

晚粳稻籽粒中砷、镉、铬、镍、铅等重金属含量的品种和粒位效应

程旺大^{1,2} 张国平¹ 姚海根² Peter DOMINY³ 王润屹²

(¹ 浙江大学 农业与生物技术学院 农学系, 浙江 杭州 310029; E-mail: chwd228@yeah.net; ² 浙江省嘉兴市农业科学研究院, 浙江 嘉兴 314016; ³ 英国格拉斯哥大学 生物医学与生命科学学院 生物化学与分子生物学系, 英国 格拉斯哥 G128QQ)

Effect of Grain Position in a Panicle and Varieties on As, Cd, Cr, Ni, Pb Contents in Grains of Late japonica Rice

CHENG Wang-da^{1,2}, ZHANG Guo-ping¹, YAO Hai-gen², Peter DOMINY³, WANG Run-yi²

(¹ Department of Agronomy, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; E-mail: chwd228@yeah.net; ² Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing 314016, China; ³ Division of Biochemistry and Molecular Biology, Institute of Biomedical and Life Science, University of Glasgow, Glasgow G128QQ, Scotland, UK)

Abstract: Two japonica rice varieties, a compact panicle type variety (CP) Xiushui 63 and a loose panicle type variety (LP) Xiushui 11, were grown in a slightly contaminated paddy field to determine the effect of grain position within a panicle and varieties on toxic heavy metal content in rice grains. There was a significant variation in heavy metal content among grains within a panicle. Furthermore, this variation varied with variety and metal. Shch as, Xiushui 63 showed higher variation than Xiushui 11, and As, Cd, Cr and Pb had a significant variation, while no significant variation for Ni. The top grains (TG) in a panicle had higher As, Cd and Ni contents compared with the middle ones (MG), and the bottom grains (BG) had the lowest. With regard to Cr and Pb, the case was opposite. The significantly positive correlations were found between grain weight and As, Cd, Ni contents in grains, but negative for grain weight and Cr, and Pb content. There was a remarkable difference in grain filling pattern among grains within a panicle, and between Xiushui 63 and Xiushui 11. In comparison with middle grains and top grains in a panicle, the bottom ones had lower grain filling rate and grain weight, leading to obvious difference in grain weight among grains within a panicle, and Xiushui 63 had significantly larger difference than Xiushui 11. There were significant and positive correlations between As, Cd, Ni content in grains and the maximum grain filling rate, but negative between the contents of these elements in grains and the time reaching the maximum grain filling rate. Concerning Cr and Pb, the case was just opposite. It is suggested that the accumulation of As, Cd and Ni is accompanied by accumulation of carbohydrates in rice grains.

Key words: rice; panicle; grain position; heavy metal; grain weight; grain filling

摘 要: 选用籽粒着粒密度差异较大的密穗型品种秀水 63 和散穗型品种秀水 11, 种植于受重金属轻度污染的土壤, 研究了晚粳稻籽粒中有毒重金属 As、Cd、Cr、Ni、Pb 含量的品种与粒位效应。结果表明, 重金属含量的粒位间差异秀水 63 明显大于秀水 11, As、Cd、Cr、Pb 含量粒位间差异显著, Ni 含量差异较小。穗上部籽粒 As、Cd、Ni 含量高于中部籽粒, 穗下部籽粒最低, 而 Cr、Pb 则正好相反。稻米中几种重金属含量与粒重的关系因重金属种类不同存在着差异, 籽粒 As、Cd、Ni 含量与粒重呈正相关, 而 Cr 和 Pb 含量与粒重呈负相关。秀水 63 和秀水 11 不同粒位的籽粒灌浆模式存在差异, 下位粒灌浆速率较低, 使粒重较上、中位粒低, 导致粒重有较大的粒位差异, 而这种差异也与穗部着粒密度有关, 秀水 63 明显大于秀水 11。籽粒 As、Cd、Ni 含量与最大灌浆速率(GR_m)呈正相关, 与到达最大灌浆速率时间(T_{poi})呈负相关, 而 Cr 和 Pb 含量与以上两个籽粒灌浆特性参数分别呈负相关和正相关, 说明籽粒 As、Cd、Ni 的积累与碳水化合物的积累具有相同或相近的模式, 而 Cr 和 Pb 表现为不同的积累模式。

关键词: 水稻; 穗; 粒位; 重金属; 粒重; 籽粒灌浆

中图分类号: Q945.1; S31; S511.01; X503.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2005)03-0273-07

随着工农业生产的发展, 工业“三废”排放量增加, 固体废弃物处理不善, 农业自身面源污染的加剧, 农田土壤中有毒重金属含量急剧增加, 土壤中的这些有毒重金属有可能通过食物链进入人体, 从而对人类健康造成严重威胁^[1~6]。水稻是全球也是我国最主要的粮食作物, 近 20 年来, 我国稻米重金属含量超标的问题日益突出, 其中以 Pb、Cd、As、Ni 和 Cr 等有毒重金属的污染尤为人们所关注^[7]。为了减轻或避免有毒重金属对人类的危害, 一些国际组织和国家已制定了谷物中有毒重金属的最大允许

