

# 青花菜 DH 群体花球中莱菔硫烷含量的遗传效应分析

李占省<sup>1</sup>, 刘玉梅<sup>1,\*</sup>, 方智远<sup>1</sup>, 杨丽梅<sup>1</sup>, 庄 木<sup>1</sup>, 张扬勇<sup>1</sup>, 袁素霞<sup>1</sup>,  
赵 文<sup>2</sup>, 刘二艳<sup>1</sup>, 孙培田<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; <sup>2</sup>农业部蔬菜品质监测检验中心, 北京 100081)

**摘 要:** 以莱菔硫烷含量差异显著的两个青花菜高代纯合自交系 (86101 × 90196) 配制 F<sub>1</sub>, 利用游离小孢子培养的方法构建了包含 176 个系的 DH 群体。采用高效液相色谱法 (HPLC) 对 DH 群体花球中莱菔硫烷含量进行了测定, 并用植物数量性状主基因 + 多基因混合遗传模型对该群体莱菔硫烷含量进行了遗传效应分析。结果表明, 青花菜中莱菔硫烷含量性状受 3 对主基因 + 多基因控制, 且存在加性—上位效应, 群体主基因遗传率为 89.28%, 多基因遗传率为 2.58%, 主基因遗传率较高, 表明该性状主要受主基因调控。

**关键词:** 青花菜; DH 群体; 莱菔硫烷; 遗传分析; 高效液相色谱

**中图分类号:** S 635

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2012) 01-0101-08

## Determination of Sulforaphane by High Performance Liquid Chromatography and Genetic Analysis of DH Population in Broccoli Florets

LI Zhan-sheng<sup>1</sup>, LIU Yu-mei<sup>1,\*</sup>, FANG Zhi-yuan<sup>1</sup>, YANG Li-mei<sup>1</sup>, ZHUANG Mu<sup>1</sup>, ZHANG Yang-yong<sup>1</sup>,  
YUAN Su-xia<sup>1</sup>, ZHAO Wen<sup>2</sup>, LIU Er-yan<sup>1</sup>, and SUN Pei-tian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; <sup>2</sup>Supervision and Testing Center for Vegetable Quality, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A doubled haploid (DH) population derived from broccoli combination of inbred lines 86101 and 90196 was used to investigate the inheritance of sulforaphane content in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.) florets by high performance liquid chromatography (HPLC) and mixed major gene plus polygene inheritance model. The population consists of 176 DH lines was obtained by F<sub>1</sub> microspore culture, and the trial was set by random complete block design with three replications. The optimal model was three major genes plus polygenes. The heritability of major genes and polygenes was 89.28% and 2.58% individually which showed major genes had a key role in controlling sulforaphane content. At the same time, major genes followed additive effect and epistatic effect.

**Key words:** broccoli; DH population; sulforaphane; genetic analysis; high performance liquid chromatography (HPLC)

**收稿日期:** 2011 - 09 - 02; **修回日期:** 2011 - 11 - 24

**基金项目:** 国家大宗蔬菜产业技术体系项目 (CARS-25-A); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD13B06); 农业部“948”项目 (2006-G-13A); 浙江省重大科技专项农业项目 (2008C12004-1); 农业部园艺作物生物学与种质创制重点实验室项目

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: liuym@mail.caas.net.cn)

青花菜 (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.) 等十字花科蔬菜富含硫代葡萄糖苷, 简称“硫苷”(何洪巨 等, 2000, 2002; 邱海荣, 2008; 王建华 等, 2010; 廖永翠 等, 2011; 王辉 等, 2011)。

硫苷分为 3 类: 芳香族硫代葡萄糖苷、脂肪族硫代葡萄糖苷和吲哚族硫代葡萄糖苷, 其中脂肪族中的 4-甲基亚磺酰基丁基硫代葡萄糖苷 (Glucoraphanin, RAA) 经水解后可生成莱菔硫烷 (Sulforaphane, SF)。研究发现, 莱菔硫烷在人体内能够通过抑制 I 相解毒酶的表达和诱导 II 相解毒酶的表达来间接消除致癌物和自由基并将致癌物质排出体外 (Dinkova et al., 2002), 从而降低多种癌症患病率及心脑血管疾病和白血病的发生 (Brooks et al., 2001; Fahey et al., 2002; Fowke & Chung, 2003; Hintze et al., 2003; Jeffery & Keck, 2008)。

