0.4033$, $P = 0.0229$	$y = 1534.1177 - 183.9603x + 7.7423x^2 - 0.1030x^3$, $r^2 = 0.4505$, $P = 0.0114$	$y = -97.2373 + 14.4555x - 0.5972x^2 + 0.0081x^3$, $r^2 = 0.4855$, $P = 0.0020$
近糊粉层 Near aleuronic layer	$y = 280.6287 - 62.4326x + 4.6241x^2 - 0.1104x^3$, $r^2 = 0.7002$, $P < 0.0001$	$y = 51.2777 - 10.5453x + 0.7499x^2 - 0.0169x^3$, $r^2 = 0.5481$, $P = 0.0021$	$y = -24.5733 + 5.0177x - 0.2688x^2 + 0.0051x^3$, $r^2 = 0.7671$, $P < 0.0001$	$y = 121.2351 - 23.9823x + 1.7703x^2 - 0.0399x^3$, $r^2 = 0.8507$, $P < 0.0001$	$y = -203.7411 + 48.3562x - 3.5607x^2 + 0.0868x^3$, $r^2 = 0.5348$, $P = 0.0027$
颖果中部 Caryopsis center	$y = 156.7865 - 36.6302x + 2.8758x^2 - 0.0726x^3$, $r^2 = 0.2766$, $P = 0.1125$	$y = 31.1957 - 6.7338x + 0.5239x^2 - 0.0128x^3$, $r^2 = 0.4407$, $P = 0.0133$	$y = -17.8363 + 3.7546x - 0.1973x^2 + 0.0036x^3$, $r^2 = 0.7610$, $P < 0.0001$	$y = 30.9405 - 5.7218x + 0.5461x^2 - 0.0137x^3$, $r^2 = 0.8645$, $P < 0.0001$	$y = -7.4010 + 2.8171x - 0.1742x^2 + 0.0043x^3$, $r^2 = 0.6711$, $P = 0.0001$

3 讨论

本研究结果表明, Si 在燕麦籽粒各个部位均有分布,且各个部位含量差异较大,其中,皮层和糊粉层 Si 含量较高,近糊粉层和颖果中部含量较低;而且不同基因型燕麦籽粒同一部位或不同部位 Si 的积累量也有较大差异,这可能是由遗传差异引起的(因为供试验的 22 个基因型燕麦均种植于扬州大学同一试验田,可以看作其土壤和水中即环境中的 Si 对 22 个基因型燕麦种子 Si 富集的影响相对均等)。

谷类作物籽粒的糊粉层是胚乳的表层细胞停止分裂后转化而来的^[16],进入颖果的灌浆物质必须首先经过糊粉层后才能进入内胚乳^[17]。松田^[18]用电镜观察了水稻糊粉层的结构,指出糊粉层具有转移和积累养分的功能。王忠等^[19]认为糊粉层的形成除本身的分化外,还可能与积累矿质和脂类等灌浆“废物”有关,在贮藏物质进入内胚乳时,非贮藏性物质如 Ca 等矿质元素、脂肪酸和部分氨基酸等被滞留在糊粉层中。Ogawa 等^[20]、Tanaka 等^[21]用 X 射线显微分析法测定了水稻、小麦颖果中矿质元素的分布,结果表明糊粉层细胞中富

集 P、K、Ca、Mg 等矿质元素。本研究发现,对燕麦颖果来说,糊粉层中的 Si 含量要比近糊粉层、颖果中部高得多(图 1),糊粉层中的 Si 含量与近糊粉层和颖果中部 Si 含量有密切关系(表 1),同时和籽粒中的 P、Ca、Mg、S 的含量也密切相关(表 3)。P、Ca、Mg、S 也是维持生物体正常生理代谢所必需的矿质元素,在机体的代谢过程中发挥重要的作用。因此,燕麦中 Si 相对含量的提高能够影响糊粉层及其他部位 P、Ca、Mg、S 的含量,也就影响了燕麦的营养价值。

