

# 野生二粒小麦籽粒含硒量的差异分析

张翠炫<sup>1</sup>, 严俊<sup>1,2</sup>, 程剑平<sup>1\*</sup>, 秦海波<sup>3</sup>, 陈国雄<sup>4</sup>, T. FAHIMA<sup>2</sup>

(1. 贵州大学麦作研究中心, 贵阳 550025; 2. 海法大学进化研究所, 以色列 海法 31905; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**采用氢化物-原子荧光法, 对种植于黔中的来自以色列 15 个野生二粒小麦群体 110 个基因型籽粒含硒量进行检测分析。结果表明, 15 个群体含硒量差异极显著( $P \leq 0.001$ ); 110 个基因型籽粒硒含量和单粒硒含量分别为  $0.043 \sim 0.409 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $0.008 \sim 0.125 \text{ mg seed}^{-1}$ , 平均值分别为  $0.180 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $0.046 \text{ mg seed}^{-1}$ 。籽粒硒含量和单粒硒含量最低的基因型分别是 Gamla 群体的 TZ120 和 Mt. Hermon 群体的 TZ8, 最高的基因型分别为 Bat-Shelomo 群体的 TZ36 和 TZ34。在群体水平上硒浓度差异明显, 变异系数 CV 为 9% ~ 74%; 斯皮尔曼秩相关分析表明, 籽粒硒含量分别与该群体起源地海拔、年平均降雨量、平均干旱天数呈显著负相关, 与年均温、8 月均温、1 月均温呈显著正相关。单粒硒含量的相关分析与籽粒硒含量的相似。野生二粒小麦籽粒含硒量的差异是长期适应环境的结果, 其遗传多样性将为小麦硒营养机理研究和育种利用提供材料。

**关键词:**以色列; 野生二粒小麦; 籽粒硒含量; 单粒硒含量; 生态地理因素

中图分类号: Q946.911

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2009)03-0229-08

## Variance Analysis of Grain Selenium Contents in Wild Emmer Wheat, *Triticum dicocoides*

ZHANG Cui-xuan<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1,2</sup>, CHENG Jian-ping<sup>1\*</sup>, QIN Hai-bo<sup>3</sup>, CHEN Guo-xiong<sup>4</sup>, T. FAHIMA<sup>2</sup>

(1. Institute of Triticeae Crops, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Evolution, University of Haifa, Haifa, 31905, Israel;

3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The grain selenium (Se) contents of 110 genotypes of the tetraploid wild progenitor of wheat (*Triticum dicocoides*) originating from 15 populations in Israel were detected by hydride generation atomic fluorescence spectrometry (HG-AFS). The results showed that there were significant differences of grain Se content among populations by one way ANOVA ( $P \leq 0.001$ ). Grain Se concentration (GSeC) and grain Se content among the 110 wild emmer wheat genotypes varied from  $0.043$  to  $0.409 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $0.008$  to  $0.125 \text{ mg seed}^{-1}$ , with the average of  $0.180 \text{ mg kg}^{-1}$  and  $0.046 \text{ mg per seed}$ , respectively. The highest genotypes of GSeC and grain Se content were TZ36 and TZ34, both derived from Bat-Shelomo population, while the lowest genotypes were TZ120 from Gamla and TZ8 from Mt. Hermon, respectively. The coefficient of variation of GSeC among populations also was obviously different, ranged from 9% (Bat-Shelomo) to 74% (Givat-Koach). According to Spearman's Rho Correlation analysis, the GSeC had significant negative relationships with altitude, mean annual rainfall, mean number of dry days in original area, and positive relationships with mean annual temperature, mean temperature in August, mean temperature in January and soil types, respectively. The grain Se content had similar tendency of GSeC. These demonstrated that natural selection has created abundant phenotypes of grain Se content in this wild species, and would be used for identification of novel genotypes or genetic studies on wheat mineral nutrition.

收稿日期: 2008-10-10 接受日期: 2009-01-18

基金项目: 贵州省国际合作重点项目(黔科合外 G 字(20064)001020); 贵州省“十一五”重点攻关项目(黔科合 NY(2006)3002F); 贵州省第六批优秀青年科技人才培养计划资助

\* 通讯作者 Corresponding author

**Key words:** Israel; Wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides*); Grain Se concentration; Grain Se content; Ecogeographic factors

