

## 第3章 孟德尔遗传

◎从1856-1871年进行了大量植物杂交试验研究；1865年2月8日和3月8日先后两次在布尔诺自然科学学会例会上宣读发表；1866年整理成长达45页的《植物杂交试验》一文，发表在《布隆自然科学会志》第4卷上。

◎其中对豌豆(严格自花授粉/闭花授粉)差别明显的7对简单性状进行了长达8年研究，提出遗传因子假说及其分离与独立分配规律(后称Mendel's Laws)

# 第4章 孟德尔遗传

## 第1节 分离规律

## 第2节 独立分配规律

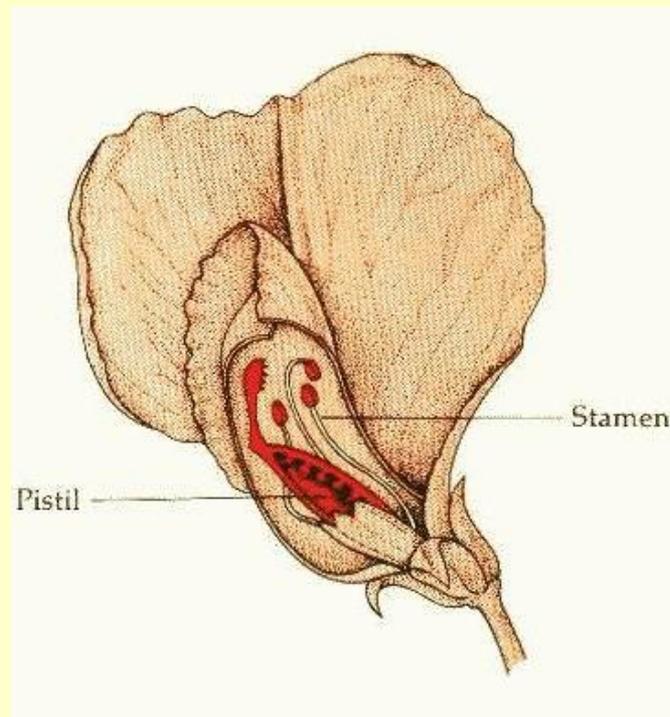
## 第3节 遗传学数据的统计问题

## 第4节 孟德尔规律的补充和发展



# 第1节 分离规律

- 一、性状分离现象
- 二、分离现象的解释
- 三、表现型和基因型
- 四、分离规律的验证
- 五、分离比例的实现条件
- 六、分离规律的应用



# 一、孟德尔豌豆杂交实验

---

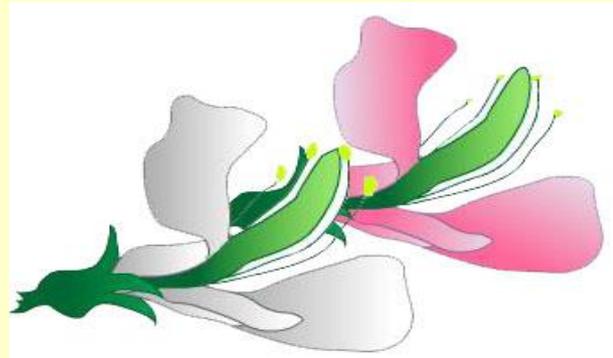
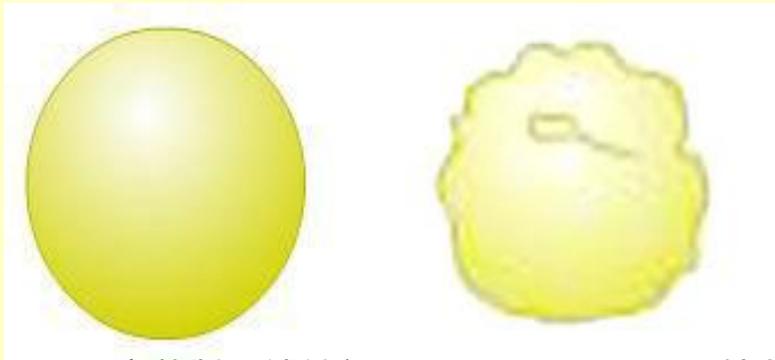
🔔 生物体或其组成部分所表现的形态特征和生理特性称为性状 (character/trait)。

🔔 最初人们在研究生物遗传时往往把所观察到的生物所有特征或某一类特征作为一个整体看待。

# 一、孟德尔豌豆杂交实验

🔔 孟德尔把植株性状总体区分为各个单位，称为**单位性状(unit character)**，即：生物某一方面的特征特性。

🔔 不同生物个体在单位性状上存在不同的表现，这种同一单位性状的相对差异称为**相对性状(contrasting character)**。



# 一、孟德尔豌豆杂交实验

性状	杂交组合
花色	红花 X 白花
种子形状	圆粒 X 皱粒
子叶颜色	黄色 X 绿色
豆荚形状	饱满 X 不饱满
未熟豆荚色	绿色 X 黄色
花着生位置	腋生 X 顶生
植株高度	高 X 矮







# 植物杂交试验的符号表示

**P**：亲本(parent)，杂交亲本；

**♀**：母本，提供胚囊的亲本；

**♂**：父本，提供花粉粒的杂交亲本；

**×**：表示杂交；

**F<sub>1</sub>**：表示杂种第一代(first filial generation)；

**⊗**：表示自交（自花授粉或自体授精）。

**F<sub>2</sub>**：杂种二代，F<sub>1</sub>自交得到的种子及其所发育形成的生物个体。

**F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub>...**

# 试验结果

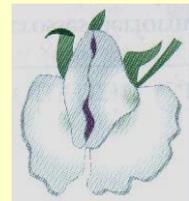
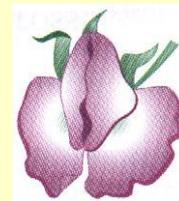
🔔  $F_1$ (杂种一代)的花色全部为红色；

🔔  $F_2$ (杂种二代)有两种类型的植株，一种开红花，一种开白花；并且红花植株与白花植株的比例接近3:1。

P 红花 (♀) X 白花 (♂)

F1 红花 

F2 红花 白花  
株数 705 224  
比例 3.15 : 1



# 反交试验及其结果

🔔 孟德尔后来用白花作母本、红花作父本。

白花(♀) × 红花(♂)。

通常将这两种杂交组合方式之一称为**正交**，另一种则是**反交**。

🔔 反交试验结果： $F_1$ ：全部红色；

$F_2$ ：红花：白花 接近3:1。

🔔 反交试验结果与正交完全一致，表明：

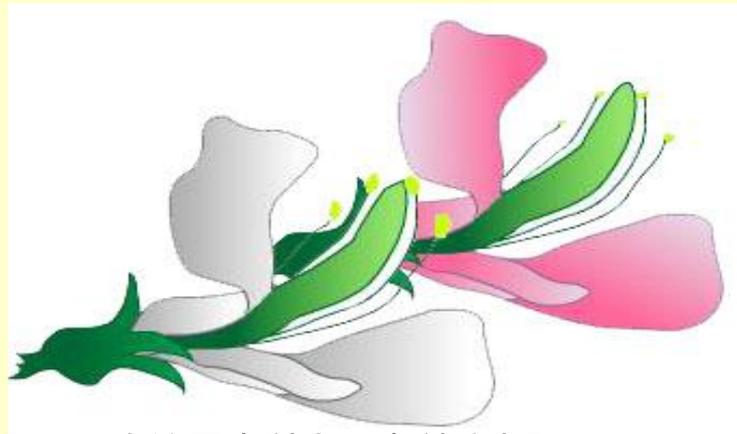
$F_1$ 、 $F_2$ 的性状表现不受亲本组合方式的影响，与哪一个亲本作母本无关。

# 七对相对性状杂交试验结果

性状	杂交组合	F1表现	F2表现		
			显性	隐性	比例
花色	红花X白花	红花	705红花	224白花	3.15: 1
种子形状	圆粒X皱粒	圆粒	5474圆粒	1850皱粒	2.96: 1
子叶颜色	黄色X绿色	黄色	6022黄色	2001绿色	3.01: 1
豆荚形状	饱满X不饱满	饱满	882饱满	299不饱满	2.95: 1
未熟豆荚色	绿色X黄色	绿色	428绿色	152黄色	2.82: 1
花着生位置	腋生X顶生	腋生	651腋生	207顶生	3.14: 1
植株高度	高X矮	高	787高	277矮	2.84: 1

# 显性、隐性性状

- ▶  $F_1$ 代个体(植株)均只表现亲本之一的性状，而另一个亲本的性状隐藏不表现。
- ⊙ 相对性状中，在 $F_1$ 代表现出来的相对性状称为**显性性状(dominant character)**，而在 $F_1$ 中未表现出来的相对性状称为**隐性性状(recessive character)**。



# 性状分离现象

- ▶  $F_2$ ：一种表现为显性性状，另种表现为隐性性状；并且表现显性性状与隐性性状个体数之比接近3:1。
- ⊗ 隐性性状在 $F_1$ 中并没有消失，只是被掩盖了，在 $F_2$ 显性性状和隐性性状都会表现出来，这就是性状分离(character segregation)现象。



## 二、分离现象的解释

---

遗传因子假说

豌豆花色分离现象解释

分离规律的细胞学基础

豌豆子叶颜色遗传因子的分离与组合

- 🔔 生物性状是由遗传因子决定，且每对相对性状由一对遗传因子控制；（遗传因子控制性状）
- 🔔 显性性状受显性因子(dominant ~)控制，而隐性性状由隐性因子(recessive ~)控制；只要成对遗传因子中有一个显性因子，生物个体就表现显性性状；（显隐性因子）
- 🔔 遗传因子在体细胞内成对存在，而在配子中成单存在。体细胞中成对遗传因子分别来自父本和母本。（配子是精纯的）
- 🔔 配子的结合是随机的。

# 豌豆花色分离现象解释

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

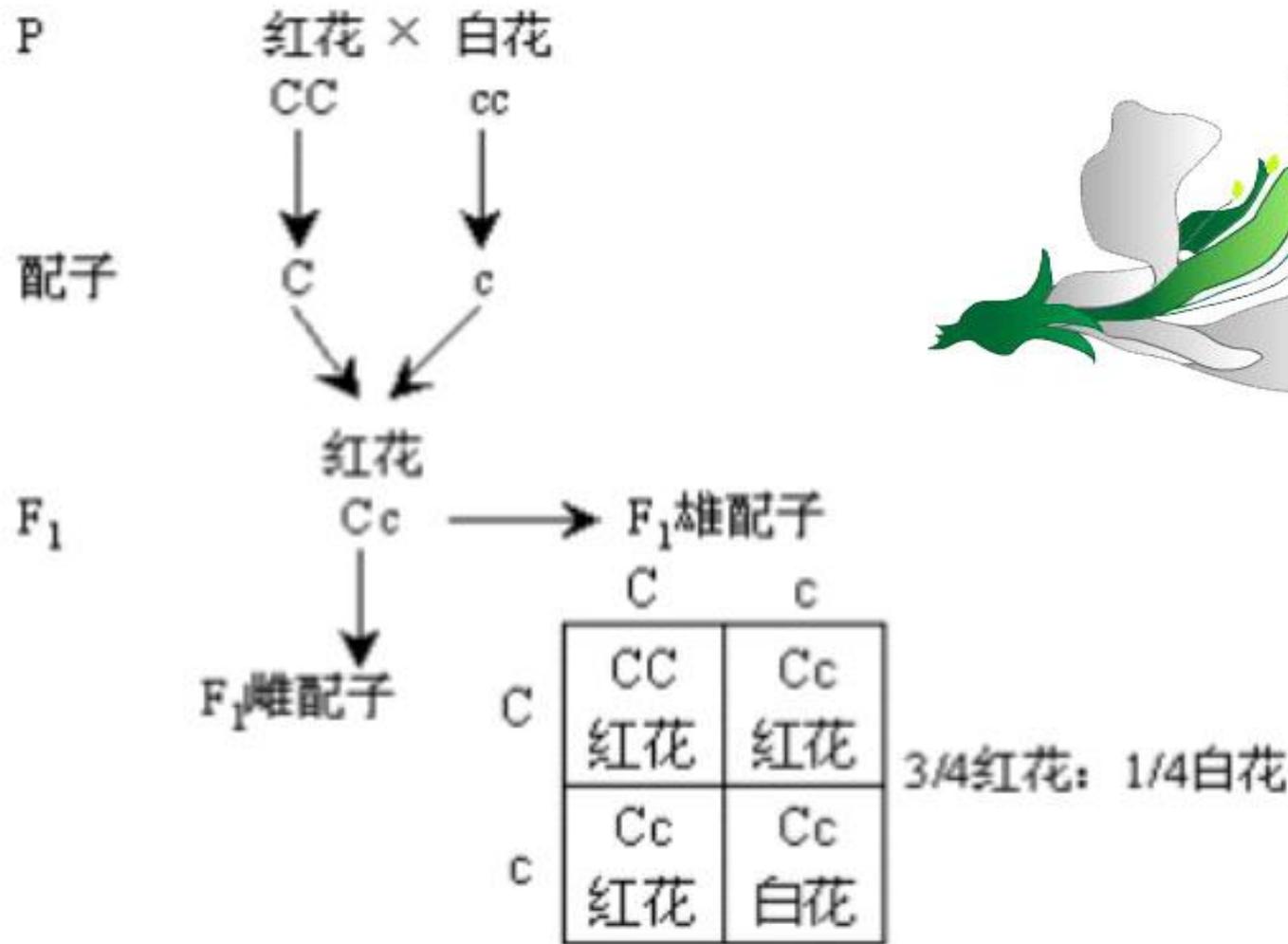


图 4-2 孟德尔对分离现象的解释

完整版，请访问[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net) 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