当前, 植物数量性状的遗传效应分析多采用主基因 + 多基因混合遗传模型 (盖钧镒 等, 2003), 该模型已广泛的被应用于大田作物中水稻稻曲病 (李余生 等, 2008)、小麦纹枯病 (任丽娟 等, 2010)、烟草农艺性状 (朱穗琴 等, 2004)、棉花产量 (张培通 等, 2006) 等和蔬菜作物中番茄红素含量 (李纪锁 等, 2006)、甘蓝育性及主要农艺性状 (严慧玲 等, 2007; 缪体云 等, 2008)、青花菜花球莢叶性状 (刘二艳 等, 2009) 等的遗传分析中。

本研究中以通过游离小孢子培养技术获得的青花菜 DH 群体为试材, 采用高效液相色谱法 (HPLC) 测定了该群体的莱菔硫烷含量, 并运用主基因 + 多基因混合遗传模型对青花菜 DH 群体莱菔硫烷含量进行遗传效应分析, 为高莱菔硫烷含量青花菜材料的创制和新品种选育提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

2005 年秋在中国农业科学院蔬菜花卉研究所北圃场以青花菜两个高代纯合自交系  $P_1$  (86101) 和  $P_2$  (90196) 为亲本配制  $F_1$ 。

‘86101’和‘90196’分别为 1985 年和 1990 年从日本引进的杂交种 ‘ミヤスタ’和‘玉冠’青花菜经多代自交获得的高代纯合自交系。该 DH 系是通过多年获得的, 2006 年秋种植  $F_1$  并采用游离小孢子培养技术对  $F_1$  进行小孢子培养获得小孢子胚再生植株。2007 年秋将获得的小孢子胚再生植株定植于中国农业科学院蔬菜花卉研究所南圃场温室内, 通过套袋人工自交获得了含有 176 个系的 DH 群体。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 田间试验设计及取样

于 2008 年秋将该 DH 群体和双亲 ( $P_1$  和  $P_2$ ) 及  $F_1$  定植于中国农业科学院蔬菜花卉研究所北圃场, 分为 11 个区组, 每个区组包含 16 个家系, 3 次重复, 随机排列, 每重复种植 10 株。待花球至成熟期时对每个 DH 系进行取样, 每株系选取成熟期均匀一致的 5 株单株采用对角取样法分别对每个花球部分进行取样并混合, 然后对样品进行真空冷冻干燥处理, 干燥后的样品经机械粉碎后低温密封保存。

#### 1.2.2 莱菔硫烷的测定

精确称取 0.50 g 青花菜干样, 加入 15.00 mL pH 7.0 的磷酸盐缓冲液 ( $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 磷酸氢二钾和磷酸二氢钾), 磁力搅拌器下反应 2.0 h (室温) 后加入 30 mL 的乙酸乙酯 (AR) 继续混匀 30

min 后,  $6\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下离心 10 min, 然后将上清液收集, 再重复提取 2 次, 收集 3 次的萃取液在旋转蒸发仪上蒸干, 旋蒸温度为  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最后 10 mL 甲醇 (HPLC) 定容, 过  $0.22\text{ }\mu\text{m}$  滤膜进样测定。

采用 SHIMADZU LC-20A 系列高效液相色谱仪, SHISEIDO<sup>TM</sup> 反相 C<sub>18</sub> ( $250\text{ mm} \times 4.6\text{ mm}$ ,  $5\text{ }\mu\text{m}$ ) 柱; 流速  $0.800\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 柱温:  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 进样量  $10.0\text{ }\mu\text{L}$ ; 梯度洗脱法测定: 流动相 A 泵为 5% 的四氢呋喃水溶液, B 泵为 100% 的甲醇, 梯度程序见表 1。

将  $10.0\text{ mg}$  标准品 (LKT-Shenzhen Minn Bolin Chemical, Company, Ltd.) 用色谱级的甲醇定容到  $10.0\text{ mL}$  的棕色容量瓶中, 分装后  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  密封保存备用。

以莱菔硫烷标准液 ( $1.0\text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) 配置成  $5.0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $50.0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $100.0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $200.0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $300.0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  浓度的标准液分别进样, 以峰面积为横坐标, 浓度为纵坐标, 得标准曲线和线性方程。

吸取一定浓度的标准品溶液, 反复进样测定 6 次, 根据测得的标准品各成分峰面积计算获精密程度。准确称取已知含量的样品, 分别加入一定量的标准品溶液, 按照前述样品处理方法测定回收率。