1973 年世界卫生组织专家委员会正式宣布, 硒是人体生理必需的微量元素之一<sup>[1]</sup>。硒参与人体内多种内分泌代谢活动, 对于防治甲状腺增生、糖尿病, 增强生育能力有重要意义。硒可以保护细胞膜的结构和功能免遭强氧化剂的破坏, 具有抗癌、防心血管病和延缓衰老的作用。研究表明, 癌症的死亡率与那些地区主食的硒含量成明显的负相关。缺硒会导致克山病、大骨节病和动物白肌病的发生<sup>[2]</sup>。世界上有 40 多个国家的土壤中缺硒<sup>[3]</sup>。我国是世界上严重缺硒的国家之一, 有 70% 以上地区缺硒<sup>[4]</sup>。中国成人每日的硒摄入量仅为 26.63  $\mu\text{g}$ , 距中国营养学会和国际硒学会推荐日摄入量 50  $\mu\text{g}$  和 60  $\mu\text{g}$  相差甚远。

人和动物体内的硒来源于土壤, 并在土壤-植物-动物和人之间循环着。食物中硒含量与人和动物体内硒含量直接相关。尽管食物中的硒主要由土壤硒含量决定, 但是根据特点种类不同仍然有些食物硒含量高于其他<sup>[5]</sup>。饮食中肉蛋类硒含量较高, 豆类谷物其次, 蔬菜水果较少<sup>[3]</sup>。不同食物中硒的生物有效性不同, Moser-Veillon 等<sup>[6]</sup>和 van Dael 等<sup>[7]</sup>研究表明, 硒代蛋氨酸和硒酸盐的吸收效率(大约 73%~93%)要高于亚硒酸盐。植物性食物硒生物有效性高于动物性食物硒的生物有效性<sup>[8]</sup>。发展中国家人的主食是谷类, 因此, 提高谷类的硒含量是解决人体硒摄入不足的策略之一。目前高硒水稻已经进入市场, 而小麦在世界大多数区域为人畜重要稳定的食粮, 在我国的种植面积与产量仅次于水稻居第二位, 而一般栽培小麦的硒含量较低, 但小麦硒是一种生物有效性最高的形式之一<sup>[9]</sup>, 因此高硒小麦的培育开发意义重大。

野生二粒小麦(*Triticum dicoccoides*,  $2n = 4x = 28\text{AABB}$ )是普通小麦(*T. aestivum*,  $2n = 6x = 42$ ,  $\text{AABBDD}$ )的野生四倍体祖先<sup>[10]</sup>, 其遗传多样性中心为始于大约一万年以前近东地区的“新月沃土地带”, 包括以色列、土耳其、伊朗、叙利亚等国<sup>[11]</sup>。野生二粒小麦含有丰富的抗性资源, 如抗病、抗旱、抗盐、抗穗发芽以及高蛋白质含量与矿质养分高效利用基因等, 而被广泛用于资源研究和现代小麦品种的遗传改良<sup>[12-15]</sup>。Cakmak 等<sup>[15]</sup>报道野生二粒小麦籽粒的锌和铁含量分别是 14~190  $\text{mg kg}^{-1}$  DW

和 15~109  $\text{mg kg}^{-1}$ 。野生二粒小麦丰富的微量元素遗传多样性和高含量基因资源已备受关注, 已被国际生物强化计划(Harvest Plus)作为基因渗入培育高微量元素栽培小麦的重要基因材料(<http://www.harvestplus.org>), 但迄今关于野生二粒小麦籽粒含硒量的研究鲜见报道。本研究旨在探索源自不同地区野生二粒小麦籽粒含硒量的遗传多样性及与起源环境的关系, 为进一步研究硒营养遗传机理和育种提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

15 个以色列野生二粒小麦群体的 110 个基因型籽粒于 2006 年 10 月底种植于黔中(纬度  $26^{\circ}25'$ , 经度  $106^{\circ}40'$ , 海拔 1 096 m), 2007 年 5~6 月收获。这些材料来自于以色列 Haifa 大学进化研究所野生二粒小麦基因库, 其起源地的生态地理数据见表 1。

选取来自贵州的贵农 6 号、河南的郑 9023 和欧洲的 Langdon 栽培小麦(*Triticum durum*)作对照。每个基因型和品种样品设 3 个重复。

### 1.2 小麦籽粒含硒量检测

籽粒含硒量分别由籽粒硒含量( $\text{mg kg}^{-1}$ )和单粒硒含量( $\text{mg seed}^{-1}$ )表示。

采用氢化物-原子荧光法(HG-AFS)测定样品中的硒。用去离子水将小麦籽粒清洗干净, 烘干, 称重, 计算单粒重, 粉碎, 过 100 目筛, 放于干燥器待测。将样品放入  $80^{\circ}\text{C}$  烘箱烘至恒重, 每种样品称量 0.10 g 放于聚四氟乙烯消解罐中, 每罐加 3 ml 优级纯硝酸, 放置 2~3 h, 然后放入烘箱于  $145^{\circ}\text{C}$  高压密闭 7~8 h, 取出, 冷却, 每样品加 2 ml 优级纯过氧化氢于电热板上  $80^{\circ}\text{C}$  加热至蒸干, 然后每个样品加 3 ml 5 mol/L 盐酸溶解还原后转移至 25 ml 比色管中, 最后将溶液  $90^{\circ}\text{C}$  水浴 90 min 后定容 20 ml 待测<sup>[16]</sup>。