# 豌豆花色分离现象解释

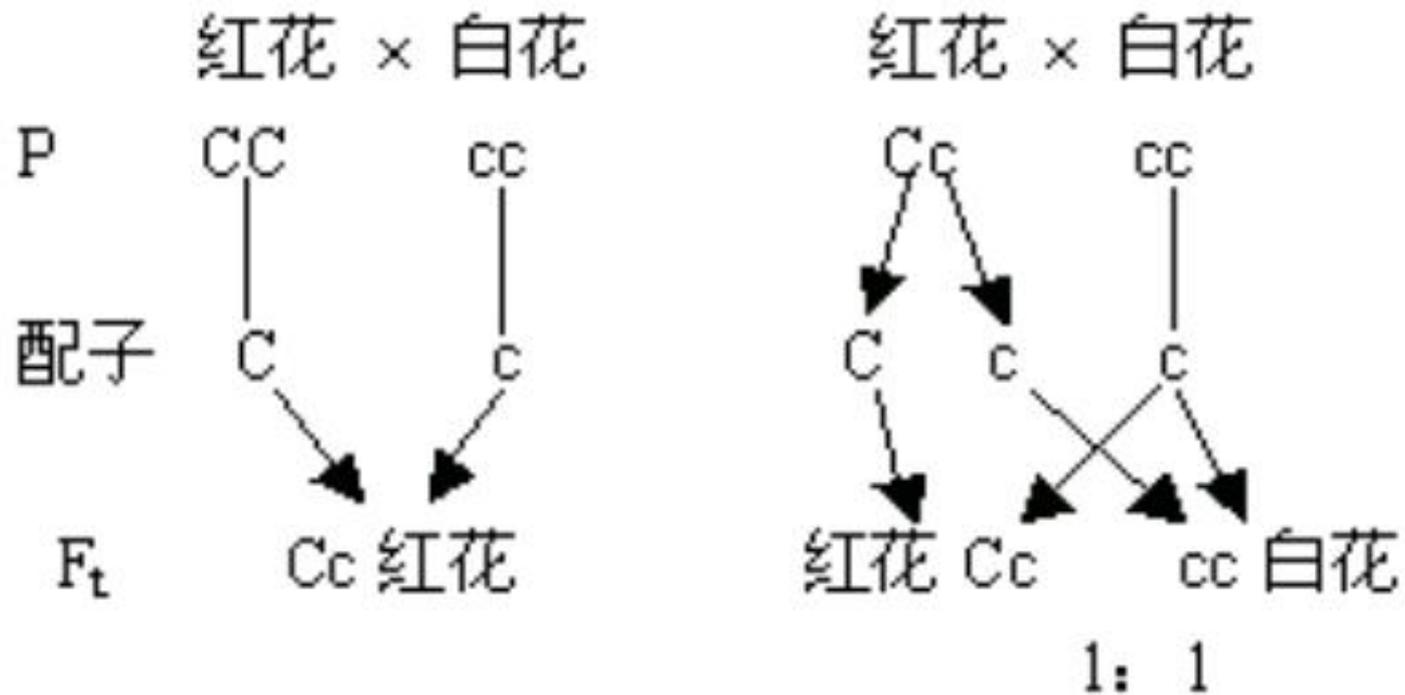
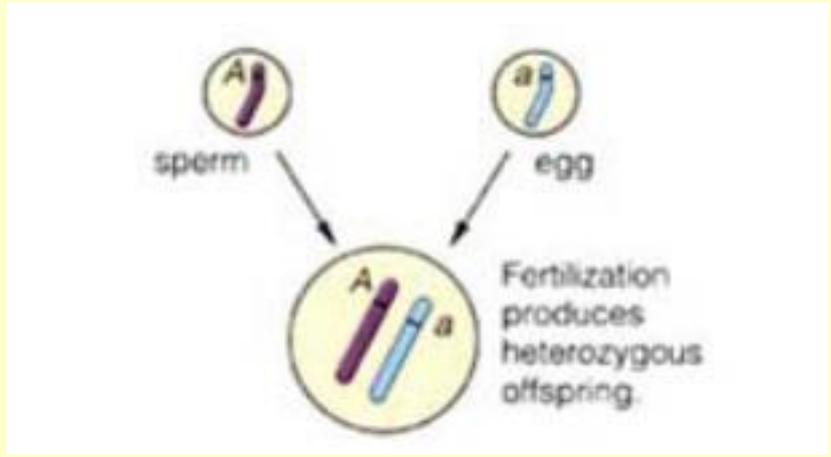
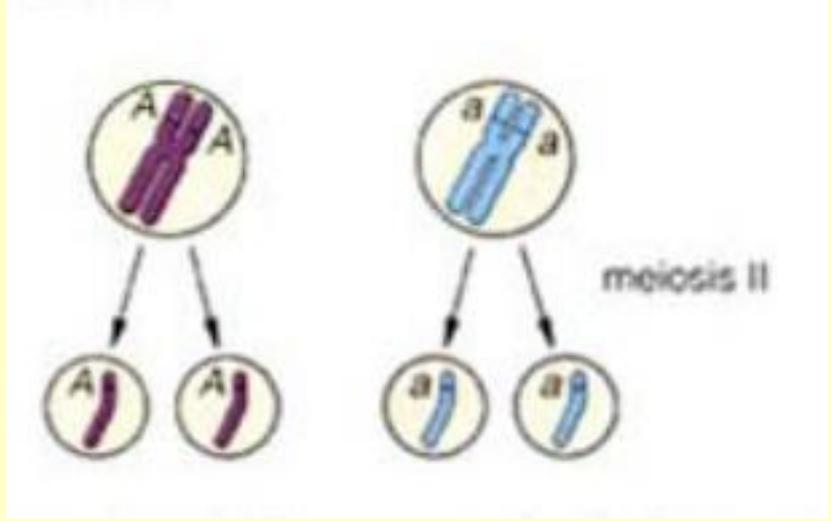
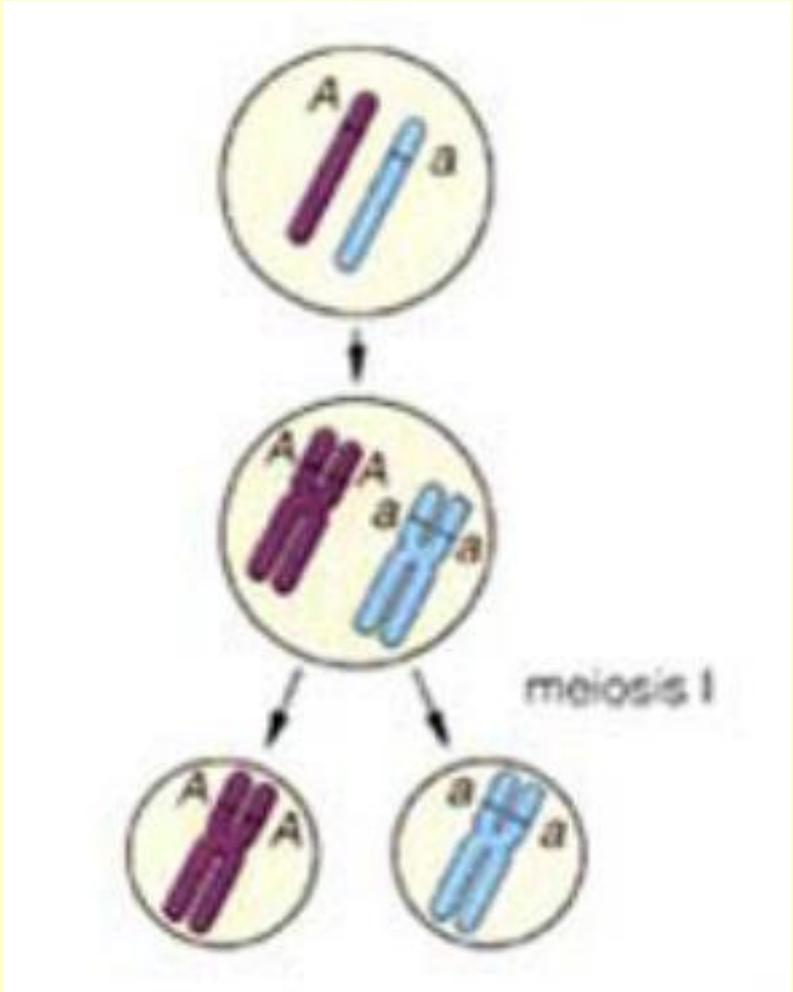


图 4-3 豌豆红花和白花一对基因的分离

🔔 **成对基因位于同一对同源染色体上。同源染色体上位点相同、控制着同类性状的基因——等位基因 (allele)**

🔔 **等位基因分离的细胞学基础就是：**

- ① **同源染色体对在减数分裂后期 I 发生分离，分别进入两个二分体细胞中；**
- ② **杂合体的性母细胞产生两个不同的二分体细胞，分别进行减数第二分裂，每个杂种性母细胞产生含显性基因和隐性基因的四分体细胞各两个，其比例为1:1。**



## 三、**基因型和表现型**

---

- 🔔 根据遗传因子假说，生物世代间所传递的是**遗传因子**，而不是性状本身；
- 🔔 生物个体的性状由细胞内遗传因子组成决定；
- 🔔 因此，对生物个体而言就存在**遗传因子组成和性状表现**两方面特征。

🔔 1909年约翰生提出用**基因(gene)**代替遗传因子。并提出了基因型和表现型两个概念。

🔔 **基因型(genotype)**：指生物个体基因组合。表示生物个体的遗传组成，又称**遗传型**；

🔔 **表现型(phenotype)**：指生物个体的性状表现，简称**表型**。

# 基因型和表现型的关系

🔔 **基因型是生物性状表现的内在决定因素，基因型决定表现型。**

例如，一株豌豆的基因型是CC或Cc，则该植株会开红花，而基因型为cc的植株才会开白花。

🔔 **表现型是基因型与环境条件共同作用下的外在表现，往往可以直接观察、测定，而基因型往往只能根据生物性状表现来进行推断。**



🔔 具有一对相同基因的基因型称为**纯合基因型(homozygous genotype)**，如CC和cc；这类生物个体称为**纯合体(homozygote)**。

⊕ **显性纯合体(dominant homozygote)**，如：  
CC.

⊖ **隐性纯合体(recessive homozygote)**，  
如：cc.