量(Allowable maximum value, AMV)。如 WHO/FAO 规定 Cd 的 AMV 为 0.1 mg/kg, Cr 为 1.0 mg/kg, As 为 0.4 mg/kg, Pb 为 0.2 mg/kg^[8]。水稻籽粒重金属积累量存在显著的基因型差异^[9~12], 因而, 近年来国内外众多学者普遍认为可

收稿日期: 2004-08-29; **修改稿收到日期:** 2004-10-21。

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(M303510); 中英合作与交流项目(SHA/992/310); 浙江省科技厅计划项目(2003C32049); 嘉兴市科技局计划项目(20021034)。

第一作者简介: 程旺大(1971—), 男, 博士, 高级农艺师。

以通过筛选和培育低重金属积累的品种达到生产安全稻米的目的,从而为轻、中度重金属污染土壤上持续生产安全稻米提供一条经济、有效的途径^[2,13,14]。然而,有关重金属在水稻籽粒中积累包括品种与粒位效应的生理机制尚有许多不明之处,影响了这些研究的进行。

植物种子中重金属的积累是植物体内重金属吸收与分配的结果,受许多生理过程的影响,如根系吸收、根系至地上部的运输以及地上部各器官间的再分配等^[1]。以往的一些研究,如在亚麻^[15]、花生^[16]和小麦^[17,18]上的研究表明,重金属进入籽粒主要通过韧皮部,且主要决定于重金属从木质部进入穗部韧皮部的能力。如叶和茎中的Cd可以再分配至籽粒,而籽粒中的Cd几乎不再向其他器官运输。籽粒中重金属的含量不仅取决于重金属本身的积累,也与同化产物积累的多少密切相关。籽粒发育过程中重金属积累量相对较多,则籽粒重金属含量增大,反之减少。因此,籽粒的重金属含量也可能受到源库关系和灌浆特性的影响。已有研究表明,源库关系影响Zn和Mn从茎叶向籽粒的相对运输率^[19]。

近20多年来,培育大穗、增大库容量是高产育种的一个主要趋势^[20~22],我国南方稻区的主栽晚粳稻品种在穗部形态上发生了明显的变化,即20世纪80年代初的长穗、着粒较稀、成熟时穗轴弯曲下垂的“散穗型”,逐步被穗长较短、着粒密度较大、穗型直立的“密穗型”所替代。密穗型品种一般表现为较高产量潜力^[23],但由于其穗颈粗而短,着粒密,穗部不同粒位间粒重的差异较大,而这种粒重的粒位间差异其本质上是由于灌浆特性不同造成的^[24]。Daniel和Ivan^[25]报道,小麦穗内不同粒位籽粒的Cu、Fe、Zn和Mn等微量元素含量差异明显,并与

粒重存在着一定相关性。可以推测,水稻穗内不同部位的籽粒重金属含量可能也有明显差异,密穗型水稻品种由于穗内不同粒位间的粒重差异较大,其重金属含量的差异可能也要大于散穗型品种。但迄今有关水稻穗部不同粒位稻米重金属含量的差异及其与粒重的关系,以及穗部不同着粒密度对粒位籽粒重金属含量差异的影响尚不明确。

本试验分别选用穗着粒密度差异较大的晚粳稻密穗型品种秀水63和散穗型品种秀水11,种植在受重金属轻度污染的土壤中,旨在研究明确:1)水稻粒重与籽粒As、Cd、Cr、Ni、Pb含量的粒位差异;2)籽粒中5种重金属含量的粒位差异与粒重粒位差异的关系;3)穗部不同粒位籽粒灌浆特性与籽粒中5种重金属含量的关系。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2001年在浙江省嘉兴市农业科学研究院试验农场进行。供试土壤为青紫泥,据土壤基础肥力测定,有机质含量26.2 g/kg,全氮2.41 g/kg,碱解氮199.3 mg/kg,速效磷24.5 mg/kg,速效钾138.6 mg/kg,pH 5.81,土壤重金属有效态(DTPA提取)含量如下: Cd, 0.062 mg/kg; Cr, 0.883 mg/kg; As, 0.130 mg/kg; Ni, 0.045 mg/kg; Pb, 2.283 mg/kg。供试材料,散穗型品种选择20世纪80年代中期至90年代初在浙江、江苏、上海等大面积推广种植的晚粳秀水11,密穗型品种选择近年来大面积种植的晚粳秀水63,两品种的穗部性状和产量表现见表1。随机区组试验,小区面积5.6 m×1.85 m,重复3次。5月29日播种,6月27日移栽,秧龄28 d。种子经线菌灵浸种,播种量450 kg/hm²,移栽密度23 cm×16 cm,每穴2~3本。总用肥量,N

表1 两供试水稻品种的经济性状

Table 1. Panicle traits and grain yield of the two tested rice varieties.