本次实验中, 测定样品含硒量使用标准物质、平行样品、空白样品进行质量保证和质量控制(QA/QC)。使用标准参考物质 GSV-1(推荐值  $0.184 \pm 0.01 \text{mg kg}^{-1}$ )重复测定, 测定结果是  $0.181 \pm 0.01 \text{mg kg}^{-1}$ , 测定值与标准参考值吻合较好, 准确

表1 15个以色列野生二粒小麦群体起源地的生态地理数据  
Table 1 Ecogeographical data of original areas of 15 *T. dicoccoides* populations in Israel

编号 No.	群体 Population	Ln	Lt	Al	Tm	Ta	Tj	Td	Tdd	Rn	Rd	Hu14	Huan	Dw	Sh	Trd	Ev	So	Rv	Rr
1	Mt. Hermon	35.73	33.30	1300	11	21	3	18	6	1400	66	48	60	60	80	0	150	t.r.	30	20
8	Gamla	35.74	32.88	200	19	26	9	17	12	470	50	43	58	58	50	60	155	B	39	26
9	Rosh Pina	35.52	32.95	700	18	25	9	16	10	697	50	48	58	50	75	35	150	t.r.	35	22
11	Tabgha	35.53	32.90	0	24	32	15	17	10	436	45	45	57	58	60	120	160	B	39	25
16	Gilboa	35.42	32.50	150	21	28	12	16	12	400	44	43	58	40	60	160	165	t.r.	34	24
17	Gertzim	35.28	32.20	800	17	23	8	15	9	700	47	45	60	42	-	0	155	t.r.	38	25
18	Grit	35.40	32.10	300	21	29	13	16	12	360	39	39	55	25	-	100	170	t.r.	38	24
19	Kokhav Hashahar	35.34	31.95	600	20	28	12	16	12	400	40	45	59	30	80	25	165	t.r.	38	22
23	Jabba	35.40	32.10	300	21	29	13	16	12	360	39	39	55	25	-	100	170	t.r.	38	24
24	Amirith	35.45	32.93	600	15	24	8	16	8	850	61	48	60	53	85	13	153	t.r.	35	23
28	Beit-Oren	35.03	32.73	400	17	24	11	13	8	700	55	59	69	80	41	0	142	t.r.	25	19
30	Bat-Shelomo	35.02	32.60	75	20	26	13	13	10	650	55	58	68	77	40	30	150	R	24	20
33	Givat-Koach	34.92	32.03	75	20	26	12	14	12	540	46	50	64	65	42	105	160	t.r.	32	26
34	Tabgha (T)	35.53	32.90	0	24	32	15	17	10	436	45	45	57	58	60	120	160	B	39	25
35	Bassaut (B)	35.53	32.90	0	24	32	15	17	10	436	45	45	57	58	60	120	160	t.r.	39	25

群体编号和表中数据取自文献[25]。Population No. and data cited from reference [25]. Ln: 经度 Longitude; Lt: 纬度 Latitude; Al: 海拔 Altitude (m); Tm: 年均温 Mean annual temperature (°C); Ta: 8月均温 Mean temperature in August (°C); Tj: 1月均温 Mean temperature in January (°C); Td: 季节温差 Seasonal temperature difference (°C); Tdd: 昼夜温差 Day-night temperature difference (°C); Trd: 湿热天数 Days of moist heat; Rn: 年均降雨量 Mean annual rainfall (mm); Rd: 降雨天数 Days of rainy; Huan: 年相对湿度 Mean annual humidity (%); Hu14: 14:00 相对湿度 Humidity at 14:00; Dw: 夏季夜间结露数 Number of dew nights in summer; Ev: 年均蒸发量 Mean annual evaporation; Rv: 降雨年际变率 Mean interannual variability of rainfall; Rt: 降雨的相对变率 Mean relative variability of rainfall; Sh: 干旱天数 Days of drought; So: 土壤类型 Soil type; t.r.: 红色石灰土 Terra rossa; R: 腐殖质碳酸盐 Rendzina; B: 玄武岩 Basalt.