🔔 具有一对不同基因的基因型称为**杂合基因型**(heterozygous genotype)，如Cc；这类生物个体称为**杂合体**(heterozygote)。

🔔 由于纯合体与杂合体的基因组成不同：

- 产生配子上的差异；
- 自交后代的遗传稳定性。



# 生物个体基因型的推断

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

🔔 基因型和表现型的概念是建立在单位性状上，当我们谈到生物个体的基因型或表现型时，往往都是针对所研究的一个或几个单位性状而言，而不考虑其它性状和基因的差异。

🔔 通常可以根据生物的表现型来对一个生物的基因型作出推断，尤其是推断表现为**显性性状**的生物个体的基因型是纯合的，还是杂合的。

## 例：红花植株基因型推断

🔔 例：有一株豌豆A开红花，如何判断它的基因型？

🔔 因为表现型为红花，所以至少含有一个显性基因C；

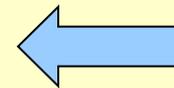
🔔 判断A植株是纯合体(CC)还是杂合体(Cc)，要看它所产生的配子的类型、比例或者自交后代是否出现性状分离现象。



## 例：红花植株基因型推断

用A植株进行自交，如果自交后代都开红花，则A植株是纯合体，其基因型是CC；

如果自交后代有红花和白花两种：且两种个体的比例为3:1，则A植株是杂合体Cc。



## 四、分离规律的验证

🔔 遗传因子仅是一个理论的、抽象的概念。当时孟德尔不知道遗传因子的**物质实体**是什么，如何实现分离。

🔔 遗传因子分离行为仅仅是孟德尔基于豌豆7对相对性状杂交试验中所观察到的 $F_1$ 、 $F_2$ 个体表现型及 $F_2$ 性状分离现象作出的一种**假设**。

🔔 正因为如此，从孟德尔杂交试验到遗传因子假说是一个**高度理论抽象过程**。所以当时几乎没有人能够理解。如何对这一假说进行验证呢？

# 分离规律的验证方法

---

(一)、测交法

(二)、自交法

(三)、 $F_1$ 花粉鉴定法

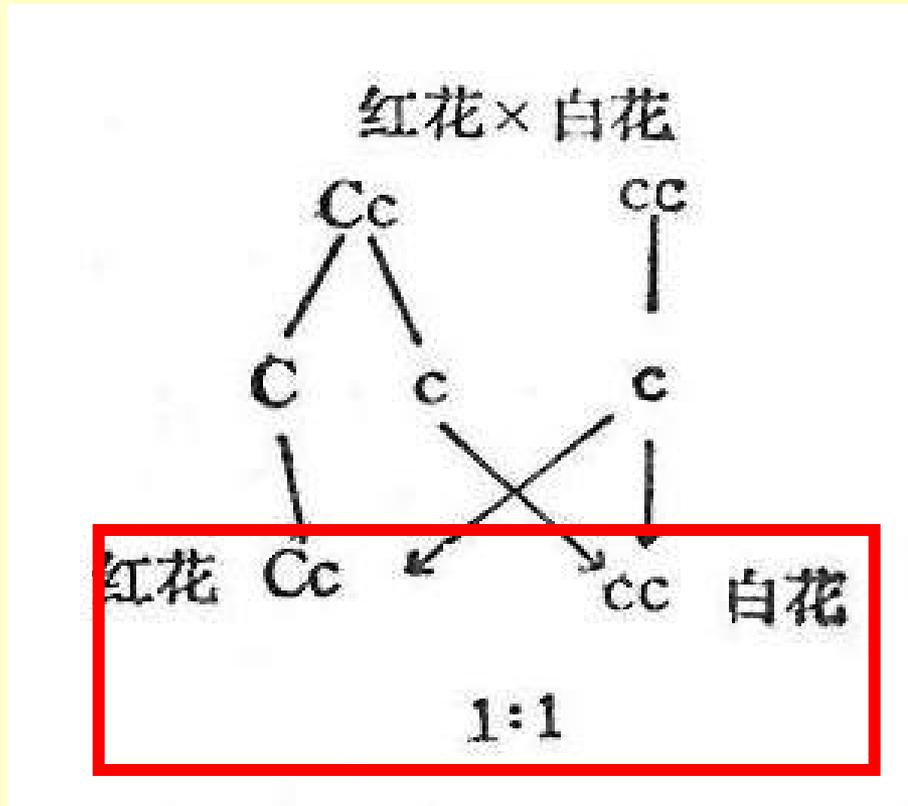
(四)、红色面包霉杂交法

# (一)、测交法

🔔 为了测验个体的基因型，用被测个体与隐性个体交配的杂交方式称为**测交 (test cross)**，其后代称为**测交后代(Ft)**。

🔔 被测个体不仅仅是 $F_1$ ，可以是任一需要确定基因型的生物个体。

# (一)、测交法



🔔 用 $F_1$ 与隐性个体(隐性纯合体)杂交，后代的表型类型和比例就反映了杂种 $F_1$ 配子的种类和比例，事实上也反映(测验)了 $F_1$ 的基因型。

# 测交试验结果

Mendel用杂种 $F_1$ 与白花亲本测交，结果表明：

🔔在166株测交后代中：

①85株开红花，81株开白花；

②其比例接近1:1。

🔔结论：分离规律对杂种 $F_1$ 基因型(Cc)及其分离行为的推测是正确的。

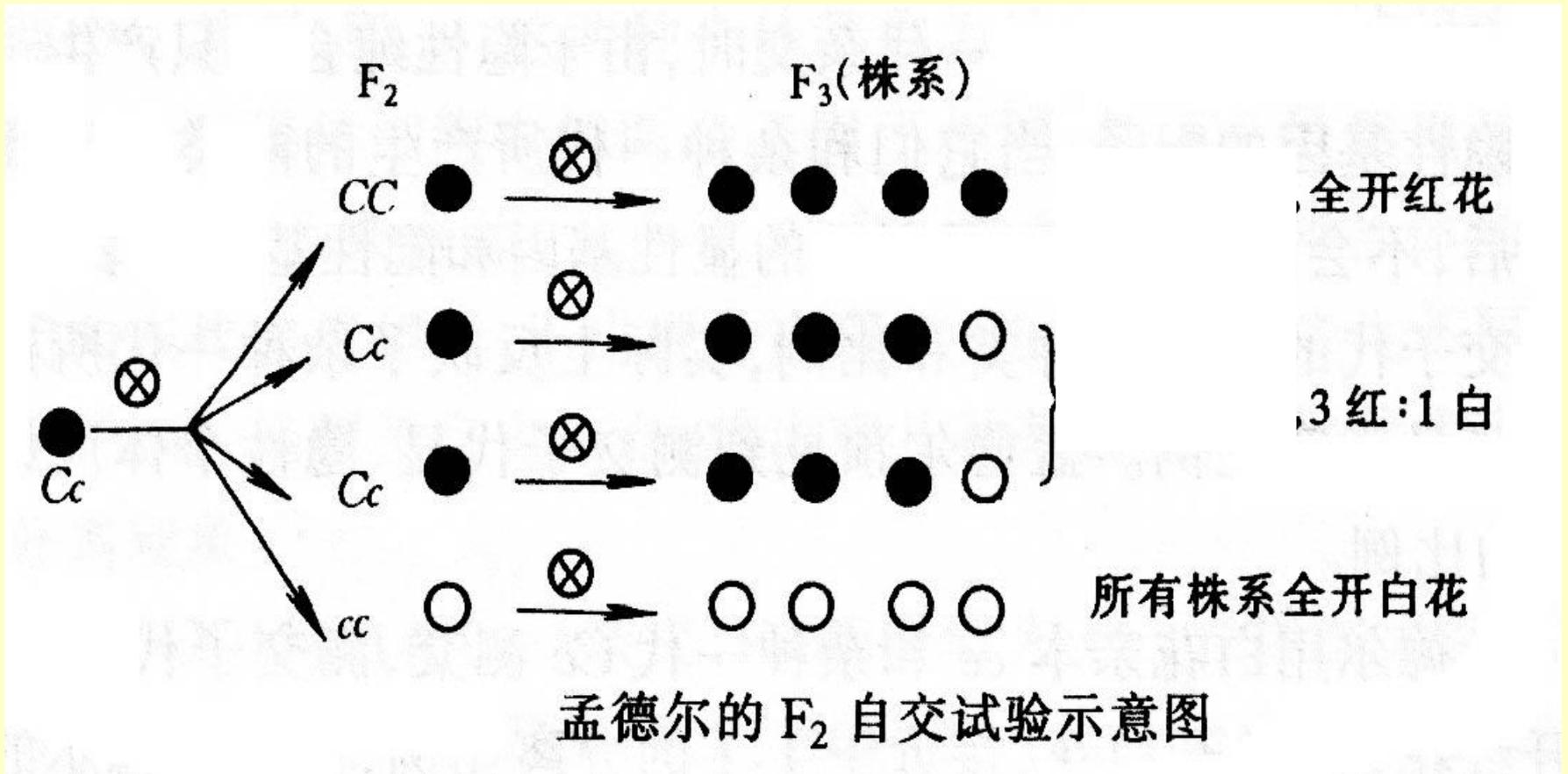


## (二)、自交法

🔔 纯合体(如CC)只产生一种类型的配子，其自交后代也都是纯合体，不会发生性状分离现象；

🔔 杂合体(如Cc)产生两种配子其自交后代会产生3:1的显性:隐性性状分离现象。

# $F_2$ 基因型及其自交后代表现推测



# $F_2$ 自交试验结果

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

- 🔔 孟德尔将 $F_2$ 代红花植株按单株收获、分装。
  - ⊙ 由一个植株自交产生的所有后代群体称为一个**株系**(line)。
- 🔔 将各株系分别种植，考察其性状分离情况。
  - ⊙ 发生性状分离：没发生性状分离趋向于2:1。
  - ⊙ 表现性状分离的株系来自杂合(Cc) $F_2$ 个体；未表现性状分离的株系来自纯合(CC) $F_2$ 个体。
- 🔔 **结论： $F_2$ 自交结果证明根据分离规律对 $F_2$ 代基因型的推测是正确的。**

## 豌豆7对相对性状显性 $F_2$ 自交后代表现

表2—2 豌豆 $F_2$ 表现显性性状的个体分别自交后的 $F_3$ 表现型种类及其比例

性 状	在 $F_3$ 表现显性：隐性 =3：1的株系数	在 $F_3$ 完全表现显性 性状的株系数	$F_3$ 株系总数
花 色	64(1.80)	36(1)	100
种子形状	372(1.93)	193(1)	565
子叶颜色	353(2.13)	166(1)	519
豆荚形状	71(2.45)	29(1)	100
未成熟豆荚色	60(1.50)	40(1)	100
花着生位置	67(2.03)	33(1)	100
植株高度	72(2.57)	28(1)	100

🔔 性状是在生物生长发育特定阶段表现，大多数性状不会在配子(体)上表现，因此无法通过配子(体)鉴定配子类型，如花色等。

🔔 有一些基因在二倍孢子体水平和配子体水平都会表现。例如玉米、水稻、高粱、谷子等禾谷类  $Wx$ (非糯性)对  $wx$ (糯性)为显性，它不仅控制籽粒淀粉粒性状，而且控制花粉粒淀粉粒性状。