### 1.3 数据分析

首先将 HPLC 测得的青花菜干样中莱菔硫烷含量换算成鲜样中的含量。鲜样中含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{ FW}$ ) = 干样中含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}\text{ DW}$ )  $\times$  (1 - 含水量)。然后采用植物数量性状主基因 + 多基因混合分离分析模型 (盖钧镒 等, 2003) 进行遗传效应分析, 并结合软件 DH. EXE 对数据进行处理 (章元明和盖钧镒, 2000)。通过极大似然法和 IECM (Iterated expectation and conditional maximization) 算法对有关成分参数做出估计, 然后通过 AIC (Akaike's information criterion) 值原则进行判别, 结合适合性检验最终确定最优模型, 并对主基因和多基因的相关遗传参数 (一阶遗传参数和二阶遗传参数) 进行估计。

## 2 结果与分析

### 2.1 DH 群体亲本间莱菔硫烷含量的差异

HPLC 测定结果表明, 亲本 P<sub>1</sub> (86101) 和 P<sub>2</sub> (90196) 间莱菔硫烷含量存在极显著差异 (表 2)。

表 2 两亲本中莱菔硫烷含量间差异显著性检验  
Table 2 t-test of sulforaphane content in parents

处 理 Treatment	自由度 Free degree ( <i>df</i> )	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ STD	<i>t</i>	<i>P</i>
P <sub>1</sub>	2	$37.56 \pm 3.76$	$16.75^{**}$	0.0033
P <sub>2</sub>	2	$1.37 \pm 0.30$		

注: \*\*表示在  $\alpha = 0.01$  水平上存在极显著差异。

Note: \*\* indicates the significant difference at  $\alpha = 0.01$  level.

2.2 DH 群体莱菔硫烷含量次数分布

根据 HPLC 测得的 DH 群体中莱菔硫烷含量，绘制次数分布图（图 1）。由分布图可以看出，莱菔硫烷含量在群体中的分布是连续性的，表明莱菔硫烷含量为数量性状，可以进行数量性状遗传效应分析。同时，根据峰度（Kurtosis）和偏度（Skewness）计算公式可求得该分布的峰度和偏度分别为 1.20（ $P = 0.0001$ ）和 0.69（ $P = 0.0581$ ），表明莱菔硫烷含量的分布呈偏态分布，这也暗示了莱菔硫烷含量这一数量性状可能存在主效基因。在 176 个青花菜 DH 系中有 101 个系中莱菔硫烷含量达到和超过了亲本  $P_1$  的含量。

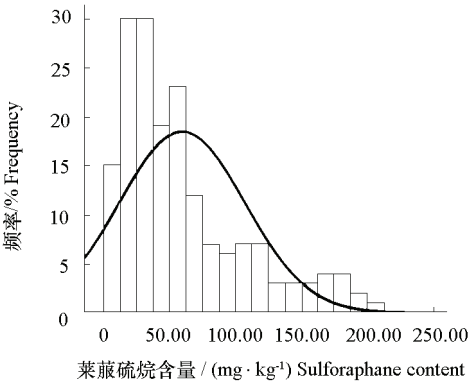


图 1 DH 群体中莱菔硫烷含量的次数分布  
Fig. 1 Frequency distribution of sulforaphane content in DH population

2.3 遗传模型

采用主基因 + 多基因混合分离分析遗传模型对 DH 群体的莱菔硫烷含量进行分析，获得了 1 对主基因（A）、两对主基因（B）、多基因（C）、1 对主基因 + 多基因（D）、2 对主基因 + 多基因（E）、3 对主基因（F）、3 对主基因 + 多基因（G）共 7 类 38 种遗传模型的 AIC 值（表 3）。根据期望熵最大为最优假设的原则（最小 AIC 值原则），从莱菔硫烷含量遗传模型中选出 3 个备选遗传模型：E-1-0、E-2-0 和 G-1。经适合性检验（表 4）发现 3 种遗传模型分别有 6 个、7 个和 6 个统计量达到了显著差异的水平。结合 AIC 值和适合性检验结果确定 G-1 为最佳遗传模型，从而推断莱菔硫烷含量这一数量性状符合 G-1 遗传模型：3 对主基因连锁并有加性—上位性 + 多基因。