度高。每 5 个样品穿插一个平行样品,平行样品间硒含量重现性好,变异系数在 0.7%~23%,精密程度大于 93%。空白样测试结果低于检出限。因此,本次实验测试数据可靠。

### 1.3 统计分析

用 JMP6.0 统计软件(SAS Institute)进行单因素方差分析(One-Way ANOVA);Tukey-Kramer HSD 检定群体间的统计显著差异性( $P < 0.05$ );斯皮尔曼秩相关(Spearman's Rho Correlation)分析籽粒含硒量与其起源地生态地理因素的多元相关性,皮尔森相关(Pearson Correlation)分析籽粒硒含量和单粒硒含量的相关性。

## 2 结果和分析

### 2.1 野生二粒小麦籽粒含硒量及其与栽培小麦的比较

野生二粒小麦籽粒硒含量和单粒硒含量的皮尔森相关分析显示,两者呈极显著正相关( $r = 0.8487, P \leq 0.0001$ )。由表 2 可知,来自以色列的野生二粒小麦 15 个群体 110 个基因型籽粒硒含量为 0.043~0.409 mg kg<sup>-1</sup>,平均 0.180 mg kg<sup>-1</sup>,最低的基因型是来自 Gamla 群体的 TZ120,最高的是来自

Bat-Shelomo 群体的 TZ36,而且该群体的 8 个基因型的籽粒硒含量较高,平均为 0.3507 mg kg<sup>-1</sup>;相反,Mt. Hermon 群体的籽粒硒含量较低,平均为 0.093 mg kg<sup>-1</sup>。野生二粒小麦单粒硒含量为 0.008~0.125 mg seed<sup>-1</sup>,平均 0.0463 mg seed<sup>-1</sup>,最低的基因型是来自 Mt. Hermon 群体的 TZ8,最高的是来自 Bat-Shelomo 群体的 TZ34。

栽培小麦中贵农 6 号、郑 9023 和 Langdon 的籽粒硒含量分别为 0.041、0.071 和 0.067 mg kg<sup>-1</sup>,单粒硒含量分别为 0.016、0.030 和 0.035 mg seed<sup>-1</sup>,比野生二粒小麦的籽粒含硒量低,品种间的差异不显著。

### 2.2 野生二粒小麦籽粒含硒量差异

110 个基因型的籽粒硒含量差异很大(表 2,图 1A),最高的 TZ36 是最低的 TZ120 的 9.5 倍,15 个群体间籽粒硒含量的单因素方差分析达到极显著差异( $P \leq 0.0001$ )。群体内各基因型籽粒硒含量差异也较大,变异系数 CV 在 9%~74% 之间。Bat-Shelomo 群体内的变异系数为 9%,即此群体内 10 个基因型的籽粒硒含量相近,且比其他群体的基因型高。差异最大的是群体 Givat-Koach, CV 为 74%,10 个基因型中最高的(TZ97)是最低的(TZ90)6 倍。

表 2 小麦籽粒硒含量及单粒硒含量

Table 2 The grain Se concentration and grain Se content in 15 *T. dicoccoides* populations and three cultivars

编号 No.	群体 Population	样品数 Samples	籽粒硒含量 Grain Se concentration (mg kg <sup>-1</sup> )			单粒硒含量 Grain Se content (mg seed <sup>-1</sup> )		
			Mean ± S.E.	范围 Range	变异系 数 CV	Mean ± S.E.	范围 Range	变异系 数 CV
1	Mt. Hermon	7	0.093 ± 0.046	0.063 ~ 0.193	49	0.017 ± 0.013	0.008 ~ 0.043	75
8	Gamla	9	0.178 ± 0.101	0.043 ~ 0.349	57	0.037 ± 0.026	0.014 ~ 0.071	70
9	Rosh Pina	10	0.117 ± 0.050	0.051 ~ 0.208	43	0.031 ± 0.010	0.020 ~ 0.047	33
11	Tabigha	10	0.203 ± 0.058	0.113 ~ 0.316	28	0.049 ± 0.012	0.048 ~ 0.094	25
16	Gilboa	6	0.252 ± 0.070	0.169 ~ 0.353	28	0.071 ± 0.028	0.048 ~ 0.094	39
17	Gerizim	9	0.191 ± 0.072	0.071 ~ 0.280	38	0.052 ± 0.024	0.012 ~ 0.082	46
18	Gitit	8	0.279 ± 0.121	0.084 ~ 0.406	43	0.066 ± 0.033	0.016 ~ 0.104	50
19	Kokhav-Hashahar	5	0.114 ± 0.079	0.068 ~ 0.254	69	0.041 ± 0.030	0.010 ~ 0.082	75
23	Jabba	10	0.173 ± 0.108	0.054 ~ 0.319	62	0.036 ± 0.032	0.010 ~ 0.102	90
24	Amirim	8	0.205 ± 0.039	0.169 ~ 0.287	19	0.062 ± 0.017	0.034 ~ 0.094	28
28	Beit-Oren	7	0.146 ± 0.050	0.069 ~ 0.208	34	0.036 ± 0.019	0.014 ~ 0.059	52
30	Bat-Shelomo	8	0.351 ± 0.034	0.312 ~ 0.409	9	0.071 ± 0.024	0.049 ~ 0.125	33
33	Givat-Koach	10	0.120 ± 0.090	0.056 ~ 0.335	74	0.029 ± 0.020	0.011 ~ 0.082	71
34	Tabigha (T)	3	0.168 ± 0.106	0.101 ~ 0.289	63	0.061 ± 0.051	0.028 ~ 0.119	84
35	Bassaut (B)	3	0.113 ± 0.036	0.085 ~ 0.153	32	0.037 ± 0.006	0.031 ~ 0.043	17
C1	Langdon	3	0.067 ± 0.003	-	-	0.034 ± 0.010	-	-
C2	贵农 6 号 Guinong 6	3	0.041 ± 0.006	-	-	0.016 ± 0.006	-	-
C3	郑 9023 Zheng 9023	3	0.071 ± 0.011	-	-	0.030 ± 0.010	-	-