品种类型 ¹⁾	品种	总粒/穗 Total no. of	实粒数/穗 Filled no. of	穗长 Length of	穗着粒密度 Filled grain	产量 Grain yield
Varietal type ¹⁾	Variety	grains per panicle	grains per panicle	panicle/cm	density /(grains · cm ⁻¹)	/(kg · hm ⁻²)
密穗型 CP	秀水 63 Xiushui 63	111.63 aA	92.06 aA	15.36 bA	5.99 aA	8218.5 aA
散穗型 LP	秀水 11 Xiushui 11	85.50 bB	80.13 bB	18.98 aA	4.22 bB	7548.8 bB

¹⁾ CP, Compact panicle type rice; LP, Loose panicle type rice.

同一列中小写和大写字母不同者分别表示差异达显著和极显著水平。

Values followed by different lowercase and uppercase letters within a column represent significant difference at 5% and 1% level, respectively.

202.5 kg/hm², P₂O₅ 31.5 kg/hm², K₂O 187.5 kg/hm², 氮肥按基肥：分蘖肥：长粗肥：穗肥(质量比)为 2：1：1：1 的比例施用。其他管理同当地大田生产。

1.2 取样与测定

于抽穗期各小区选生长基本一致的穗约 200 个,挂牌标记,用于成熟期取样和灌浆期分期取样。成熟期每小区随机取标记稻穗 20 穗,于 60℃中烘 12 h,剔除空、秕粒,按不同穗位取样,取穗顶部 3 个一次枝梗上的籽粒,作为上位粒样本,取穗中部 3 个一次枝梗上的籽粒,作为中位粒样本;取穗基部 3 个一次枝梗上的籽粒,作为下位粒样本。另在成熟期各小区随机取 5 丛,混合脱粒,作为整穗样品,于 60℃烘箱中连续烘 48 h 至恒重,测定粒重。籽粒先脱成糙米,再碾成精米,80℃下烘 24 h,用不锈钢粉碎机粉碎成粉,过 100 目筛。每份样品准确称取 1.5000 g 左右,移入 30 mL 坩埚中,将样品置于马弗炉中 550℃灰化 10 h,冷却后加入 2 mL 1：1(体积比) HCl 使之充分溶解,用去离子水稀释至 25 mL,过滤后,用 ICP-AES (TJA, USA) 同时测定 Cd、Cr、As、Pb 和 Ni 含量。

为了比较穗部不同粒位籽粒重与重金属含量的差异,以中位粒为基准,计算上位粒和下位粒的相对变化率(Percentage of relative change, PRC)^[25,12]：

$$PRC = [(上位粒或下位粒的值 - 中位粒的值) / 中位粒的值] \times 100\%$$

1.3 灌浆特性分析

自齐穗后第 5 天起,每 3 d 从抽穗期挂牌标记的穗中随机取 10 个,先在 105℃下烘 1 h 杀青,随后于 60℃中烘 12 h,剔除空、秕粒,按上述方法选取不同粒位的籽粒。样本在 60℃烘箱中连续烘 48 h 至恒重,测定粒重,对所有取样稻谷脱壳,测定糙米重。

应用 Richards 方程按朱庆森等^[26]和顾世梁等^[27]的方法对籽粒灌浆过程进行拟合,并依顾世梁等^[27]的方法导出有关参数,对籽粒灌浆进行生长分析。

Richards 方程： $W = A(1 + be^{-kt})^{-m}$;

式中,W 为各期生长量,即糙米粒重(mg);t 为开花后天数(d);A 为生长终值量,即最大糙米粒重(mg);b 为初值参数;k 为生长速率参数;m 为形状参数。计算出灌浆特性参数。

统计分析和方程拟合计算应用唐启义和冯明光^[28]研制的 DPS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 粒重与籽粒中 5 种有毒重金属含量的品种和粒位效应

两品种的粒重存在显著差异,密穗型品种秀水 63 显著大于散穗型品种秀水 11,籽粒 Cd、Cr 和 Ni 含量品种间差异较小,As 含量秀水 63 显著高于秀水 11,而 Pb 含量恰好相反(表 2)。水稻穗部不同粒位籽粒重金属含量与粒重的差异因品种而异,秀水 63 粒重和籽粒 As、Cd、Cr、Pb 含量不同粒位间差异显著,秀水 11 的差异则不显著,籽粒 Ni 含量两品种粒位间均无显著差异(表 2)。从上、下位籽粒与中位籽粒间的相对变化率上看,两品种不同粒位粒重与籽粒重金属含量的变化趋势基本一致,但变异程度因品种和重金属种类存在差异(图 1)。粒重和 As、Cd、Ni 含量,上位籽粒高于中位籽粒,下位籽粒低于中位籽粒;籽粒 Cr、Pb 含量表现恰好相反,即上位籽粒较低而下位籽粒较高。除籽粒 Ni 含量外,秀水 63 上、下位籽粒的粒重和籽粒中 5 种重金属含量与中位籽粒的相对变化率差异均达显著水平,但秀水 11 上、下粒位与中位粒的相对差异较小。As、Cd、Pb 含量不同粒位间的差异相对较大,而 Cr、Ni

表 2 两品种穗部不同粒位的粒重和籽粒中的 As、Cd、Cr、Ni 和 Pb 含量

Table 2. Grain weight and As, Cd, Cr, Ni, Pb contents in the grains at different positions in a panicle for the two rice varieties.