应用电子能量损耗光谱学(EELS)等技术发现植物中的硅沉积物主要是由硅和锌、或者硅和铝组成的,并认为重金属与硅共同参与形成沉积物是植物降低重金属毒性的机理^[22]。但如果这些重金属元素在作物籽粒中富集,进入食物链,就会最终富集于人体中^[23,24],对人体健康仍然会产生潜在的威胁。本研究结果表明,在燕麦籽粒近糊粉层和颖果中部,Al 含量与 Si 含量关系很密切,说明这些食用部位硅和铝也可能形成了硅沉积物。因此,在强调提高燕麦籽粒中 Si 含量的同时,也存在燕麦籽粒中重金属含量增加的风险。本研究中 Si 在燕麦籽粒中的富集与重金属 Pb 的富集也呈显著或极显著的非线性关系,且 Pb 的含量大多随着 Si 含量的增加而增加,说明 Si 在燕麦籽粒中积累的同时,也促进了 Pb 在籽粒中尤其是糊粉层中的积累。在化学元素周期表中 Pb 和 Si 均属 IVA,其化学性质有一些相似的地方,可能燕麦植株吸收及分配 Si 和 Pb 是相伴或部分相伴进行的,从而导致籽粒 Pb 的含量随着 Si 含量的增加而增加。

查燕等^[25]研究发现,Cd 大量积累于籽粒糊粉层中,将水稻糙米加工成精米时,Cd 含量下降为 75.9%,而将小麦加工成面粉后 Cd 残量仅为 38.34%。本研究中 Cd 在燕麦籽粒中的富集虽与 Si 的富集没有显著关系,但其在籽粒中特别是糊粉层和近糊粉层中的富集也是不容忽视的(表 2)。这和查燕等的研究结果是相似的。因此,在强调燕麦高营养和保健价值同时,其重金属富集的危害也应引起重视。可以通过遗传育种的方法,筛选燕麦籽粒对 Al、Pb、Cd 相对富集量较低的基因型作为主要栽培品种,这样可以减轻因食用燕麦及其制品而产生的 Al 和 Pb、Cd 对人类健康的潜在危害。

References:

- [1] M. Sadiq Butt Muhammad Tahir-Nadeem, Muhammad Kashif Iqbal Khan Rabia Shabir Mehmood S. Butt. Oat: unique among the cereals. *European Journal of Nutrition*, 2008, 47 (2): 68—79
- [2] Qi B J, Liu J H. Research progress on β -glucan of oat. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(2): 69—72.
- [3] Epstein E. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50: 641~664.
- [4] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 392—97.
- [5] Zhang G L, Dai Q G, Zhang H C, Huo Z Y, Xu K. Review of silicon nutrition in rice. *Jiangsu Agriculture Science*, 2003, 3: 8—12.
- [6] Zhang G L, Dai Q G, Zhou Q, Pan G Q, Ling L, Zhang H C. Influences of silicon fertilizer on population quality and yield in rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20 (3): 114—117.
- [7] Zhang G L, Dai Q G, Wang J W, Zhang H C, Huo Z Y, Ling L, Wang X, Zhang J. Effects of siliconfertilizer rate on yield and quality of japonica rice Wuyujing 3. *Chinese Journal Rice Science*, 2007, 21 (3): 299—303.
- [8] Zhang G L, Dai Q G, Zhang H C. Silicon application enhances resistance to sheath blight (*Rhizoctonia solani*) in rice. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(5): 600—606.
- [9] Zhang G L, Dai Q G, HUO Z Y, Chen W J, Wang X, Xu K, Sun G R, Zhang J, Liu J, Zhang H C. Exogenous application of sodium silicate improves the resistance of rice photosynthesis to *Rhizoctonia solani*. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4881—4890.
- [10] Martin K R. The chemistry of silica and its potential health benefits. *Journal of Nutrition, Health & Aging*, 2007, 11(2): 94—97.
- [11] Jugdaohsingh R, Anderson S H, Tucker K L, Elliott H, Kiel D P, Thompson R P, Powell J J. Dietary silicon intake and absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2002, 75: 887—93.
- [12] Spector T D, Calomme M R, Anderson S, Swaminathan R, Jugdaohsingh R, Vanden-Berge D A, Powell J J. Effect of bone turn over and BMD of low dose oral silicon as an adjunct to calcium/vitamin D3 in a randomized placebo-controlled trial. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2005, 20: S172.
- [13] Macdonald H M, Hardcastle A E, Jugdaohsingh R, Reid D M, Powell J J. Dietary silicon intake is associated with bone mineral density in premenopausal women and postmenopausal women taking HRT. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2005, 20: S393.
- [14] Jugdaohsingh R, Tucker K L, Kiel D P, Qiao N, Powell J J. Silicon intake is a major dietary determinant of bone mineral density in men and pre-