单粒硒含量差异同样显著(表2,图1B),最高的TZ34是最低的TZ8的15.6倍;单因素方差分析,15个群体间差异也达极显著( $P=0.0005$ ),而群体内各基因型的单粒硒含量的差异亦较大,变异系数CV在17%~90%之间。

### 2.3 野生二粒小麦籽粒含硒量与生态地理因素的相关性

表3显示,野生二粒小麦的籽粒硒含量与其起源地的19个生态地理因素中的7个有显著相关性( $P<0.05$ ),即与海拔、年降雨量和干旱天数呈显著负相关,而与年平均温度、8月均温、1月均温呈显著正相关。单粒硒含量也与海拔、年平均温度、8月均温和1月均温相关,与海拔呈负相关,与后三者呈正相关。表4显示,不同的土壤类型也影响籽粒含硒量,对腐殖质碳酸盐土、玄武岩和红色石灰土3种土壤类型上生长的不同基因型野生二粒小麦的籽粒硒含量进行方差分析,均达到显著差异( $P<0.05$ ),来源于腐殖质碳酸盐土的小麦籽粒含硒量最高,玄武岩次之,红色石灰土最低。

## 3 讨论

世界各国谷类含硒量一般在0.04~0.07 mg kg<sup>-1</sup>之间<sup>[17]</sup>,中国不同地区粮食的含硒量不同,如

山西晋南山地丘陵的玉米(*Zea mays*)、小麦含硒量分别为0.092、0.067 mg kg<sup>-1</sup>,而汾河平原的分别为0.265、0.405 mg kg<sup>-1</sup>;四川川西山地的分别为0.091、0.097 mg kg<sup>-1</sup>;成都平原的则分别为0.230、0.192 mg kg<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>,赵锁劳等<sup>[19]</sup>用微波消解法测量了陕西5个小麦品种的硒含量为0.022~0.039 mg kg<sup>-1</sup>,本实验栽培小麦分别为0.0413、0.0708和0.0671 mg kg<sup>-1</sup>,而野生二粒小麦的在0.043~0.409 mg kg<sup>-1</sup>之间,平均为0.180 mg kg<sup>-1</sup>,比一般栽培小麦高、且变化范围广,在群体间及群体内存在显著差异(表2,图1)。野生二粒小麦各群体的籽粒硒含量与单粒硒含量呈显著正相关,二者与起源地的环境因子的相关性相似,表明籽粒大小并不影响野生二粒小麦硒营养。本研究中15个群体的110个基因型在黔中的生长繁育条件相同,单粒硒含量的差异性体现了野生二粒小麦长期适应其原生长环境而进化产生的遗传多样性,反映了控制和调节硒含量基因的存在,是基因渗入改良栽培品种硒含量的理想材料。

在本研究中,野生二粒小麦硒含量与其起源地的生态地理环境密切相关。水分、温度、海拔和土壤类型与单粒硒含量都有密切相关,对其调节硒含量基因的表达起着重要作用。通常植物中的硒含

表3 籽粒硒含量和单粒硒含量与起源地生态地理因素的相关性

Table 3 The correlation between GSeC and grain Se content and ecogeographical data of original area

	Al	Tm	Ta	Tj	Rn	Sh
籽粒硒含量 GSeC	-0.306*	0.277*	0.260*	0.304*	-0.211*	-0.223*
单粒硒含量 Grain Se content	-0.219*	0.210*	0.198*	0.205*	n.s.	n.s.

\*:  $P<0.05$ ; n.s.: 无显著相关性 No significant correlation; Al、Tm、Ta、Tj、Rn 和 Sh 见表1。Al, Tm, Ta, Tj, Rn and Sh see Table 1.