粒重或重金属名称 Grain weight or heavy metal name	秀水 63 Xiushui 63				秀水 11 Xiushui 11				差异显著性 Significance	
	整穗 WPG	上位粒 TG	中位粒 MG	下位粒 BG	整穗 WPG	上位粒 TG	中位粒 MG	下位粒 BG	LSD _{0.05} (G)	LSD _{0.05} (P)
粒重 GW/(mg·grain ⁻¹)	27.14 b	28.82	27.53	22.98	29.67 a	30.46	30.01	29.26	1.896	0.940
As/(mg·kg ⁻¹)	0.108 a	0.122	0.104	0.081	0.079 b	0.081	0.080	0.077	0.014	0.008
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.083 a	0.099	0.080	0.062	0.075 a	0.087	0.077	0.072	0.075	0.025
Cr/(mg·kg ⁻¹)	0.391 a	0.363	0.388	0.449	0.448 a	0.418	0.423	0.430	0.152	0.109
Ni/(mg·kg ⁻¹)	0.621 a	0.677	0.607	0.575	0.489 a	0.495	0.492	0.479	0.152	0.109
Pb/(mg·kg ⁻¹)	0.064 b	0.060	0.066	0.081	0.133 a	0.130	0.138	0.147	0.019	0.018

LSD_{0.05} (G) — 基因型间比较; LSD_{0.05} (P) — 粒位间比较。
WPG, Whole grains in a panicle; TG, Top grains in a panicle; MG, Middle grains in a panicle; BG, Bottom grains in a panicle; GW, Grain weight; LSD_{0.05} (G), Comparison between genotypes; LSD_{0.05} (P), Comparison between grain positions.

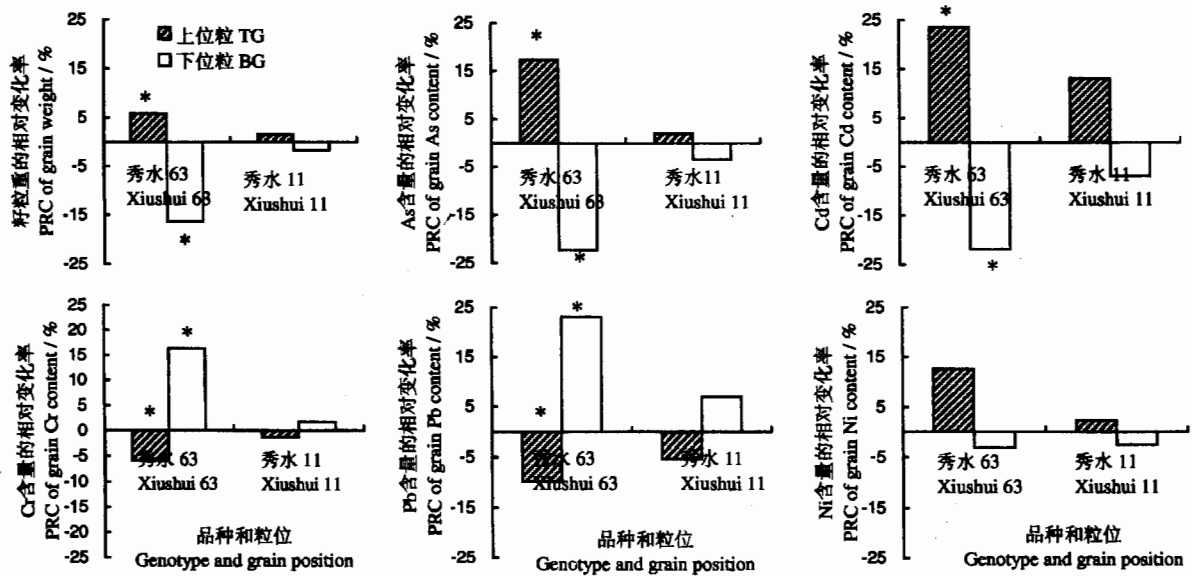


图1 水稻穗部上、下部籽粒重和Pb、As、Cd、Cr、Ni含量相对变化率

Fig. 1. PRC of grain weight, and Pb, As, Cd, Cr and Ni contents in the top grain(TG) and the bottom grain (BG) to the middle grain (MG) within a panicle of the two rice genotypes.

图中数据为3次重复平均值。*表示上位粒或下位粒与中位粒比较差异显著。

Values are the means of three replications. * indicates significant difference at 95% probability.

$PRC = [(Value\ of\ TG\ or\ BG - Value\ of\ MG) / Value\ of\ MG] \times 100\%$.