# 淀粉粒性状的花粉鉴定法

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

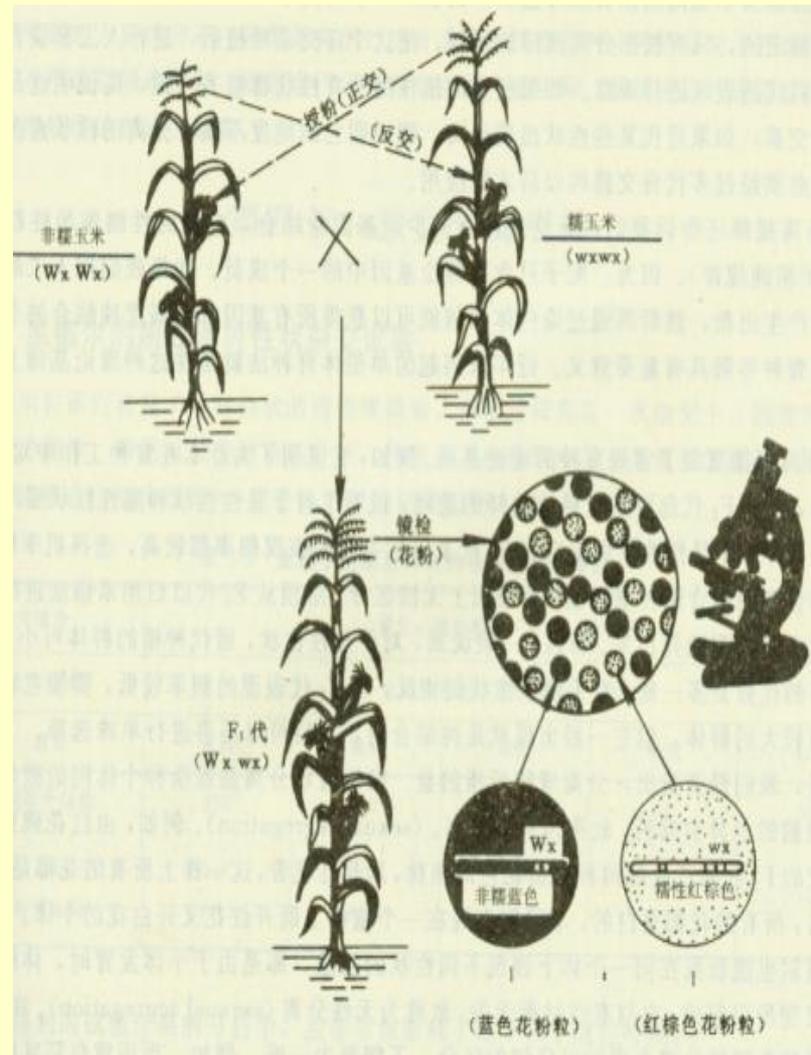
■  $Wx$ 基因：直链淀粉，  
(稀碘液) 蓝黑色

■  $wx$ 基因：支链淀粉：  
(稀碘液) 红棕色

➤ 用稀碘液处理玉米(糯性 × 非糯性) $F_1(Wxwx)$ 植株花粉，  
在显微镜下观察：

⊖ 花粉粒蓝黑色:红棕色  
≈1:1。

🔔 结论：分离规律对 $F_1$ 基因型  
及基因分离行为的推测是正  
确的



# (四)、红色面包霉杂交法

高参考价值的真题 答案 学长笔记 辅导班课程 访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

## 红色面包霉.

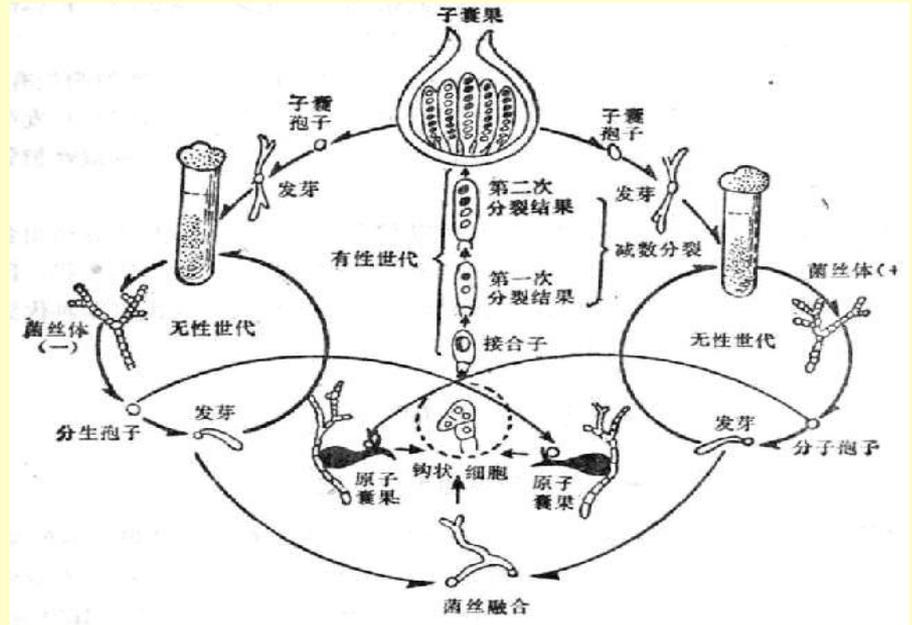
➤无性世代:

菌丝体,  $n=7$ .  
菌丝体→分生孢子  
孢子→菌丝体.

➤有性世代:

- ▶ 不同接合型的菌丝融合——接合;
- ▶ 一种接合型原子囊果与另一接合型分生孢子融合。

接合子→(减数分裂)→子囊果(四分孢子或八分孢子).



 红色面包霉减数分裂的特点：

① 每次减数分裂产生的四分孢子或八分孢子  
在子囊中呈直线排列——直列四分子/  
八分子。

② 这些特点在后面的连锁遗传分析中具有  
独特的意义。

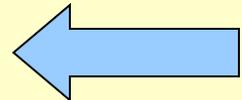
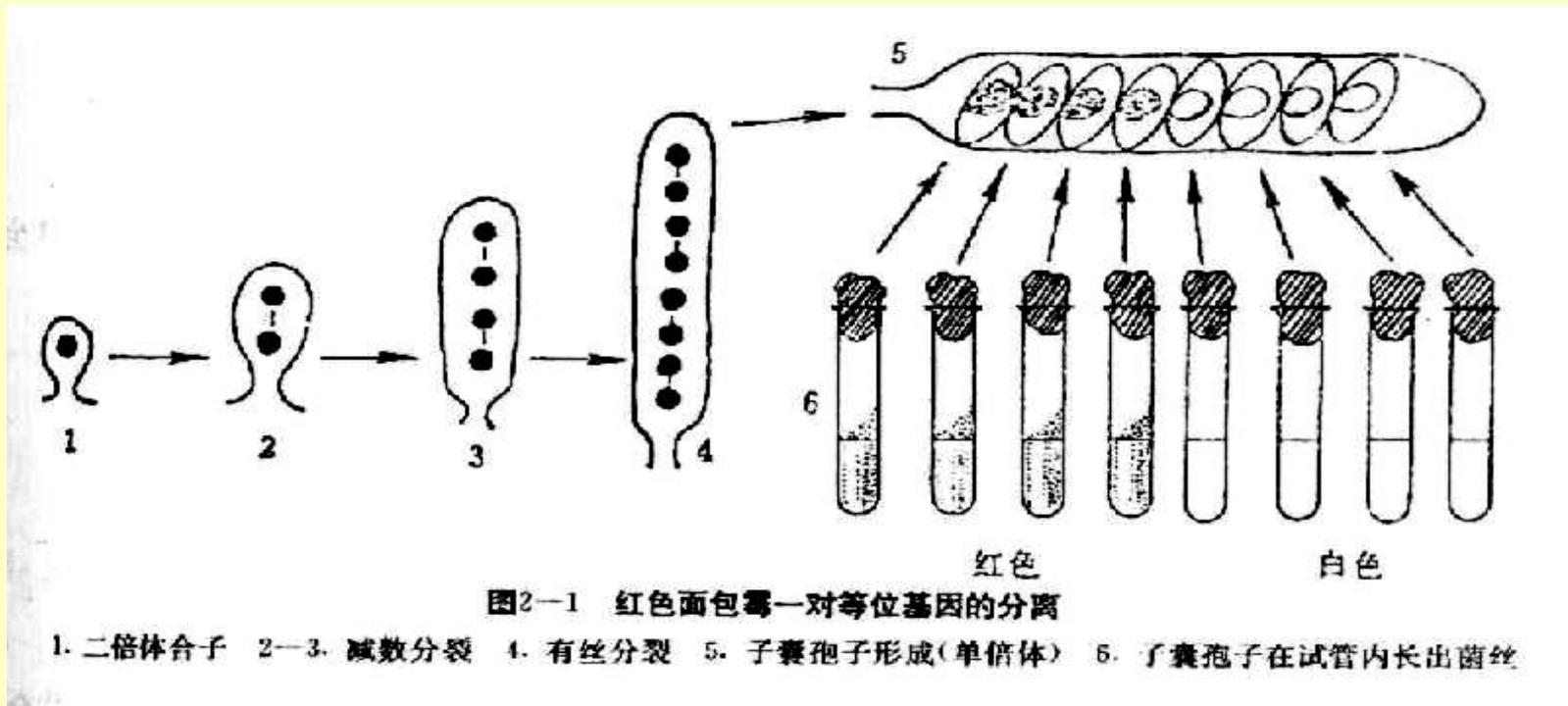
 接合子(杂合体)减数分裂产生的子囊中含  
两种类型的子囊孢子，比例为1:1。

# 红色面包霉的性状分离

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

⊙ 正常菌种：产生红色菌丝

⊙ 变种：产生白色菌丝



# 五、分离比例实现的条件

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程 访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

1. 研究的生物体必须是**二倍体**（体内染色体成对存在），并且所研究的**相对性状差异明显**。
2. 减数分裂过程中，形成的各种**配子数目相等**，或接近相等；不同类型的配子具有**同等的生活力**；受精时各种雌雄配子均能以**均等的机会相互自由结合**。
3. 受精后不同基因型的合子及由合子发育的个体具有同样或大致**同样的存活率**。
4. 杂种后代都处于**相对一致的条件**下，而且试验分析的**群体比较大**。

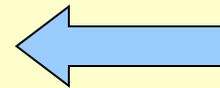
# 六、分离规律的意义与应用

## 分离规律的理论意义

- ◆从本质上阐明了控制生物性状的遗传物质是以自成单位的基因形式存在的。
- ◆从理论上说明了生物界由于杂交和分离出现变异的普遍性。

## 在遗传育种工作中的应用

- ◆良种繁育及遗传材料繁殖保存。
- ◆品种选育



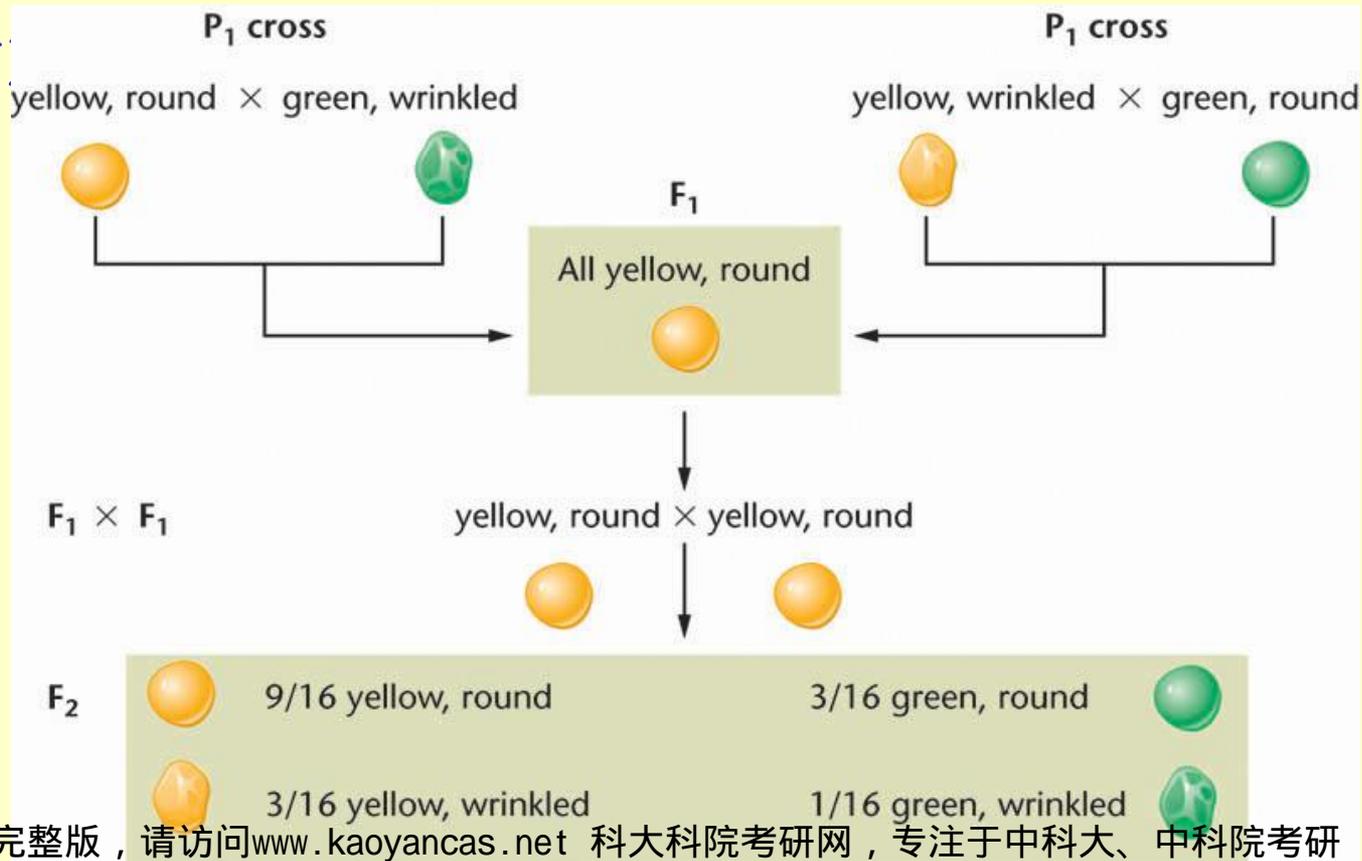
又称“自由组合规律”：两对及两以上相对性状(等位基因)在世代传递过程中表现出来的相互关系