表 3 莱菔硫烷含量不同遗传模型的 AIC 值  
Table 3 AIC value of sulforaphane content in different genetic models

模型 Model	AIC 值 AIC value	模型 Model	AIC 值 AIC value
A-0	1 974.41	E-2-0	1 845.79
A-1	2 014.48	E-2-1	1 865.33
B-1-1	1 957.92	E-2-2	2 036.32
B-1-2	2 016.96	E-2-3	2 034.30
B-1-3	2 014.97	E-2-4	1 927.59
C-0	1 923.54	E-2-5	1 854.06
C-1	2 030.72	E-2-6	1 927.54
D-0	1 925.55	E-2-7	1 925.54
D-1	2 032.47	E-2-8	1 925.54
E-1-0	1 843.79	E-2-9	1 925.54
E-1-1	1 875.74	F-1	1 865.63
E-1-2	2 034.32	F-2	1 993.99
E-1-3	2 032.28	F-3	1 955.41
E-1-4	1 870.77	F-4	2 017.73
E-1-5	1 870.77	G-0	1 852.70
E-1-6	1 946.77	G-1	1 829.27
E-1-7	1 950.72	G-2	2 028.42
E-1-8	1 950.72	G-3	2 009.24
E-1-9	1 933.79	G-4	2 034.14

注：AIC 值即 A kaïke's information criterion。  
Note: AIC standard for A kaïke's information criterion.

表 4 E-1-0、E-2-0 和 G-1 遗传模型的适合性检验

Table 4 Test for goodness of genetic models of E-1-0, E-2-0 and G-1

模型 Model	世代 Generation	$U_1^2$	$U_2^2$	$U_3^2$	${}_nW^2$	$D_n$
E-1-0	P <sub>1</sub>	0.003	0.249	3.225*	0.078	0.228
	P <sub>2</sub>	0	0.511	3.225*	0.410	0.448
	DH	0.966*	1.414*	0.900*	0.275*	0.069
E-2-0	P <sub>1</sub>	0.001	0.176	3.238*	0.079	0.222
	P <sub>2</sub>	0.026	0.754*	8.145*	0.413	0.465
	DH	0.255*	0.430*	0.444*	0.175*	0.060
G-1	P <sub>1</sub>	0.025	0.088	3.210*	0.082	0.212
	P <sub>2</sub>	0.160	1.183*	7.838*	0.426	0.492
	DH	0.271*	0.006	2.899*	0.115*	0.066

注： $U_1^2$ 、 $U_2^2$ 、 $U_3^2$  为均匀性适合检验； ${}_nW^2$  为 Smirnov 检验统计量； $D_n$  为 Kolmogorov 检验统计量。\* 表示  $\alpha = 0.05$  水平上差异显著。

Note:  $U_1^2$ ,  $U_2^2$  and  $U_3^2$  are the statistic of Uniformity test.  ${}_nW^2$  is the statistic of Smirnov test.  $D_n$  is the statistic of Kolmogorov test. \* indicates the significant difference at  $\alpha = 0.05$  level.

## 2.4 遗传参数估计

根据不同遗传模型的成分分布参数计算出遗传模型的极大似然估计值，并由此估计出一阶遗传参数和二阶遗传参数（表 5）。

结果表明该 DH 群体菜菔硫烷含量的平均值为  $63.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$ ，第 1 对主基因的加性效应( $d_a$ )为 24.45，是正向效应，作用效果十分明显。第 2 对和第 3 对主基因的加性效应分别为  $-7.14$  ( $d_b$ )和  $7.22$  ( $d_c$ )，其中第 2 对主基因的加性效应是负向效应，第 3 对主基因加性效应为正向效应，两者绝对值大小基本相同，但均弱于第 1 对主基因的加性效应。