含量相对较小(图1)。

2.2 籽粒As、Cd、Cr、Ni、Pb含量的穗部粒位差异与粒重差异的相关性

回归分析结果表明,籽粒As、Cd、Ni含量的穗部粒位差异与粒重粒位差异呈极显著正相关,相关系数分别达0.9732、0.9482和0.7680,而稻米Cr和Pb含量的粒位差异与粒重差异呈极显著负相关,相关系数分别为-0.9990和-0.9829(图2)。这表明穗内不同粒位重金属含量差异与粒重差异是密切相关的,但其相关程度因重金属种类而异,As、Cd、Ni含量与粒重的变化趋势一致,即上位粒高于中位粒,下位粒最低,而Cr和Pb含量与粒重的变化趋势相反,即上位粒粒重的增加反而使Cr和Pb含量下降。

2.3 不同粒位籽粒灌浆特性及其与籽粒重金属含量的关系

2.3.1 不同粒位籽粒灌浆特性

籽粒灌浆特性反映了籽粒光合产物的积累特性。由表3可见,两品种虽都表现为上位粒的起始生长势(GR_0)、最大灌浆速率(GR_m)和平均灌浆速率(V_a)明显低于中、下位粒,且到达最大灌浆速率

时间(拐点时间, T_{poi})延迟,灌浆时间较长,但密穗型品种秀水63的这种粒位间差异明显大于散穗型品种秀水11。两品种比较,秀水63上、中位粒起始生长势和最大灌浆速率与秀水11相近,但其下位粒明显较低;秀水63三粒位籽粒的实际灌浆时间较秀水11短,最终平均粒重较低(表2)。上、下位粒最大灌浆时间(T_{poi})间隔反映了籽粒灌浆的同、异步性程度。由表3可知,秀水63上、下位粒到达最大灌浆速率时间(T_{poi})间隔约13 d,这主要是由于开始灌浆时不同粒位籽粒同时启动,但由于下位粒对灌浆物质的竞争处于劣势,这样在上、中位粒灌浆速率达到高峰前其灌浆过程明显受到抑制,而在上、中位粒的灌浆速率下降后,下位粒的灌浆速率才上升,表现为明显的异步灌浆型。秀水11则为同步灌浆型,上、下位粒间灌浆高峰时间差异较小,仅为4 d左右。

2.3.2 穗部不同粒位籽粒灌浆与籽粒中重金属含量的关系

相关分析结果表明,籽粒最大灌浆速率(GR_m)与粒重和籽粒As、Cd含量存在显著正相关,而与籽粒Cr、Pb含量呈极显著负相关;到达最大灌浆速率

表 3 密穗型品种秀水 63 与散穗型品种秀水 11 不同粒位籽粒的灌浆特征参数

Table 3. Grain filling parameters of different positioned grains of compact panicle type rice Xiushui 63 and loose panicle type rice Xiushui 11.

粒位 Grain position	起始势 GR_0 /($\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \text{d}^{-1}$)	最大灌浆速率 GR_m /($\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \text{d}^{-1}$)	拐点时间 T_{poi} /d	拐点干重 W_{poi} /($\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1}$)	实际灌浆时间 T_a /d	平均灌浆速率 V_a /($\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \text{d}^{-1}$)
秀水 63 Xiushui 63						
上位粒 TG	0.481(8.57)	1.264(20.50)	7.95(-8.41)	8.95(5.17)	39.72(-10.46)	0.584(17.03)
中位粒 MG	0.443(100.00)	1.049(100.00)	8.68(100.00)	8.51(100.00)	44.36(100.00)	0.499(100.00)
下位粒 BG	0.176(-60.27)	0.783(-25.36)	21.66(149.54)	12.16(42.89)	50.01(12.74)	0.404(-19.04)
秀水 11 Xiushui 11						
上位粒 TG	0.480(13.96)	1.003(14.50)	9.02(-13.68)	9.02(-0.22)	42.84(-13.03)	0.557(14.14)
中位粒 MG	0.413(100.00)	0.876(100.00)	10.45(100.00)	9.04(100.00)	49.26(100.00)	0.488(100.00)
下位粒 BG	0.235(-43.10)	0.897(2.40)	12.96(24.02)	9.01(-0.33)	58.29(18.33)	0.408(-16.39)

括号内数字为上、下粒位与中部粒位的比较值(%)。

GR_0 , Initial grain filling potential; GR_m , Maximum grain filling rate; T_{poi} , The time reaching the inflexion; W_{poi} , Grain weight at the inflexion; T_a , Active grain-filling period; V_a , Mean grain filling rate. The data in the parentheses are relative value(%) of top or bottom grains to middle ones.