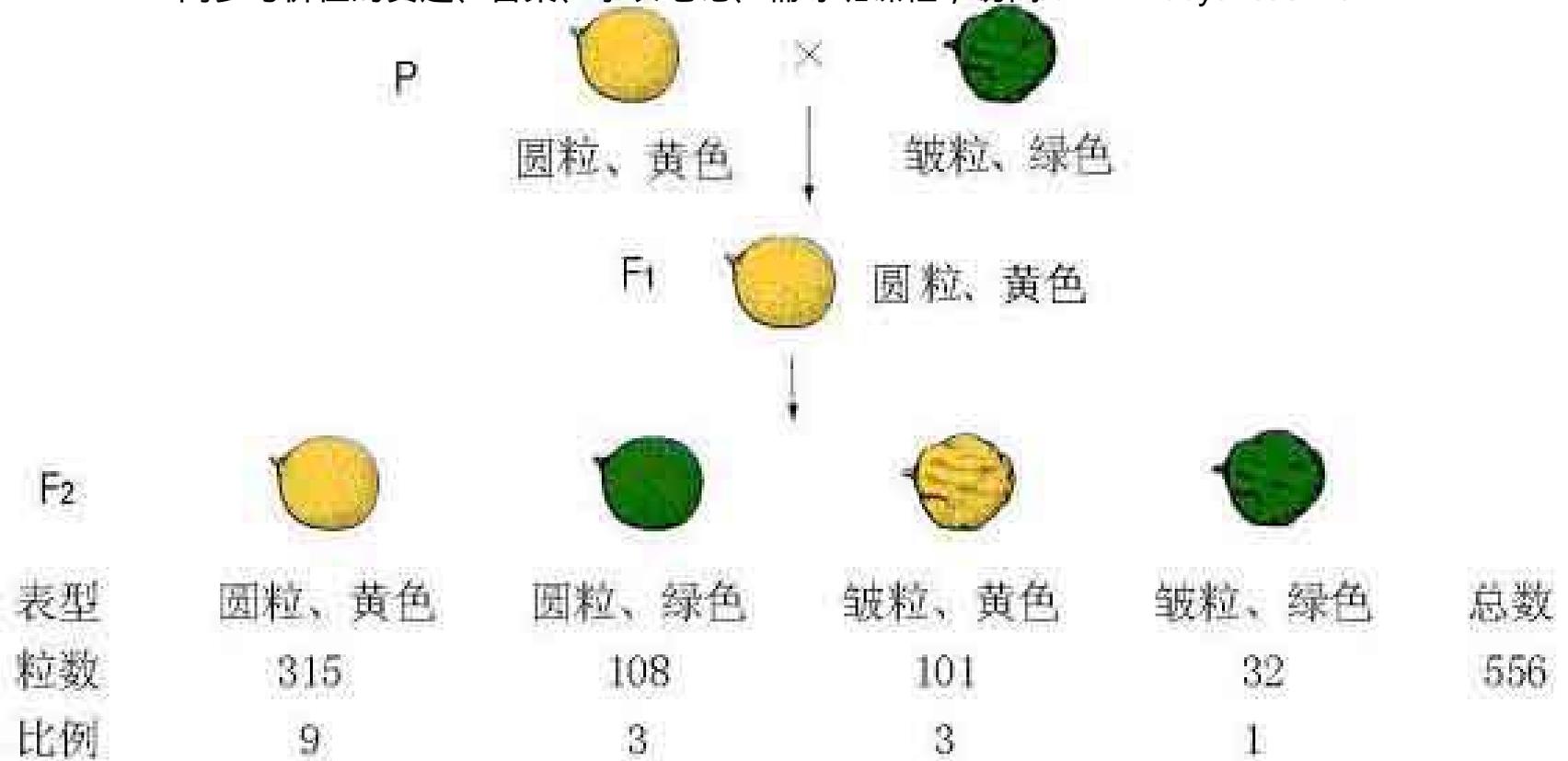
- 一、两对相对性状的遗传
- 二、独立分配现象的解释
- 三、独立分配规律的验证
- 四、多对相对性状的遗传
- 五、独立分配规律的应用

# 一、两对相对性状的遗传

豌豆的两对相对性状：

- 子叶颜色：黄色子叶 (Y) 对绿色子叶 (y) 为显性；
- 种子





**杂种后代的表现：F<sub>1</sub>两性状均只表现显性状，F<sub>2</sub>出现四种表现型类型(两种亲本类型、两种重新组合类型)，比例接近9:3:3:1。**

# 一、两对相对性状的遗传

对每对相对性状分析发现：它们仍然符合3:1的性状分离比；

黄色：绿色 =  $(315+101) : (108+32) = 416 : 140 \approx 3:1$ 。

圆粒：皱粒 =  $(315+108) : (101+32) = 423 : 133 \approx 3:1$ 。

表明：子叶颜色和籽粒形状彼此独立地传递给子代，两对相对性状在从 $F_1$ 传递给 $F_2$ 时，**是随机组合的。**

# 两对相对性状的自由组合

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

- ❖ 两独立事件同时发生的概率等于各个事件单独发生概率的乘积(概率定律);
- ❖ 因此在F<sub>2</sub>代中，黄圆、黄皱、绿圆、绿皱四种类型的概率(理论比例):

$$\begin{array}{l} \text{黄色} \frac{3}{4} : \text{绿色} \frac{1}{4} \\ \times \quad \text{圆粒} \frac{3}{4} : \text{皱粒} \frac{1}{4} \end{array}$$

---

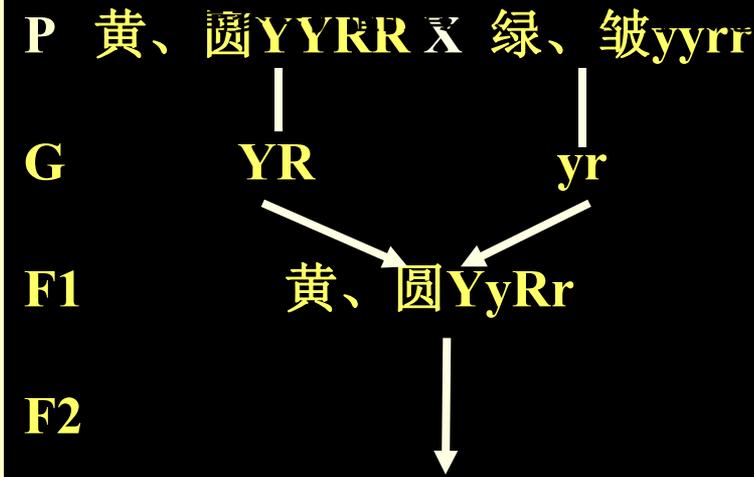
$$\text{黄圆} \frac{9}{16} : \text{黄皱} \frac{3}{16} : \text{绿圆} \frac{3}{16} : \text{绿皱} \frac{1}{16}$$

### ❖ 独立分配规律的基本要点：

➤ 控制不同相对性状的等位基因在配子形成过程中的分离与组合是互不干扰的，各自独立分配到配子中去。

### ❖ 棋盘方格(punnett square)图示两对等位基因的分离与组合：

- 亲本的基因型及配子基因型；
- 杂种 $F_1$ 配子的形成(种类、比例)；
- $F_2$ 可能的组合方式；
- $F_2$ 的基因型和表现型(种类、比例)。



棋盘方格图，示：  
Y/y与R/r两对基因独立分配

♀ \ ♂	YR	Yr	yR	yr
YR	<b>YYRR</b> 黄圆	<b>YYRr</b> 黄圆	<b>YyRR</b> 黄圆	<b>YyRr</b> 黄圆
Yr	<b>YYRr</b> 黄圆	<b>YYrr</b> 黄皱	<b>YyRr</b> 黄圆	<b>Yyrr</b> 黄皱
yR	<b>YyRR</b> 黄圆	<b>YyRr</b> 黄圆	<b>yyRR</b> 绿圆	<b>yyRr</b> 绿圆
yr	<b>YyRr</b> 黄圆	<b>Yyrr</b> 黄皱	<b>yyRr</b> 绿圆	<b>yyrr</b> 绿皱

# $F_2$ 的基因型、表现型类型与比例

### 豌豆黄色、圆粒 × 绿色、皱粒的 $F_2$ 基因型和表现型的比例

表现型	基因型	基因型比例	表现型比例
Y-R-黄、圆	YYRR	1	9
	YyRR	2	
	YYRr	2	
	YyRr	4	
Y-rr黄、皱	YYrr	1	3
	Yyrr	2	
yyR-绿、圆	yyRR	1	3
	yyRr	2	
yyrr绿、皱	yyrr	1	1

❖ 独立分配规律的实质(细胞学基础):

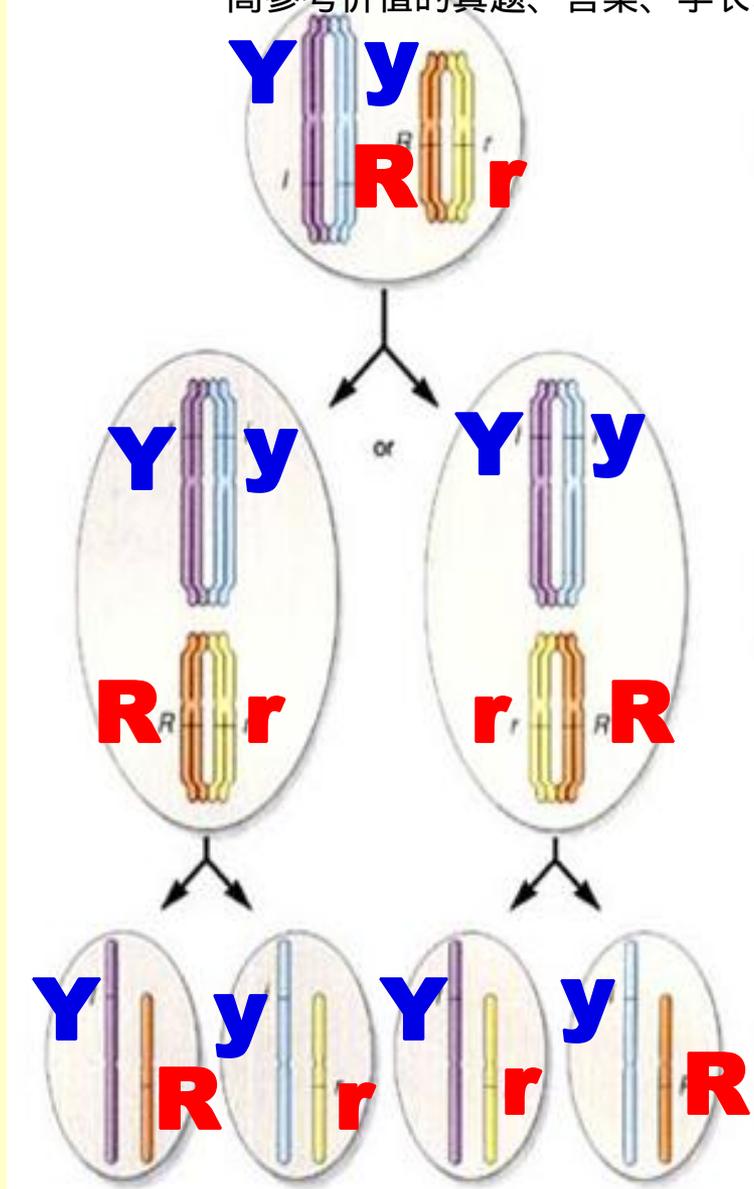
- ▶ 控制两对相对性状的两对等位基因，分别位于不同的同源染色体上。
- ▶ 在减数分裂形成配子时，同源染色体上相互分离，而非同源染色体(非等位基因, non-allele)自由组合到配子中。

Y, y 位于豌豆第1染色体；  
R, r 位于豌豆第7染色体。

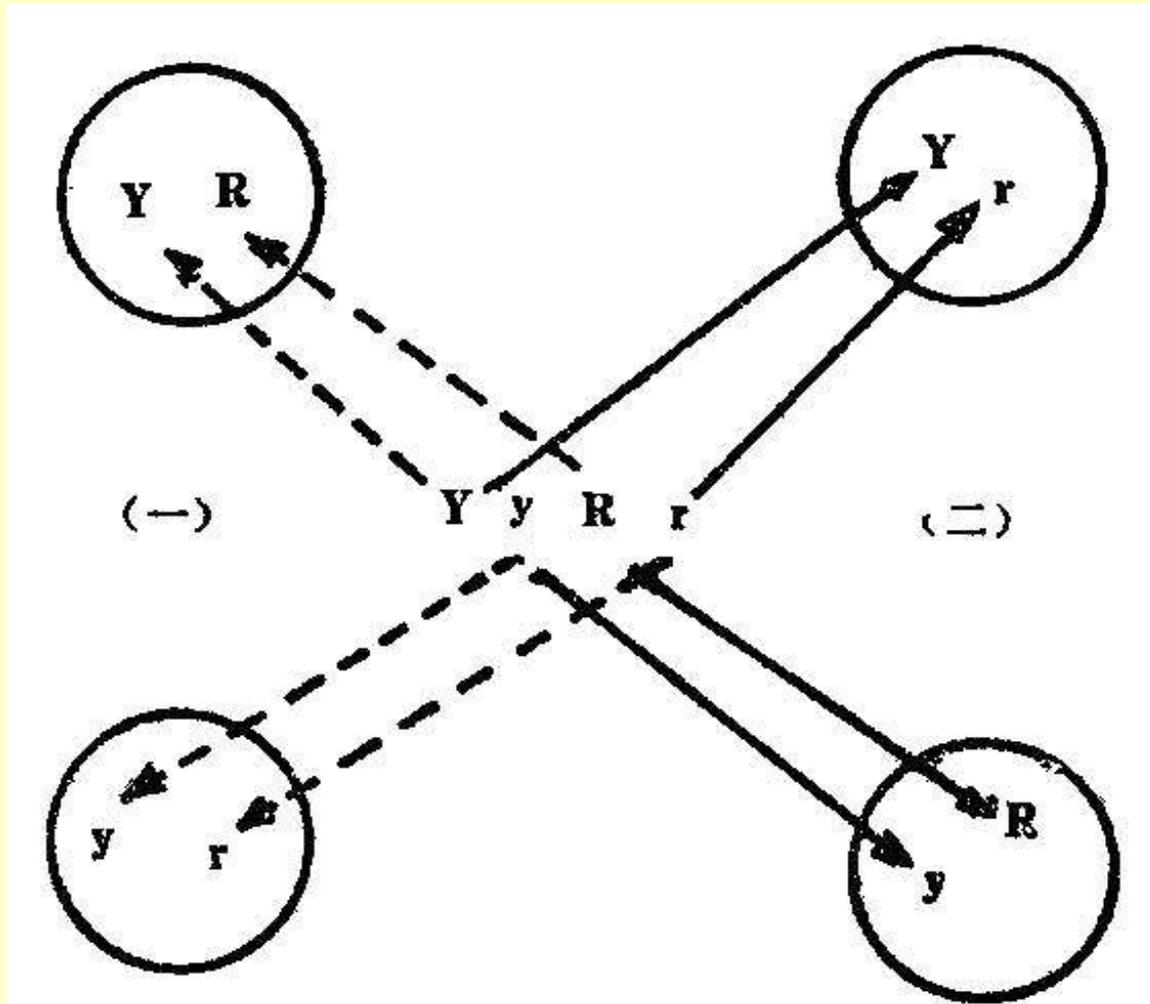
a In *YyRr* cell at prophase I, the homologous chromosomes pair.

b There are two possible alignments of the chromosomes during metaphase I, each of which is equally likely.

c Four types of gametes arise in equal proportions as the products of meiosis II.