表4 土壤类型与野生二粒小麦籽粒硒含量和单粒硒含量的关系

Table 4 GSeC and grain Se content of *T. dococoides* grown on different soil types

土壤类型 Soil type	群体 Populations	籽粒硒含量 Grain Se concentration (mg kg <sup>-1</sup> )		单粒硒含量 Grain Se concent (mg seed <sup>-1</sup> )	
		Mean ± S.E.	范围 Range	Mean ± S.E.	范围 Range
红色石灰土 Terra rossa	Mt. Hermon、Rosh Pina、 Tabigha、Bassaut (B)、 Gerizim、Gitit、Kokhav- Hashahar、Jabba、Beit-Oren、 Givat-Koach、Gilboa	0.164 ± 0.06b	0.093 ~ 0.279	0.042 ± 0.01b	0.017 ~ 0.071
玄武岩 Basalt	Gamla、Amirim、Tabigha (T)	0.184 ± 0.02b	0.168 ~ 0.205	0.053 ± 0.01ab	0.037 ~ 0.062
腐殖质碳酸盐土 Rendzina	Bat-Shelomo	0.351a	-	0.071a	-
方差分析 ANOVA		$P \leq 0.0001$			$P = 0.0109$

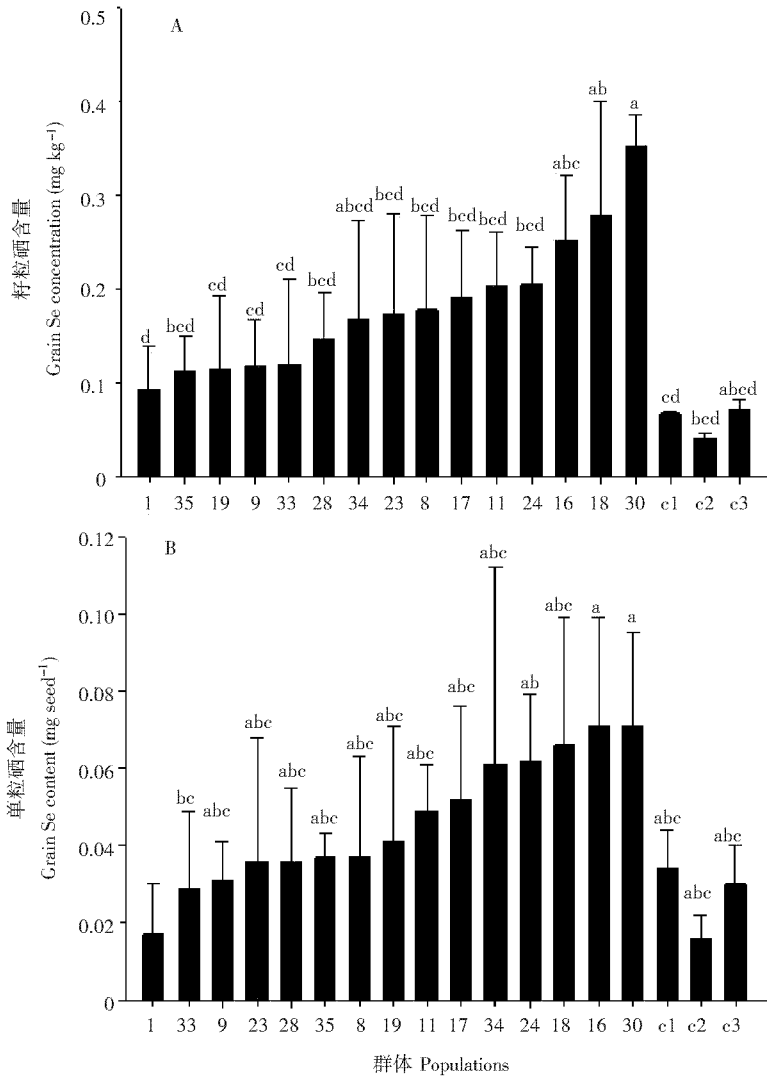


图 1 小麦的籽粒硒含量(A)和单粒硒含量(B)的比较

Fig. 1 Comparison of GSeC (A) and grain Se content (B) in 15 *T. dococcides* populations and three cultivars

柱上不同字母表示 Tukey-Kramer HSD 检定群体间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 群体编号见表 2。Different letters above bars indicate significant differences at 0.05 level by Tukey-Kramer HSD test. Population No. see Table 2.