时间(T_{poi})和籽粒 Cr、Pb 含量呈显著正相关,而与粒重呈显著负相关(表 4);籽粒 Ni 含量与籽粒灌浆特性参数的相关性较弱。以上结果说明,水稻籽粒灌浆特性影响籽粒重金属含量,其作用大小因重金属种类而异。成熟期粒重是籽粒中光合产物积累的最终表现,而本试验中粒重和籽粒 As、Cd 含量与籽粒最大灌浆速率呈显著的正相关,说明 As、Cd 进入籽粒与同化物积累可能是同步的,在灌浆前期有一

个快速积累的过程。与此相反,稻米 Cr、Pb 含量与籽粒最大灌浆速率(GR_m)呈显著负相关,与粒重变化趋势相反,揭示了 Cr、Pb 进入籽粒与同化物积累模式不同。

3 讨论

水稻穗内不同部位的颖花分化时间不同,一般穗上、中部的颖花分化早,成为强、中势花,而下部颖

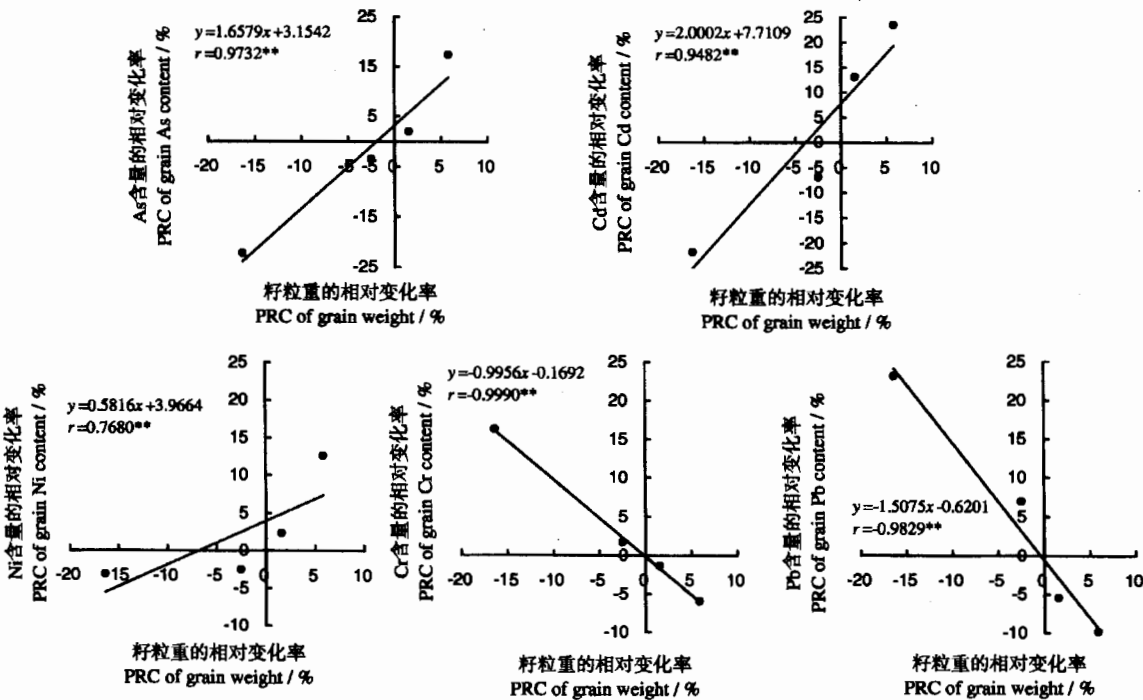


图 2 穗部上、下部籽粒粒重差异与 Pb、As、Cd、Cr、Ni 含量相对差异间的相关分析

Fig. 2. Correlations between percentage of relative change in grain weight and percentage of relative change in grain Pb, As, Cd, Cr and Ni contents at TG and BG from MG in a panicle for the two rice genotypes.

表4 穗部不同粒位籽粒灌浆特征参数与 Pb、As、Cd、Cr、Ni 含量的相关性

Table 4. Correlations between the grain—filling parameter and grain weight, Pb, As, Cd, Cr, Ni concentrations in rice grain of different positions within the panicle for two rice genotypes.

籽粒灌浆特性	粒重	Pb	As	Cd	Cr	Ni
Grain filling parameter	Grain weight					
GR_o	0.864	-0.942	0.836	0.929	-0.843	0.746
GR_m	0.997**	-0.990**	0.962*	0.958*	-0.992**	0.801
T_{poi}	-0.974*	0.948*	-0.894	-0.885	0.966*	-0.664
W_{poi}	-0.892	0.819	-0.771	-0.717	0.887	-0.472
T_a	-0.679	0.809	-0.697	-0.862	0.655	-0.716
V_a	0.827	-0.921	0.844	0.936	-0.811	0.826