# 双杂合体 $F_1$ ( $YyRr$ ) 四种类型配子形成示意图



$RrYy$  两对杂合基因的两种分离方式



配子



F<sub>1</sub>



×



F<sub>2</sub>

	YR	Yr	yR	yr
YR	YYRR	YYRr	YyRR	YyRr
Yr	YYRr	YYrr	YyRr	Yyrr
yR	YyRR	YyRr	yyRR	yyRr
yr	YyRr	Yyrr	yyrR	yyrr

## 三、独立分配规律的验证

---

(一)、测交法

(二)、自交法

# 测交法

## 1. F<sub>1</sub>配子类型、比例及与双隐性亲本测交结果预期 2. 实际测交试验结果 3. 结论

豌豆黄、圆×绿、皱的 F<sub>1</sub> 与双隐性亲本测交结果

(F<sub>1</sub>)黄、圆YyRr×绿、皱yyrr

		雌配子				雄配子
		YR	Yr	yR	yr	yr
理论期望的 测交子代	基因型	YyRr	Yyrr	yyRr	yyrr	
	表现型	黄、圆	黄、皱	绿、圆	绿、皱	
	表现型比例	1	1	1	1	
孟德尔的实际测交结果	F <sub>1</sub> 为母本	31	27	26	26	
	F <sub>1</sub> 为父本	24	22	25	26	

## (二)、自交法

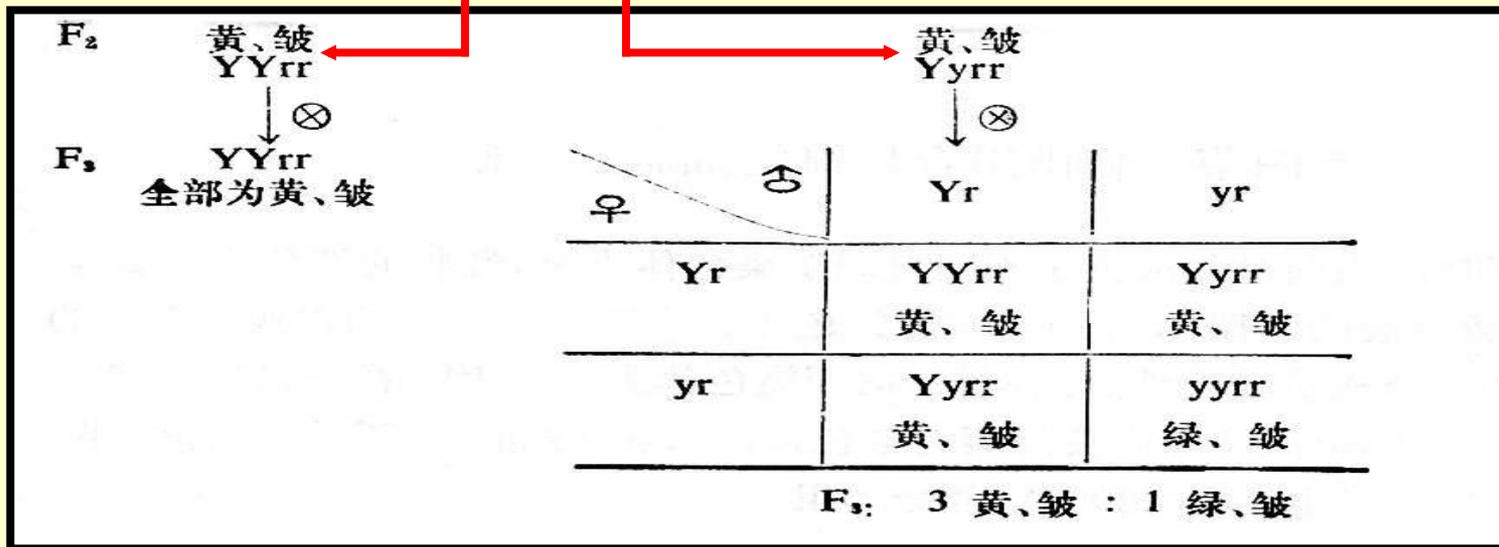
高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

### F<sub>2</sub>各类表现型、基因型

❖ 4种表现型：只有1种的基因型唯一，后代无性状分离

❖ 9种基因型：

- 4种不会发生性状分离，两对基因均纯合；
- 4种会发生3:1的性状分离，一对基因杂合；
- 1种会发生9:3:3:1的性状分离，双杂合基因型。



## 四、多对相对性状的遗传

---

- (一)、多对相对性状独立分配的条件
- (二)、用分枝法分析多对相对性状遗传
- (三)、用二项式法分析多对相对性状遗传
- (四)、 $n$ 对相对性状的遗传

## (一)、多对相对性状独立分配的条件

- ❖ 根据独立分配规律的细胞学基础可知：
  - 非等位基因的自由组合实质是非同源染色体在减数分裂AI的自由组合；
  - 决定各对性状的各对基因分别位于非同源染色体上，性状间就必然符合独立分配规律。
    - ✓ 不位于同一条染色体上的非等位基因间。