量与土壤硒含量成正相关, 同时受植物种类、生长阶段和环境因素的影响<sup>[20]</sup>。本研究表明, 起源地的温度与野生小麦籽粒含硒量呈正相关, 温度高可促进小麦生长, 提高根系活力, 增加了土壤硒的有效性, 有利于小麦对硒的吸收, 从而提高小麦籽粒含硒量。本研究 110 个基因型分别发育于腐殖质碳酸盐土, 玄武岩和红色石灰土, 3 种土壤类型上的小麦籽粒含硒量达到显著差异, 以腐殖质碳酸盐土最高, 玄武岩次之, 红色石灰土最低。这表明起源地土壤类型与小麦籽粒积累硒有着密切关系。土壤中的硒含量主要取决于土壤母质, 由火成岩风化形成的土壤可能富含硒, 如夏威夷某些来源于玄武岩的土壤含硒量可达  $6 \sim 15 \text{ mg kg}^{-1}$ <sup>[21]</sup>。迟凤琴认

为沉积岩发育的土壤含硒量较高, 岩浆岩相对较少, 并且气候和地形也影响土壤硒含量, 湿润地区淋溶作用强, 土壤含硒低, 而干旱和半干旱地区由于风化产物中硒酸盐、亚硒酸盐极少流失, 因而高于湿润地区<sup>[20,22]</sup>。如起源地年降雨量最高的 Mt. Hermon 群体的籽粒含硒量最低, 而年降雨量较低地区的 Gitit、Tabigha 和 Bat-Shelomo 群体, 其籽粒含硒量较高(表 1, 2)。以色列野生二粒小麦与野生二棱大麦 (*Hordeum spontaneum*) 和二穗短柄草 (*Brochypodium distachyon*) 等一样, 从以色列湿润的北部山地到极端干旱的南部内盖夫沙漠以北均有分布, 它们长期生长在不同的环境条件下, 在自然选择压力的推动下, 产生了丰富的遗传多样

性<sup>[11,23-26]</sup>,籽粒的矿质元素含量也不同。因此起源地环境对其含硒量有决定性的影响。另外,野生二粒小麦遗传多样性与当年种植环境的互作也有待于进一步研究。

当前富硒小麦、抗蚜虫转基因小麦、高蛋白小麦和一年多熟小麦的发展前景被看好,富硒小麦尤其被关注。目前采用富硒增产素培育的富硒小麦已经在国内部分地区推广,如绿麦1号<sup>[27]</sup>、黑粒小麦76号<sup>[28]</sup>等,并且销售状况良好。这不失为补硒的好办法,但不能从根本上解决缺硒的问题,且不具有持久性,然而运用分子辅助方法培育高硒小麦安全可行,因此寻找高硒小麦野生资源刻不容缓。现代育种实践证明按照人类意愿培育的以高产为目标的现代栽培品种正逐渐丢失其长期演化形成的遗传多样性,即产生所谓的遗传均质化现象<sup>[23]</sup>。生长在环境多样的野生二粒小麦籽粒含硒量水平参差不齐,遗传基础宽广,不仅可以作为很好的基因资源用于培育高硒小麦新品种,而且对研究小麦硒营养机理和进化规律具有重要的意义。