花分化迟,成为弱势花^[29]。以往研究已表明,水稻茎秆中的维管束是光合产物、水分、矿物质等向穗部运输的通道,在“源、流、库”系统中行使“流”的功能,而同一穗上不同部位的颖花由于分化时间不同,维管束发育存在着差异,一般上、中部强势花的维管束数目、单个维管束面积、维管束总面积、韧皮部总面积、木质部总面积均明显高于下部弱势花,且这种差异因每穗颖花数的增加而增大^[30,31]。本研究表明,穗内不同粒位的籽粒灌浆模式存在差异,表现为下位粒灌浆速率较低,最终粒重较上、中位粒低,导致粒重有显著的粒位差异,而这种差异也与穗部着粒密度有关,着粒密度较高的密穗型品种秀水 63 明显大于着粒密度低的散穗型品种秀水 11。稻米重金属含量在穗内不同粒位间表现出很大差异,与粒重一样,密穗型品种秀水 63 粒位间的差异明显大于散穗型品种秀水 11。但这种差异也因重金属种类而异,As、Cd、Cr、Pb 含量差异显著,但 Ni 含量差异较小。Daniel 和 Ivan^[25]报道,小麦穗内不同粒位的籽粒 Cu、Fe、Zn 和 Mn 等微量元素含量与粒重呈显著的正相关,表现为穗上部粒重较大的籽粒具有较高的含量,而穗下部粒重较轻的籽粒含量也较低。本研究中,籽粒 As、Cd、Ni 含量,穗上位籽粒高于中位籽粒,而穗下位籽粒低于中位籽粒;籽粒 Cr、Pb 含量表现恰好相反,即上位籽粒较低,下位籽粒较高,说明重金属含量在穗不同粒位的变化趋势并不一致,因重金属种类而异。进而,本研究以籽粒着粒密度不同的两个粳稻品种为材料,发现稻米中几种重金属含量粒位差异与粒重粒位差异的关系因重金属种类不同存在着差异,As、Cd、Ni 含量与粒重呈正相关,而 Cr 和 Pb 含量与粒重呈负相关。这说明籽粒中 As、Cd、Ni 的积累与同化物积累具有相同或相近的模式,而 Cr 和 Pb 的积累模式与同化物积累模式不同。分析籽粒重金属含量与籽粒灌浆特性的关系表明,As、Cd、Ni 含量与最大灌浆速率呈正相关,与到达最大灌浆速率时间呈负相关,而 Cr 和 Pb

含量与以上两个籽粒灌浆特性参数的关系分别呈负相关和正相关。由此认为,籽粒中 As、Cd、Ni 等重金属的积累可能与同化物积累一样,在灌浆前期有一个明显的快速增长期,此时水稻根叶功能较强^[24,26,27],而 Cr 和 Pb 的积累速度较慢,且延续时间相对较长。就 Cr 和 Pb 而言,上位粒由于同化物积累相对较多,对这两种重金属的浓度产生了“稀释”作用,而同化物积累较少的下位粒这种“稀释”作用较小,从而造成籽粒中这两种重金属的含量相对较高。

土壤中的重金属被作物根系吸收进入植物体内后,主要通过两条途径进入籽粒,一是通过木质部随蒸腾流直接输送到籽粒,二是通过韧皮部与同化物一起从源(如功能叶)输送到库(籽粒),其中以后者为主^[32],在小麦上,通过韧皮部进入的重金属主要直接进入食用部位,而随木质部进入的重金属则主要积累于籽粒颖壳中^[17,33]。Stephan 和 Scholz^[34]研究认为作物籽粒中积累的一部分重金属来源于其他器官(包括颖壳)通过韧皮部的再转运。Liu 等^[35]研究了 20 个水稻品种籽粒 Pb 积累量的差异,发现大穗(库)品种由茎叶转运到籽粒的 Pb 较多。水稻随着灌浆进程,根、叶逐步衰老,根系吸收养分能力和功能叶光合能力下降,因而库较大的水稻随着根叶功能的下降其茎叶贮藏物质转运到籽粒的比例也增加^[36]。本研究结果表明,籽粒中 Cr 和 Pb 积累的速度较慢,且延续时间相对较长,因而,很有可能籽粒中这两种重金属来源于茎叶贮藏的比例也会相应增加,且其比例很有可能随着穗型的增大(如密穗型品种)而增加。

改善密穗型品种穗下部弱势粒的灌浆质量,是减少密穗型品种粒重和稻米品质的粒位间差异,从而提高整体品质和实现高产的重要途径^[23,24,37]。从本试验结果看,穗着粒密度大的密穗型品种秀水 63,穗内不同粒位的粒重差异较大,如改善下部粒位籽粒的灌浆质量,则在减小粒位间粒重差异的同时,

有可能会增加籽粒 As、Cd、Ni 含量,而降低籽粒 Cr、Pb 含量。很显然,对于受 Cr、Pb 污染的土壤,这种籽粒灌浆质量的改进显然是十分有利的。

参考文献:

- Grant C A, Buckley W T, Bailey L D, *et al.* Cadmium accumulation in crops. *Can J Plant Sci*, 1998, 78: 1—17.
- McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues. *Field Crops Res*, 1999, 60: 143—163.
- Farmer A A, Farmer A M. Concentration of cadmium, lead and zinc in livestock feed and organs around a metal production center in eastern Kazakhstan. *Sci & Total Environ*, 2000, 257: 53—60.
- Pichtel J, Kuroiwa K, Sawyerr H T, *et al.* Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites. *Environ Poll*, 2000, 110: 171—178.
- Nan Z, Li J, Zhang J, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. *Sci & Total Environ*, 2002, 285: 187—195.
- Sponza D, Karaoglu N. Environmental geochemistry and pollution studies of Aliaga metal industry district. *Environ Int*, 2002, 27: 541—553.
- Wang X C, Yan W D, An Z, *et al.* Status of trace elements in paddy soil and sediment in Taihu Lake region. *Chemosphere*, 2003, 50: 707—710.
- Codex Alimentarius Commission. Report of the thirty-second session of the Codex Committee on food Additives and Contaminants. Joint FAO/WHO Food Standards Programme, 20—24 March 2000, Beijing, People's Republic of China, 2000.
- Morishita T, Fumoto N, Yoshizawa T, Kagawa K. Varietal differences in cadmium levels of rice grains of japonica, indica, javanica and hybrid varieties produced in the same plot of a field. *Soil Sci Plant Nutri*, 1987, 33: 629—637.
- Shah K, Kumar R G, Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Sci*, 2001, 161: 1135—1144.
- Arao T, Ae N. Genotypic variation in cadmium levels of rice grain. *Soil Sci Plant Nutri*, 2003, 49(4): 473—479.
- Liu J G, Liang J S, Li K Q, *et al.* Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. *Chemosphere*, 2003, 52: 1467—1473.
- Wagner G J. Cadmium in crops and effects on human health. *Adv Agron*, 1993, 51: 173—212.
- Clarke J M, Norvell W A, Clarke F R, *et al.* Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can J Animal Sci*, 2002, 82: 27—33.
- Bencher M, Wörner A, Schubert S. Cd translocation into generative organs of linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Z Pflanzenern Bodenkunde*, 1997, 160: 505—510.
- Popelka J C, Schubert S, Schulz R, *et al.* Cadmium uptake and translocation during reproductive development of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Angewandte Botanik*, 1996, 70: 140—143.
- Herren T, Feller U. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat. *J Plant Nutri*, 1994, 17: 1587—1598.
- Hart J J, Welch R, Norvell W A, *et al.* Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol*, 1998, 116: 1413—1420.
- Pearson J N, Rengel Z. Uptake and distribution of ⁶⁵Zn and ⁵⁴Mn in wheat grown at sufficient and deficient levels of Zn and Mn. II. During grain development. *J Exp Bot*, 1995, 46: 841—845.
- Peng S, Cassman K G, Virmani S S, *et al.* Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Sci*, 1999, 39(11-12): 1552—1559.
- Chen W F, Xu Z J, Zhang W Z, *et al.* Creation of new plant type and breeding rice for super high yield. *Acta Agron Sin*, 2001, 27(5): 665—672.
- Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L. Spikelet numbers, sink size and potential yield in rice. *Field Crops Res*, 2001, 71: 77—85.
- 姚海根,姚坚,汤美玲,等.近20年来浙江省晚粳稻和晚糯稻品种推广应用概况及今后育种方向. *浙江农业科学*, 2000, (4): 155—159.
- 程旺大,张国平,姚海根,等.密穗型水稻品种的籽粒灌浆特性研究. *作物学报*, 2003, 29(6): 841—846.
- Daniel F C, Ivan O M. Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. *Crop Sci*, 2003, 43: 141—151.
- 朱庆森,曹显祖,骆亦其.水稻籽粒灌浆的生长分析. *作物学报*, 1988, 14(3): 182—192.
- 顾世梁,朱庆森,杨建昌,等.不同水稻材料籽粒灌浆特性的分析. *作物学报*, 2001, 27(1): 7—14.
- 唐启义,冯明光.实用统计分析及其DPS数据处理系统.北京:科学出版社,2002.
- 谢光辉,杨建昌,王志琴,等.水稻籽粒灌浆特性及其与籽粒生理活性的关系. *作物学报*, 2001, 27(5): 557—565.
- 马均,周开达.亚种间重穗型杂交稻穗颈维管束与穗部性状的关系. *西南农业学报*, 2001, 14(3): 1—5.
- 徐正进,陈温福,曹洪任,等.水稻穗颈维管束数与穗部性状关系的研究. *作物学报*, 1998, 24(1): 47—54.
- Maria G, Martina L. Comparison of uptake and distribution of cadmium in different cultivars of bread and durum wheat. *Crop Sci*, 2004, 44: 501—507.
- Feller U. Transfer of rubidium from the xylem to phloem in wheat internodes. *J Plant Physiol*, 1989, 133: 764—767.
- Stephan U, Scholz G. Nicotianamine: mediator of transport of iron and heavy metals in the phloem? *Plant Physiol*, 1993, 88: 522—529.
- Liu J G, Li K Q, Xu J K, *et al.* Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars. *Plant Sci*, 2003, 165: 793—802.
- Cheng W D, Zhang G P, Yao H G, *et al.* Nutrient accumulation and utilization in rice under film-mulched and flooded cultivation. *J Plant Nutri*, 2003, 26(12): 2489—2501.
- Cheng W D, Zhang G P, Zhao G P, *et al.* Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management. *Field Crops Res*, 2003, 80(3): 245—252.