表 5 G-1 模型的遗传参数估计值

Table 5 Estimate of genetic parameters of G-1

一阶遗传参数 1 <sup>st</sup> order genetic parameter	估计值 Estimate value	二阶遗传参数 2 <sup>nd</sup> order genetic parameter	估计值 Estimate value
$M$ (群体平均数 Average value of population)	63.35	$\sigma_p^2$ (表型方差 Phenotype variance)	2 281.47
$d_a$ (第 1 对主基因的加性效应 Additive effect of the 1 <sup>st</sup> pair major gene)	24.45	$\sigma_{mg}^2$ (主基因方差 Major gene variance)	2 036.85
$d_b$ (第 2 对主基因的加性效应 Additive effect of the 2 <sup>nd</sup> pair major gene)	- 7.14	$\sigma_{pg}^2$ (多基因方差 Polygenic variance)	58.82
$d_c$ (第 3 对主基因的加性效应 Additive effect of the third pair major gene)	7.22	$\sigma^2$ (环境方差 Environmental variance)	185.80
$i_{ab}$ (第 1 对主基因的加性 $\times$ 第 2 对主基因的加性效应 Additive effect plus additive effect of the 1 <sup>st</sup> pair major gene $\times$ the 2 <sup>nd</sup> pair major gene)	- 13.55	$h_{mg}^2/\%$ (主基因遗传率 Major gene heritability)	89.28
$i_{ac}$ (第 1 对主基因的加性 $\times$ 第 3 对主基因的加性效应 Additive effect plus additive effect of the 1 <sup>st</sup> pair major gene $\times$ the third pair major gene)	0.80	$h_{pg}^2/\%$ (多基因遗传率 Polygenic heritability)	2.58
$i_{bc}$ (第 2 对主基因的加性 $\times$ 第 3 对主基因的加性效应 Additive effect plus additive effect of the 2 <sup>nd</sup> pair major gene $\times$ the third pair major gene)	- 30.77		
$i_{abc}$ (3 对主基因加性效应的互作值 Additive effect plus additive effect of the 1 <sup>st</sup> pair major gene $\times$ the 2 <sup>nd</sup> pair major gene $\times$ the third pair major gene)	- 24.53		

第 1 对主基因和第 2 对主基因的加性互作效应 ( $i_{ab}$ ) 为 -13.55, 呈负向效应; 第 1 对主基因和第 3 对主基因的加性互作效应 ( $i_{ac}$ ) 为 0.80, 呈正向效应, 互作效应不明显; 第 2 对主基因和第 3 对主基因的加性互作效应 ( $i_{bc}$ ) 为 -30.77, 呈负向效应, 互作效应十分明显; 3 对主基因的综合加性互作效应 ( $i_{abc}$ ) 为 -24.53, 呈负向效应, 互作效应也很明显。

主基因遗传率为 89.28%, 属于高等遗传率, 起主导作用; 多基因遗传率为 2.58%, 主基因 + 多基因综合遗传率为 91.86%, 尚有 8.14% 的因素由环境控制。

### 3 讨论

本研究采用灵敏度较高的 HPLC 法测定青花菜中莱菔硫烷的含量。该方法先后被报道用于测定青花菜种子和花球中莱菔硫烷的含量 (夏薇 等, 2005; Liang et al., 2006; 张婵娟 等, 2007; 沈莲清 等, 2008), 均证明了该方法的准确性和可靠性。

本研究中首次采用青花菜 DH 群体作为研究对象研究青花菜中莱菔硫烷含量的遗传效应, 该群体与  $F_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  等分离群体相比, 不但消除了常规自交和回交等早期杂合位点的掩盖, 而且大大缩短了育种周期和提高了纯合基因出现的概率。DH 群体可设置重复、随机排列, 从而有效地减少环境误差, 提高试验数据的可靠性。

根据群体中莱菔硫烷含量分布图, 结果显示莱菔硫烷含量为数量性状。应用统计学和主基因 + 多基因混合分离分析遗传模型对青花菜 DH 群体莱菔硫烷含量这一数量性状进行了 DH 群体分离分析, 并确定了 G-1 遗传模型为最优模型, 从而推断莱菔硫烷这一性状受 3 对主基因调控并存在加性—上位性 + 多基因控制, 这一结论与谢祝捷等 (2010) 报道的青花菜基因型和环境互作效应对花球 4-甲基亚磺酰丁基硫苷含量的影响中基因型能够显著的影响该成分的含量, 且变异来源占总变异的 67.3% 的结果相一致, 表明了莱菔硫烷含量这一性状主要由基因型决定。同时, 在 176 个青花菜 DH 系中有 101 个系出现了超亲现象, 这可能是因为在构建青花菜 DH 群体过程中偏向莱菔硫烷较高的材料保留了下来, 也可能与莱菔硫烷关键调控基因在 DH 系中得到了纯合有关, 从而表现出了偏分离和超亲现象, 这与 DH 群体往往表现出偏分离现象 (盖钧镒 等, 2003; 缪体云 等, 2008; 刘二艳 等, 2009) 一致。