## (二)、用分枝法分析多对相对性状遗传

### ❖ 分枝法：

➤ 由于各对基因的分离是独立的，所以可以**依次分析**各对基因/相对性状的分离类型与比例(概率)。

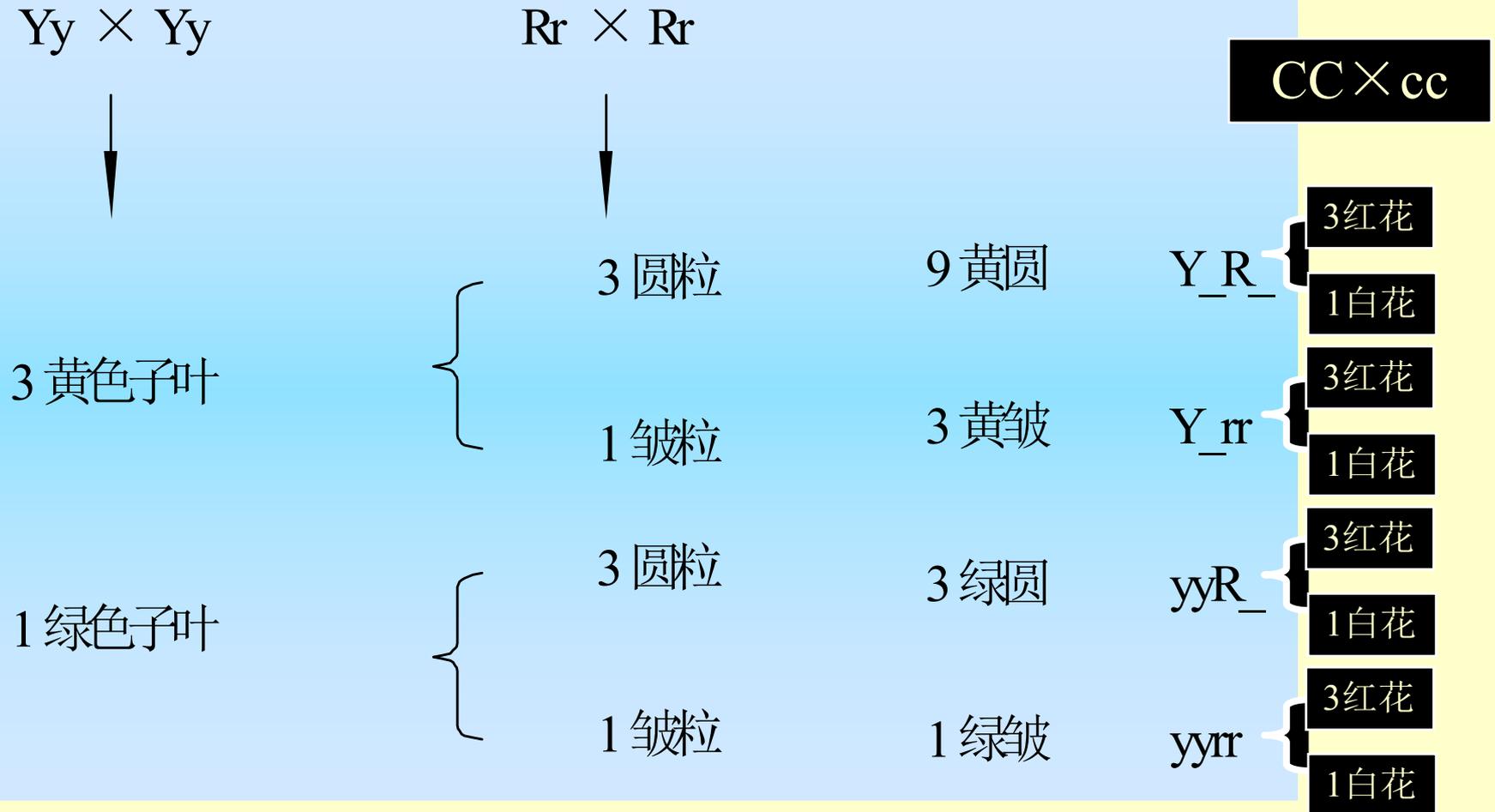
### ❖ 两对相对性状遗传分析：

- $F_2$ 表现型类型与比例的推导；
- $F_2$ 基因型类型与比例的推导。

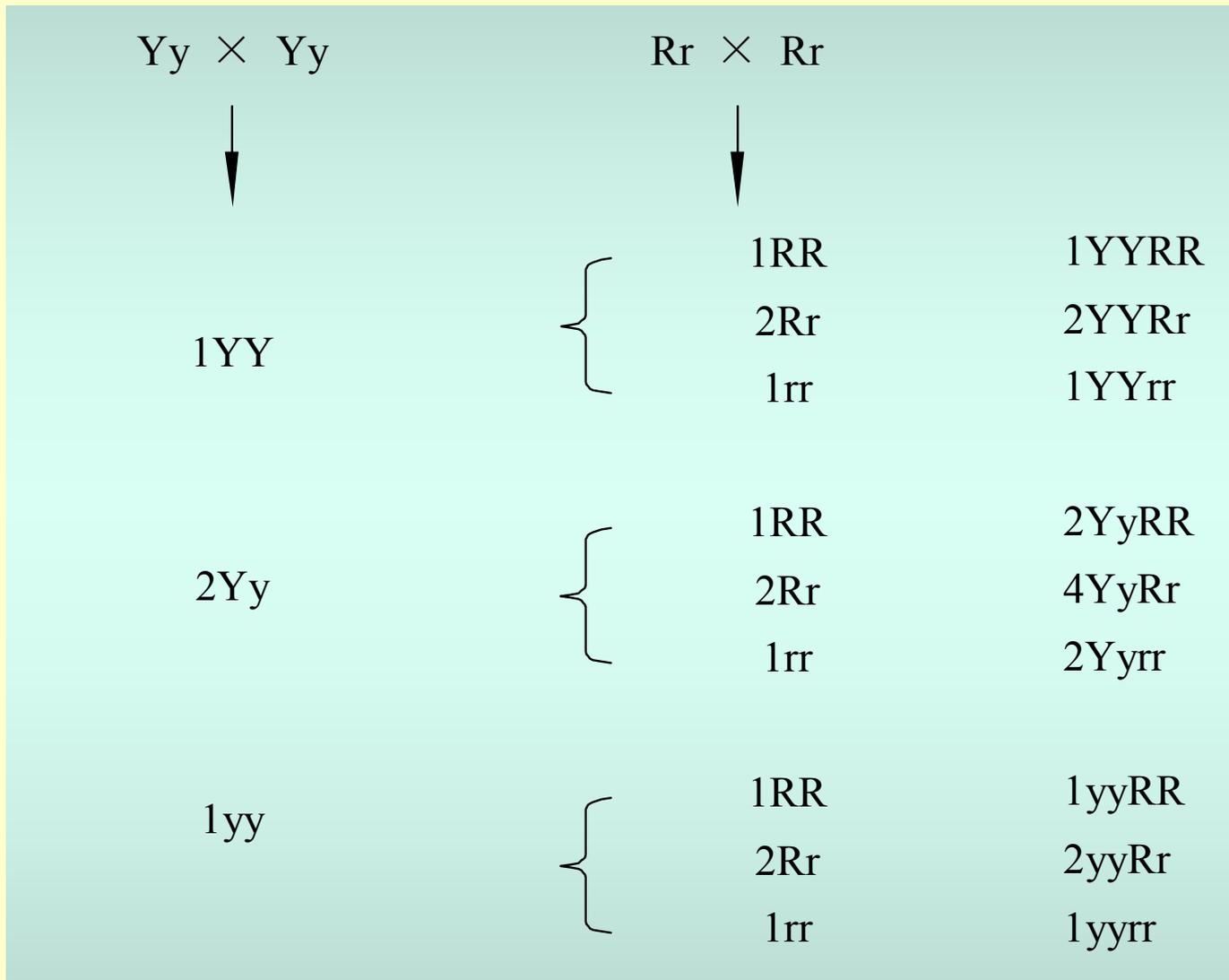
### ❖ 三对相对性状遗传分析：

- $F_2$ 表现型类型与比例的推导；
- $F_2$ 基因型类型与比例的推导

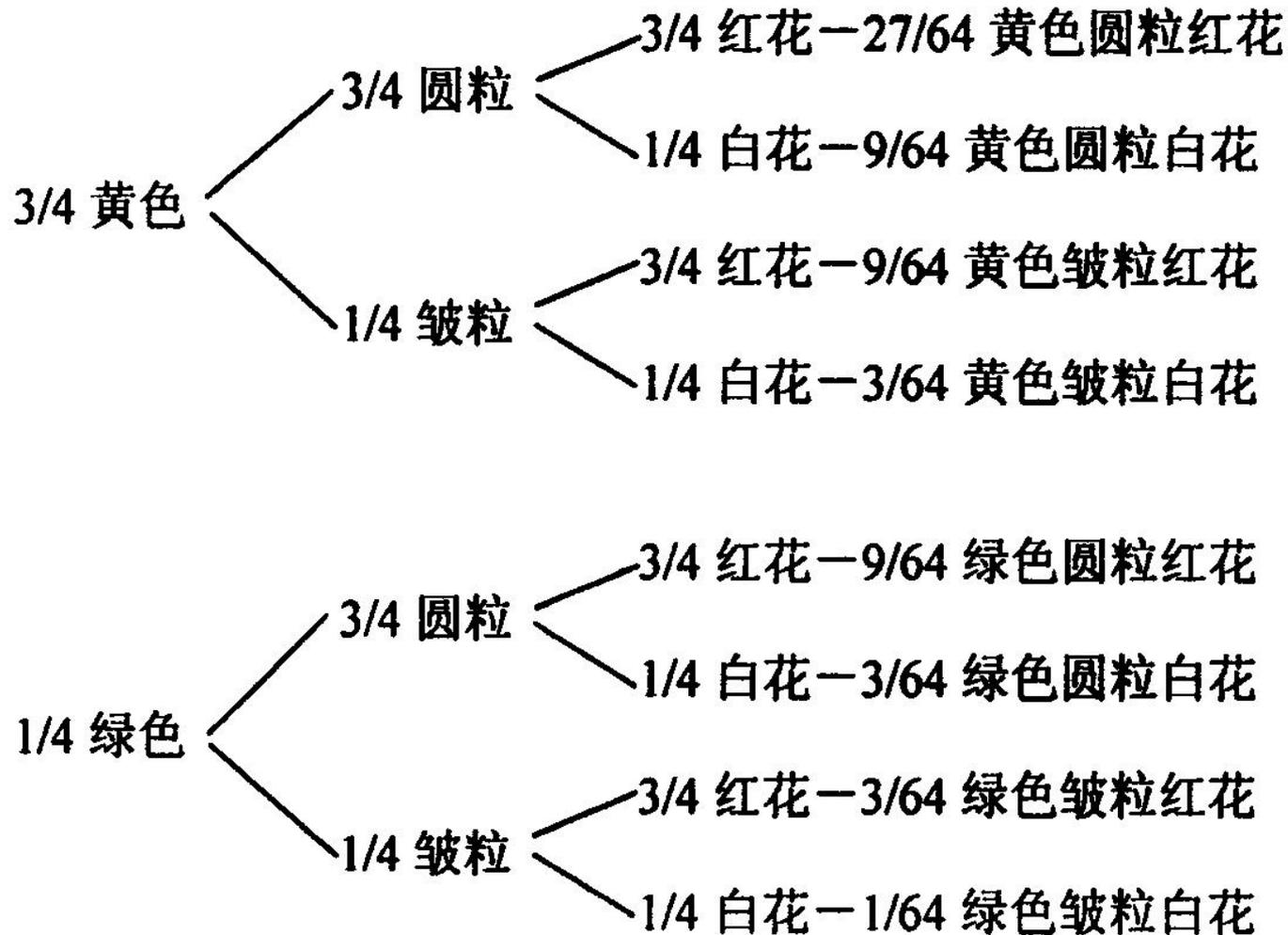
# 两对相对性状遗传分析：表现型



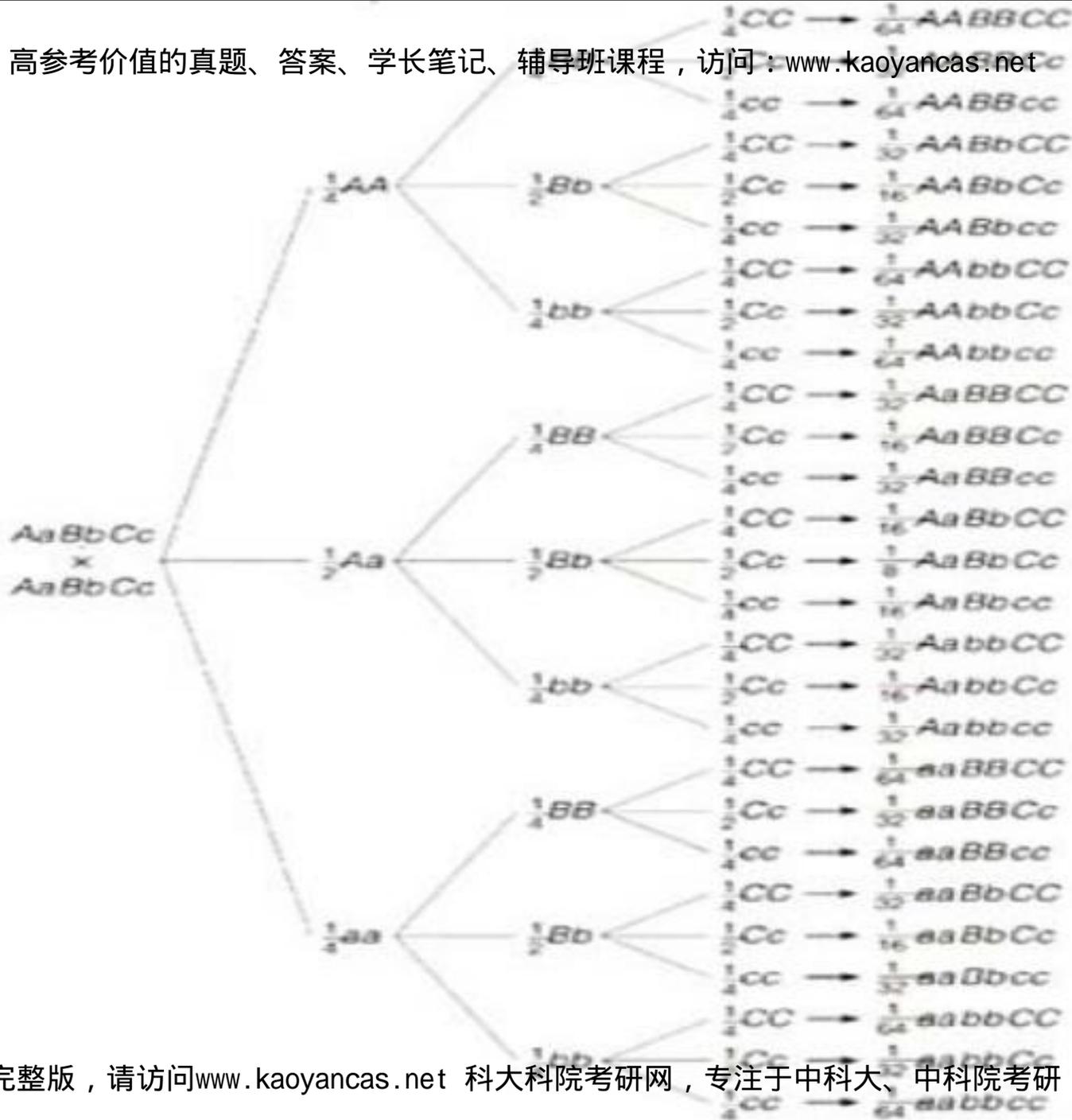
# 两对相对性状遗传分析：基因型



# 三对相对性状遗传分析：表现型



高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)



完整版，请访问[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net) 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

表 4-4 豌豆黄色、圆粒、红花×绿色、皱粒、白花的 F<sub>2</sub> 基因型、表现型及其 F<sub>3</sub> 分离的比例

基因型	表现型	F <sub>3</sub> 分离比例
YYRRCC	黄色 圆粒 红花	27
YyRRCC		
yyRRCC	绿色 圆粒 红花	9
yyRrCC		
yyRRCc		
yyRrCc		
YYrrCC	黄色 皱粒 红花	9
YyrrCC		
YYrrCc		
YyrrCc		
YYRRcc	黄色 圆粒 白花	9
YyRRcc		
YYRrcc		
YyRrcc		
yyrrCC	绿色 皱粒 红色	3
yyrrCc		
YYrrcc	黄色 皱粒 白花	3
Yyrrcc		
yyRRcc	绿色 圆粒 白花	3
yyRrcc		

完整版，请访问 [www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net) 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

## (三)、用二项式法分析多对相对性状遗传

### ❖ 一对基因 $F_2$ 的分离(完全显性情况下):

➤ 表现型：种类： $2^1=2$ ，比例：显性:隐性

$= (3:1)^1$ ;

➤ 基因型：种类： $3^1=3$ ，比例：显纯:杂合:隐纯

$= (1:2:1)^1$ ;

### ❖ 两对基因 $F_2$ 的分离(完全显性情况下):

➤ 表现型：种类： $2^2=4$ ，比例： $(3:1)^2=9:3:3:1$ ;

➤ 基因型：种类： $3^2=9$ ，比例：

$(1:2:1)^2=1:2:1:2:4:2:1:2:1$ 。

### ❖ 三对/n对相对性状的遗传(完全显性情况下)

➤ 表4-5

## 三对( $n$ 对)基因独立遗传

豌豆：黄色圆粒红花( $YYRRCC$ ) $\times$ 绿色皱粒白花( $yyrrcc$ );

- 杂种 $F_1$ ：黄色圆粒红花( $YyRrCc$ );
- $F_1$ 产生的配子类型：8种 ( $2^n$ );
- $F_2$ 可能组合数：64种 ( $2^{2n}$ );
- $F_2$ 基因型种类：27种 ( $3^n$ );
- $F_2$ 表现型种类：8种 ( $2^n$ , 完全显性情况下);