- menopausal women of the Framingham Offspring Cohort. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2004, 19:297—307.
- [15] Powell J J, McNaughton S A, Jugdaohsingh R, Anderson S H, Dear J, Khot F, Mowatt L, Gleason K L, Sykes M, Thompson R P, Bolton-Smith C, Hodson M J. A provisional database for the silicon content of foods in the United Kingdom. *British Journal of Nutrition*, 2005, 94(5):804—812.
- [16] 星川清亲. 米の胚乳发育に関する组织形态学の研究, 第 4 报, 糊粉层の分化と发育について. *日作纪*, 1967, 36: 216—220.
- [17] Wang Z, Li W F, Gu Y J, Chen G, Shi H Y, Gao Y Z. Development of rice endosperm and the pathway of nutrients entering the endosperm. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(5): 520—527.
- [18] 松田智明. 登熟期の水稻子房における, 糊粉細胞の微細構造と运输、蓄積機構について. *日作纪*, 1984, 53(別号 1): 144.
- [19] Wang Z, Gu Y J, Li W F, Huang S, Li K W. Formation of rice aleurone layer and its changes during germination. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 1998, 1(1): 19—24.
- [20] Ogawa M, Tanaka K, Kasai Z. Accumulation of phosphorus, magnesium and potassium in developing rice grains: followed by electron microprobe X-ray analysis focusing on the aleurone layer. *Plant and Cell Physiology*, 1979, 20: 19—27.
- [21] John N A, Ernest S. X-ray analysis studies of elements stored in protein body globoid crystals of triticum grains. *Plant Physiology*, 1980, 66: 494—499.
- [22] Kathryn E R, Michael S. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6(3): 268—272.
- [23] Chary N S, Kamala C T, Raj D S. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(3): 513—524.
- [24] Sun J W, Huang Y Z, Shi M C, Cui Y S, Li X F, Zhao L J, Du X, Gao W G. The review of heavy metals biotoxicity in soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2861—2869.
- [25] Zha Y, Yang J R, Liu H, He M C. Distribution of heavy metals in polluted crops seeds and the effect of heavy metals in the food processing. *Environmental Science*, 2000, 21(3): 52—55.

参考文献:

- [2] 齐冰洁, 刘景辉. 燕麦 β -葡聚糖研究进展. *中国农业科技导报*, 2007, 9(2): 69—72.
- [5] 张国良, 戴其根, 张洪程, 霍中洋, 许轲. 水稻硅素营养研究进展. *江苏农业科学*, 2003, 3: 8—12.
- [6] 张国良, 戴其根, 周青, 潘国庆, 凌励, 张洪程. 硅肥对水稻群体质量及产量影响研究. *中国农学通报*, 2004, 20(3): 114—117.
- [7] 张国良, 戴其根, 王建武, 张洪程, 霍中洋, 凌励, 王显, 张军. 施硅量对粳稻品种武育梗 3 号产量和品质的影响. *中国水稻科学*, 2007, 21(3): 299—303.
- [8] 张国良, 戴其根, 张洪程. 施硅增强水稻对纹枯病的抗性. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(5): 600—606.
- [9] 张国良, 戴其根, 霍中洋, 等. 外源硅对纹枯病菌侵染下水稻叶片光合功能的改善. *生态学报*, 2008, 28(10): 4881—4890.
- [17] 王忠, 李卫芳, 顾蕴洁, 陈刚, 石火英, 高煜珠. 水稻胚乳的发育及其养分输入的途径. *作物学报*, 1995, 21(5): 520—527.
- [19] 王忠, 顾蕴洁, 李卫芳, 黄山, 李克武. 水稻糊粉层的形成及其在萌发过程中的变化. *扬州大学学报(自然科学版)*, 1998, 1(1): 19—24.
- [24] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 崔岩山, 李小方, 招礼军, 杜心, 高卫国. 土壤重金属生物毒性研究进展. *生态学报*, 2008, 28(6): 2861—2869.
- [25] 查燕, 杨居荣, 刘虹, 何孟常. 谷物中重金属的分布及加工过程的影响. *环境科学*, 2000, 21(3): 52—55.