遗传分析结果表明, 莱菔硫烷这一数量性状主要受 3 对主基因调控, 主基因遗传率高达 89.28%, 同时存在多基因控制, 多基因遗传率为 2.58%, 该结论也验证了莱菔硫烷含量次数分布呈偏态分布从而推断该性状可能存在主效基因的结论。此外, 多基因的调控作用在一定程度上也会影响莱菔硫烷的生成量。从 3 对主基因加性效应可以看出, 第 1 对主基因的加性效应值为 24.45, 为正向效应, 其绝对值较第 2 对主基因 (-7.14) 和第 3 对主基因 (7.22) 都较高, 即当基因纯合时第 1 对主基因在控制莱菔硫烷含量遗传过程中会发挥较大的作用, 提高莱菔硫烷的含量, 其次是第 3 对主基因, 也为正向效应, 而第 2 对主基因呈负向效应, 能够降低莱菔硫烷的含量。

本研究结果表明, 莱菔硫烷含量这一数量性状存在加性—上位效应, 即调控莱菔硫烷含量的基因位点内等位基因存在累加效应, 是上下代遗传可以固定的分量, 而上位性效应表明不同基因位点的非等位基因之间存在相互作用。同时, 由于加性效应部分可以在上下代得以遗传, 选择过程中存在累加效应, 而且具有较快的纯合速度, 所以该数量性状在低世代选择时较易获得育种效果, 从而更快地获得稳定的、可以遗传的、高含量的育种材料。

### References

Brooks J D, Paton V G, Vidanes G. 2001. Potent induction of phase 2 enzymes in human prostate cells by sulforaphane. *Cancer Epidemiol*