**致谢** 本研究实验分析在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行,特此感谢!对参加田间栽培实验的贵州大学潘周云、薛文韬、何跃、钟桂香和王兴梅等同学致谢!

## 参考文献

- [1] Dai W(戴伟), Geng Z C(耿增超). The present situation of the study on selenium in soil [J]. J NW For Coll(西北林学院学报), 1995, 10(3): 93-97.(in Chinese)
- [2] Wu W Z(吴万征), Wu Z(吴忠). Relationship between selenium and human's health [J]. Guangdong Trace Elem Sci(广东微量元素科学), 2000, 7(11): 7-11.(in Chinese)
- [3] Wang H H(王海红), Song J Y(宋家永), Zhou X X(朱喜霞), et al. General survey on physiological function of selenium in wheat [J]. Chin Agri Sci Bull(中国农学通报), 2007, 23(9): 335-338.(in Chinese)
- [4] Xu H B(徐辉碧). Selenium Chemistry and Biochemistry and the Application to Life Science [M]. Wuhan: East China University of Science and Technology Press, 1994: 104-194.(in Chinese)
- [5] Combs G F Jr, Combs S B. Selenium in foods and feeds [M]// Combs G F Jr, Combs S B. The Role of Selenium in Nutrition. Orlando, FL: Academic Press, 1986: 41-126.
- [6] Moser-Veillon P B, Mangeb A R, Patterson K Y, et al. Utilization of two different chemical forms of Se during lactation using stable isotope tracers: An example of speciation in nutrition [J]. Analyst, 1992, 117: 559-562.
- [7] Van Dael P, Davidsson L, Ziegler E E, et al. Comparison of selenite and selenate apparent absorption and retention in infants using stable isotope methodology [J]. Pediatr Res, 2002, 51: 71-75.
- [8] Bugel S, Sandstrom B, Larsen E H, et al. Is selenium from animal sources bioavailable? [C]// 11th Symposium on Trace Elements in Man and Animals, 2~6 June 2002. Berkeley CA: Trace Elements in Man and Animals Committee, 2002: 235-249.
- [9] Hakkarainen J. Bioavailability of selenium [J]. Norwegian J Agri Sci, 1993, 11: 21-35.
- [10] Zohary D. Wild genetic-resources of crops in Israel [J]. Israel J Bot, 1983, 32(2): 97-127.
- [11] Nevo E. Genetic resources of wild emmer, *Triticum dicoccoides*, for wheat improvement in the third millennium, Israel [J]. J Plant Sci, 2000(49): 77-91.
- [12] Shi J X(时津霞), Qiao Y L(乔永利), Yang Q W(杨庆文), et al. Evaluation of salt tolerance for wild emmer (*Triticum dicoccoides*) from Israel [J]. J Plant Genet Resour(植物遗传资源学报), 2004, 5(4): 369-373.(in Chinese)
- [13] Uauy C, Distelfeld A, Fahima T, et al. A *NAC* gene regulating senescence improves grain protein, Zinc, and Iron content in wheat [J]. Science, 2006, 314: 1298-1301.
- [14] Cheng J P(程剑平), Yan J(严俊), Gutterman Y. Caryopsis dormancy in wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides*) from Israel [J]. J Triticeae Corps(麦类作物学报), 2008, 28(4): 665-668.(in Chinese)
- [15] Cakmak I, Torun A, Millet E, et al. *Triticum dicoccoides*: An important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat [J]. Soil Sci Plant Nutr, 2004, 50(7): 1047-1054.
- [16] Zhu J M(朱建明), Li L(李璐), Qin H B(秦海波), et al. Determination of total selenium in environmental samples by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry with ptf bomb [J]. Acta Mineral Sin(矿物学报), 2008, 28(2): 880-981.(in Chinese)
- [17] Zheng B S(郑宝山), Yan L R(严良荣), Mao D J(毛大钧). The Se resource in southwestern Hubei Province, China, and its exploitation strategy [J]. J Nat Resour(自然资源学报), 1993, 8(3): 204-212.(in Chinese)
- [18] Wang M Y(王明远). Geographical distribution of selenium content of grains in China [J]. Geogra Res(地理研究), 1982, 1(2): 51-58.(in Chinese)
- [19] Zhao S L(赵锁芳), Duan M(段敏), Sun X T(孙新涛), et al. Determining selenium content in wheat by HG-AFS with microwave digestion [J]. J Triticeae Crops(麦类作物学报), 2004, 24(1): 66-69.(in Chinese)
- [20] Qi Y W(齐玉薇), Shi C Y(史长义). Se ecological environment and human body health [J]. Stud Trace Elem Health(微量元素与健康研究), 2005, 22(2): 63-66.(in Chinese)
- [21] Zhao C Y(赵成义). Selenium in environment and the relationship between selenium and plant [J]. Environ Protect Xinjiang(新疆环境保护), 1991, 13(3): 28-34.(in Chinese)
- [22] Chi F Q(迟凤琴). Selenium in soil and the absorption, transformation of plant to it [J]. Heilongjiang Agri Sci(黑龙江农业

- 科学), 2001(6): 33-34.(in Chinese)
- [23] Nevo E, Korol A B, Beiles A. Evolution of Wild Emmer and Wheat Improvement [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 1-150.
- [24] Nevo E, Beiles A. Genetic diversity of wild emmer wheat in Israel and Turkey [J]. Theor Appl Genet, 1989, 77: 421-455.
- [25] Yan J(严俊), Cheng J P(程剑平), Gutterman Y, et al. Phenological and phenotypic differences and correlations among ecotypes of *Hordeum spontaneum* originating from different locations in Israel [J]. J Triticeae Corps(麦类作物学报), 2007, 27(6): 969-973.(in Chinese)
- [26] Yan J(严俊), Cheng J P(程剑平), Wang Y(王莹), et al. Dormancy and germination of *Brochypodium distachyon* caryopses derived from Israel [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2008, 16(2): 104-108.(in Chinese)
- [27] Li L Q(李亮琴), Zuo Z M(左占民), Liang J(梁晶), et al. Cultivation technique of high quality tailorde color wheat green-grainde wheat 1 [J]. Mod Agri Sci Techn(现代农业科技), 2006 (23): 114-125.(in Chinese)
- [28] Bai Y F(白云凤), Li W D(李文德), Sun S C(孙善澄), et al. Evaluation on some quality characteristics of black-grained wheat 76 [J]. J Chin Cereals Oils Assoc(中国粮油学报), 2000, 15(2): 6-9.(in Chinese)