- Biomarkers Prev, 10: 949 – 954.
- Dinkova-Kostova A T, Holtzclaw W D, Cole R N. 2002. Direct evidence that sulfhydryl groups of keap1 are the sensors regulating induction of phase 2 enzymes that protect against carcinogens and oxidants. Proc Natl Acad Sci USA, 99: 11908 – 11913.
- Fahey J W, Haristoy X, Dohn P M. 2002. Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular, and antibiotic-resistant strains of helicobacter pylori and prevents benign (a) pyrene-induced stomach tumor. Proc Natl Acad Sci USA, 99: 7610 – 7615.
- Fowke J H, Chung F L. 2003. Urinary isothiocyanate levels, Brassica and human breast cancer. Cancer Res, 63: 3980 – 3986.
- Gai Jun-yi, Zhang Yuan-ming, Wang Jian-kang. 2003. Genetic system of quantitative traits in plants. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 盖钧镒, 章元明, 王建康. 2003. 植物数量性状遗传体系. 北京: 科学出版社.
- He Hong-ju, Chen Hang, Schnitzler W H. 2000. Glucosinolate composition and contents in Chinese Brassica vegetables//Ao Yan-song, Qin Zhi-wei. Advances in horticulture (IV). Harbin: Harbin Institute of Technology Press. (in Chinese)
- 何洪巨, 陈 杭, Schnitzler W H. 2000. 中国十字花科蔬菜品种硫代葡萄糖苷组成与含量//奥岩松, 秦智伟. 园艺学进展 (IV). 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社.
- He Hong-ju, Chen Hang, Schnitzler W H. 2002. Glucosinolate composition and contents in Brassica vegetables. Scientia Agricultura Sinica, 35 (2): 192 – 197. (in Chinese)
- 何洪巨, 陈 杭, Schnitzler W H. 2002. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析. 中国农业科学, 35 (2): 192 – 197.
- Hintze K J, Wald K A, Zeng H. 2003. Thioredoxin reductase in human hepatoma cells is transcriptionally regulated by sulforaphane and other electrophiles via an antioxidant response element. J Nutr, 133: 2721 – 2727.
- Jeffery E H, Keck A S. 2008. Translating knowledge generated by epidemiological and *in vitro* studies into dietary cancer prevention. Mol Nutr Food Res, 52: S7 – S17.
- Liao Yong-cui, Song Ming, Wang Hui, Xu Dong-hui, Wang Xiao-wu. 2011. Glucosinolate profile and accumulation in Brassica campestris L. ssp. pekinensis. Acta Horticulturae Sinica, 38 (5): 936 – 969. (in Chinese)
- 廖永翠, 宋 明, 王 辉, 徐东辉, 王晓武. 2011. 大白菜中硫代葡萄糖苷的鉴定及含量分析. 园艺学报, 38 (5): 936 – 969.
- Li Ji-suo, Shen Huo-lin, Shi Zheng-qiang. 2006. Analysis on the major gene and polygene mixed inheritance of glycogen content in fresh consumptive tomato fruit. Hereditas, 28 (4): 458 – 462. (in Chinese)
- 李纪锁, 沈火林, 石正强. 2006. 鲜食番茄果实中番茄红素含量的主基因—多基因混合遗传分析. 遗传, 28 (4): 458 – 462.
- Li Yu-sheng, Zhu Zhen, Zhang Ya-dong, Zhao Ling, Wang Cai-lin. 2008. Genetic analysis of rice smut resistance using major gene plus polygene mixed genetic model. Acta Agronomica Sinica, 34 (10): 1728 – 1733. (in Chinese)
- 李余生, 朱 镇, 张亚东, 赵 凌, 王才林. 2008. 水稻稻曲病抗性的主基因 + 多基因混合遗传模型分析. 作物学报, 34 (10): 1728 – 1733.
- Liang H, Yuan Q P, Dong H R, Liu Y M. 2006. Determination of sulforaphane in broccoli and cabbage by high-performance liquid chromatography. Journal of Food Composition and Analysis, 19: 473 – 476.
- Liu Er-yan, Liu Yu-mei, Fang Zhi-yuan, Yang Li-mei, Zhuang Mu, Zhang Yang-yong, Yuan Su-xia, Sun Ji-feng, Li Zhan-sheng, Sun Pei-tian. 2009. Genetic analysis of head-leaf traits using mixed major gene plus polygene inheritance model in Brassica oleracea L. var. italica Planch. Acta Horticulturae Sinica, 36 (11): 1611 – 1618. (in Chinese)
- 刘二艳, 刘玉梅, 方智远, 杨丽梅, 庄 木, 张扬勇, 袁素霞, 孙继峰, 李占省, 孙培田. 2009. 青花菜花球‘莢叶’性状主基因 + 多基因遗传分析. 园艺学报, 36 (11): 1611 – 1618.
- Miao Ti-yun, Liu Yu-mei, Fang Zhi-yuan, Yang Li-mei, Zhuang Mu, Zhang Yang-yong, Yuan Su-xia, Sun Pei-tian. 2008. Genetic analysis of the main agronomic traits of DH population in Brassica oleracea var. capitata. Acta Horticulturae Sinica, 35 (1): 59 – 64. (in Chinese)
- 缪体云, 刘玉梅, 方智远, 杨丽梅, 庄 木, 张扬勇, 袁素霞, 孙培田. 2008. 一个结球甘蓝 DH 群体主要农艺性状的遗传效应分析. 园艺学报, 35 (1): 59 – 64.
- Qiu Hai-rong. 2008. Determination and comparison of glucosinolate content in various broccoli and cauliflower cultivars [M. D. Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. (in Chinese)
- 邱海荣. 2008. 不同品种青花菜和花椰菜硫代葡萄糖苷含量的测定及比较 [硕士论文]. 南京: 南京农业大学.
- Ren Li-juan, Yan Wei, Chen Huai-gu, Ma Hong-xiang. 2010. Major genes plus polygenes inheritance analysis of resistance to wheat sharp eyespot.

- Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 26 (6): 1156 - 1161. (in Chinese)
- 任丽娟, 颜 伟, 陈怀谷, 马鸿翔. 2010. 小麦纹枯病抗性的主基因 + 多基因遗传分析. 江苏农业学报, 26 (6): 1156 - 1161.
- Shen Lian-qing, Su Guang-yao, Wang Kui-wu. 2008. Studies on purification and antitumor in vitro experiment of sulforaphane enzymolyzed from glucosinolate in broccoli seed. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 8 (5): 15 - 20. (in Chinese)
- 沈莲清, 苏光耀, 王奎武. 2008. 西兰花种子中硫苷酶解产物萝卜硫素的提纯与抗肿瘤的体外试验研究. 中国食品学报, 8 (5): 15 - 20.
- Wang Hui, Sun Ri-fei, Deng Jie, Wu Jian, Wang Xiao-wu. 2011. QTL Analysis for gluconapin accumulation in leaves of *Brassica campestris* L. Acta Horticulturae Sinica, 38 (7): 1283 - 1290. (in Chinese)
- 王 辉, 孙日飞, 邓 杰, 武 剑, 王晓武. 2011. 控制白菜 3 - 丁烯基硫代葡萄糖苷积累的 QTL 定位及分析. 园艺学报, 38 (7): 1283 - 1290.
- Wang Jian-hua, Zhang Zhen-chao, Mao Zhong-liang, Dai Zhong-liang. 2010. Research progress in glucosinolates and their degradation products and glucosinolates-rich breeding of broccoli. Acta Agriculturae Jiangxi, 22 (12): 53 - 55. (in Chinese)
- 王建华, 张振超, 毛忠良, 戴忠良. 2010. 西兰花硫代葡萄糖苷及其降解产物与育种研究进展. 江西农业学报, 22 (12): 53 - 55.
- Xia Wei, Zhao Xiu-juan, Wu Kun, Yuan Lin-hong. 2005. Determination of sulforaphane in vegetables of north diet. Chin J Dis Control Prev, 9 (3): 209 - 211. (in Chinese)
- 夏 薇, 赵秀娟, 吴 坤, 苑林宏. 2005. 北方 12 种蔬菜中莱菔硫烷含量的测定. 疾病控制杂志, 9 (3): 209 - 211.
- Xie Zhu-jie, Li Yuan, Yao Xue-qin, Qiu Hai-rong. 2010. Effects of genotype, environment and interaction on glucoraphanin content in broccoli. Acta Horticulturae Sinica, 37 (4): 625 - 630. (in Chinese)
- 谢祝捷, 李 媛, 姚雪琴, 邱海荣. 2010. 青花菜基因型和环境互作对花球 4 - 甲基亚磺酰丁基硫苷含量的影响. 园艺学报, 37 (4): 625 - 630.
- Yan Hui-ling, Fang Zhi-yuan, Liu Yu-mei, Wang Yong-jian, Yang Li-mei, Zhuang Mu, Zhang Yang-yong, Sun Pei-tian. 2007. Genetic effect of sterility of the dominant gene male sterile material (DGMS79-399-3) in cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). Acta Horticulturae Sinica, 34 (1): 93 - 98. (in Chinese)
- 严慧玲, 方智远, 刘玉梅, 王永健, 杨丽梅, 庄 木, 张扬勇, 孙培田. 2007. 甘蓝显性雄性不育材料 DGMS79-399-3 不育性的遗传效应分析. 园艺学报, 34 (1): 93 - 98.
- Zhang Chan-juan, Guo Xiao-ling, Meng Qing, Feng Yi-fan. 2007. HPLC analysis of sulforaphane in different kinds of broccoli seeds. Journal of Guangdong College of Pharmacy, 23 (5): 505 - 508. (in Chinese)
- 张婵娟, 郭晓玲, 孟 青, 冯毅凡. 2007. 不同品种西兰花种子中莱菔硫烷的 HPLC 分析. 广东药学院学报, 23 (5): 505 - 508.
- Zhang Pei-tong, Zhu Xie-fei, Guo Wang-zhen, Yu Jing-zhong, Zhang Tian-zhen. 2006. Genetic analysis of yield and its components for high yield cultivar Simian 3 in *G. hirsutum* L. Acta Agronomica Sinica, 32 (17): 1011 - 1017. (in Chinese)
- 张培通, 朱协飞, 郭旺珍, 俞敬忠, 张天真. 2006. 高产棉花品种泗棉 3 号产量及其产量构成因素的遗传分析. 作物学报, 32 (17): 1011 - 1017.
- Zhang Yuan-ming, Gai Jun-yi. 2000. Identification of mixed major genes and polygenes inheritance model of quantitative traits by using DH or RIL population. Acta Genetica Sinica, 27 (7): 634 - 640. (in Chinese)
- 章元明, 盖钧镒. 2000. 利用 DH 或 RIL 群体检测 QTL 体系并估计其遗传效应. 遗传学报, 27 (7): 634 - 640.
- Zhu Hui-qin, Zhang Xian-yin, Xue Qing-zhong. 2004. Genetic analysis of agronomic traits of two double haploid populations in tobacco. Journal of Zhejiang University: Agric Life Sci, 30 (5): 477 - 481. (in Chinese)
- 朱惠琴, 张宪银, 薛庆中. 2004. 烟草两个 DH 群体农艺性状的遗传分析. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 30 (5): 477 - 481.