表 4-5 杂种杂合基因对数与 F<sub>2</sub> 表现型和基因型种类的关系

杂种杂合 基因对数	显性完全时 F <sub>2</sub> 表现型种类	F <sub>1</sub> 形成的 不同配子 种类	F <sub>2</sub> 基因型 种类	F <sub>1</sub> 产生的雌雄 配子的可能组 合数	F <sub>2</sub> 纯合基 因型种类	F <sub>2</sub> 杂合基 因型种类	F <sub>2</sub> 表现型 分离比例
1	2	2	3	4	2	1	(3: 1) <sup>1</sup>
2	4	4	9	16	4	5	(3: 1) <sup>2</sup>
3	8	8	27	64	8	19	(3: 1) <sup>3</sup>
4	16	16	81	256	16	65	(3: 1) <sup>4</sup>
5	32	32	243	1024	32	211	(3: 1) <sup>5</sup>
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
n	2 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup>	4 <sup>n</sup>	2 <sup>n</sup>	3 <sup>n</sup> - 2 <sup>n</sup>	(3: 1) <sup>n</sup>

# 五、独立分配规律的应用

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

## ❖ 理论意义：

➤ 揭示了位于非同源染色体上基因间的遗传关系；

➤ 解释了生物性状变异产生的另一个重要原因——非等位基因间的自由组合。

✓ **完全显性**时， $n$ 对染色体的生物可能产生 $2^n$ 种组合。

## ❖ 在遗传育种中的应用

➤ 有目的地选配杂交亲本，通过杂交育种将多个亲本的目标性状集合到一个品种中；或者对受多对基因控制的性状进行育种选择；

➤ 可以预测杂交后代分离群体的基因型、表现型结构，确定适当的杂种后代群体种植规模。



# 第3节 遗传学数据的统计处理

---

- 一、概率原理
- 二、二项式展开
- 三、 $\chi^2$ 测验

# 一、概率原理与应用

---

## 乘法定理：

两个独立事件同时发生的概率等于各个事件发生的概率的乘积。

## 加法定理：

两个互斥事件的和事件发生的概率是各个事件各自发生的概率之和。

## 二、二项式展开式与应用

根据给定条件确定 $p$ 、 $q$ 、 $n$ 以及要求推算项的 $r$ 值。

$$(p+q)^n = p^n + np^{n-1}q + \frac{n(n-1)}{2!}p^{n-2}q^2 + \cdots + \frac{n!}{r!(n-r)!}p^r q^{n-r} + \cdots + q^n$$

## 三、 $\chi^2$ 平方测验及应用

◆按公式计算 $\chi^2$ 值；

◆当 $\chi^2 < \chi^2_{0.05, k-1}$ 时接受无效假设，反之接受备择假设。

从表中直接从表中查得 $\chi^2$ 对应用概率值 $P(\chi^2)$ ，当 $P(\chi^2) > 0.05$ 时，接受无效假设(差异不显著)。

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$$

# $\chi^2$ 检验应用实例

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

表 4-7 孟德尔两对基因杂种自交结果的测验

	圆、黄	圆、绿	皱、黄	皱、绿	总数
实测值(O)	315	108	101	32	556
理论值(E)	312.75	104.25	104.25	34.75	556
(O - E)	2.25	3.75	-3.25	-2.75	0
(O - E) <sup>2</sup>	5.06	14.06	10.56	7.56	
$\frac{(O - E)^2}{E}$	0.016	0.135	0.101	0.218	
$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$	$\chi^2 = 0.016 + 0.135 + 0.101 + 0.218 = 0.47$				

注：理论值是由总数 556 粒种子按 9：3：3：1 分配求得的。

表 4-8  $\chi^2$  高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

$P$ $df$	0.99	0.95	0.90	0.80	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10	0.05	0.01
1	0.00016	0.04	0.016	0.064	0.148	0.455	1.074	1.642	2.706	3.841	6.635
2	0.0201	0.103	0.211	0.446	0.713	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	9.210
3	0.115	0.352	0.584	1.005	1.424	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	11.345
4	0.297	0.711	1.064	1.649	2.195	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	13.277
5	0.554	1.145	1.610	2.343	3.000	4.351	6.064	7.269	9.236	11.070	15.086
6	0.872	1.635	2.204	3.070	3.828	5.345	7.231	8.588	10.645	12.592	16.812
7	1.239	2.167	2.833	3.822	4.671	6.346	8.783	9.803	12.017	14.067	18.475
8	1.646	2.733	3.490	4.594	5.527	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	20.090
9	2.088	3.325	4.168	5.380	6.393	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	21.666
10	2.558	3.940	4.865	6.179	7.627	9.342	11.781	13.442	15.987	18.307	23.209

表内数字是各种  $\chi^2$  值， $df$  为自由度， $P$  是在一定自由度下  $\chi^2$  大于表中数值的概率



## 第4节 孟德尔规律的补充和发展

---

- 一、显隐性关系的相对性
- 二、复等位基因和致死基因（基因突变）
- 三、非等位基因的相互作用
- 四、多因一效和一因多效

# 一、显隐性关系的相对性

---

## (一)、显性现象的表现

显隐性关系的四种类型：

1. 完全显性(**complete dominance**)
2. 不完全显性(**incomplete dominance**)
3. 共显性(**codominance**)
4. 镶嵌显性(**mosaic dominance**)

# 1. 完全显性

孟德尔对豌豆七对相对性状的研究表明：  
杂合体( $F_1$ )总是表现为亲本之一的性状(显性性状)；

也就是说杂合体表现型由等位基因之一(显性基因)决定——**完全显性**

## 2. 不完全显性

### ◎杂种 $F_1$ 表现：

◇为两个亲本的中间类型或不同于两个亲本的新类型；

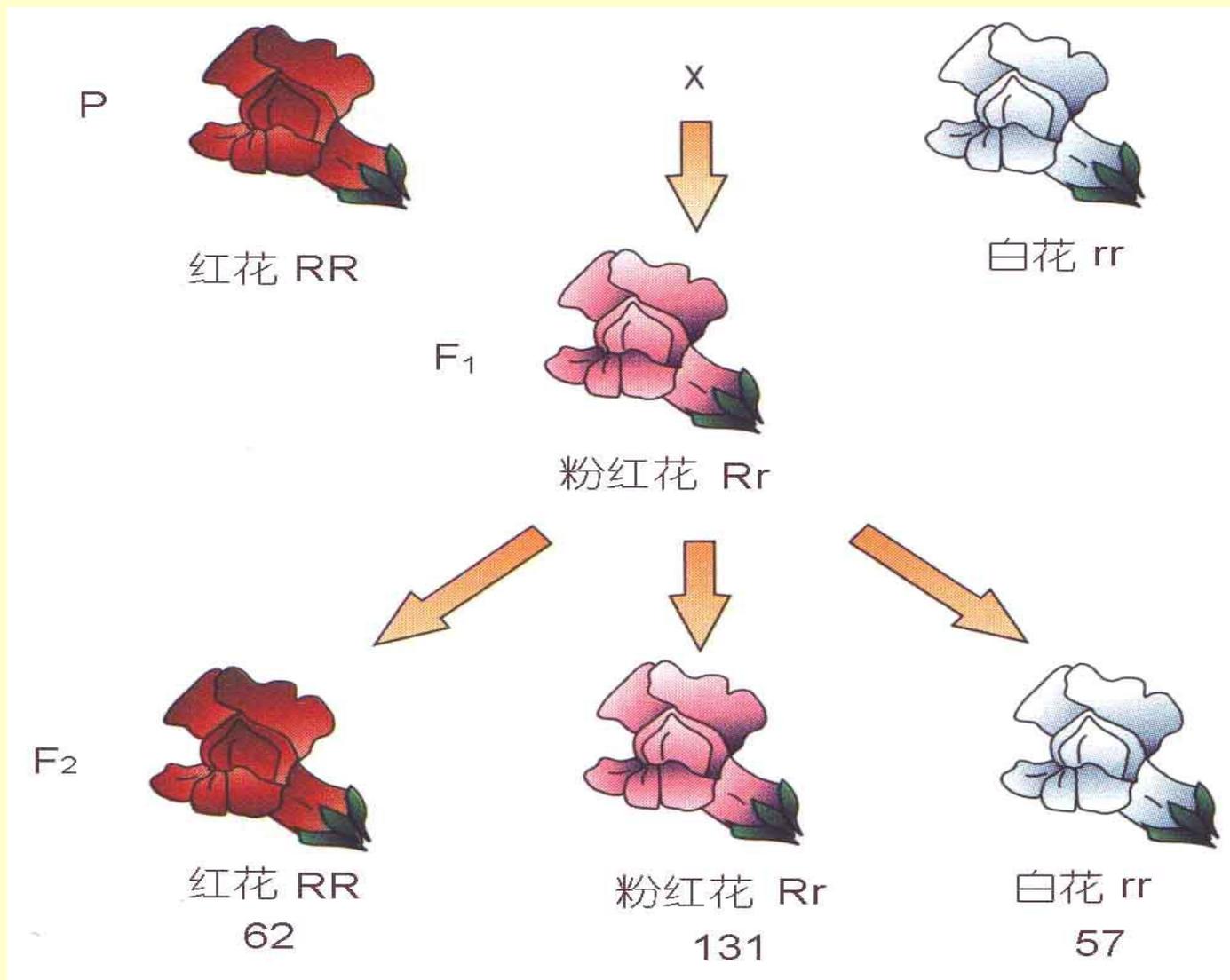
### ◎ $F_2$ 则表现：

◇父本类型、中间类型(新类型)和母本三种类型，呈1:2:1的比例。

◎表现型和基因型的种类和比例相对应，从表现型可推断其基因型。

# 例1 金鱼草花色遗传

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)





### 3. 共显性 (*codominance*)

---

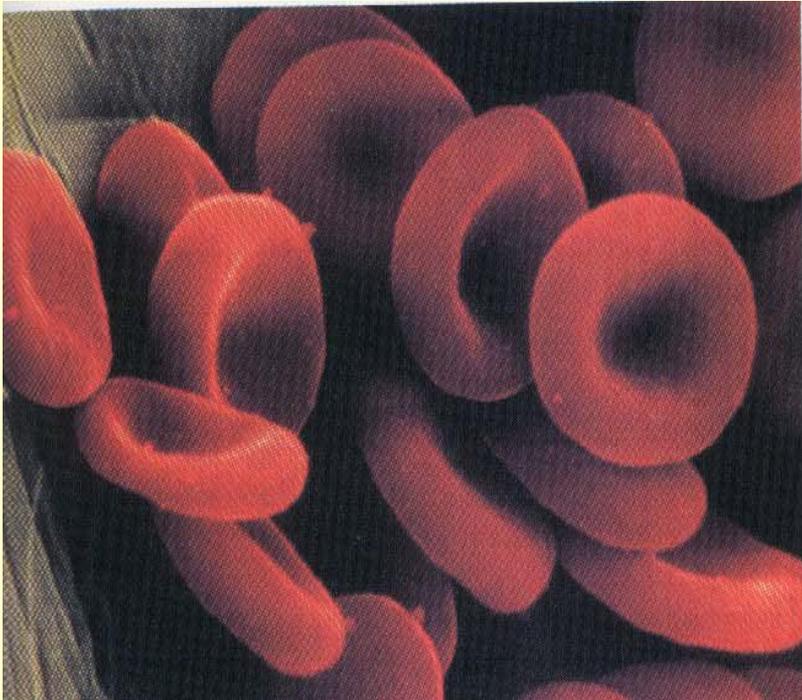
◎两个纯合亲本杂交：

◇ $F_1$  同时出现两个亲本性状；

◇ $F_2$  也表现为三种表现型，其比例为1:2:1。

◎表现型和基因型的种类和比例也是对应的。

- ◎ 正常人红细胞呈碟形，镰(刀)形贫血症患者的红细胞呈镰刀形；
- ◎ 镰形贫血症患者和正常人结婚所生的子女( $F_1$ )红细胞既有碟形，又有镰刀形。



## 4. 镶嵌显性(mosaic dominance)

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

◎双亲的性状  
在后代同一个个  
体不同部位表  
现出来，形成  
镶嵌图式。

◎与共显性并  
没有实质差异。

例1：黄豆与黑豆杂交：

◇ $F_1$ 的种皮颜色为黑黄镶嵌  
(俗称花脸豆)；

◇ $F_2$ 表现型为1/4黄色种皮、  
2/4黑黄镶嵌、1/4黑色种皮。

例2：黑缘型鞘翅瓢虫 ( $S^{AU} S^{AU}$ ,  
翅前缘黑色) 与均色型瓢虫  
 $S^{SE} S^{SE}$ , 翅后缘黑色) 杂交,  $F_1$   
( $S^{AU} S^{SE}$ ) 前后缘均为黑色。

## (二)、显隐性关系的相对性

---

◎显性作用类型之间往往没有严格的界限，只是根据对性状表现的观察和分析进行的一种划分，因而显隐性关系是相对的。

◎不同的观察和分析的水平或者不同的分析角度看，相对性状间可能表现不同显隐性关系。

# 例1 豌豆种子形状与淀粉粒

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

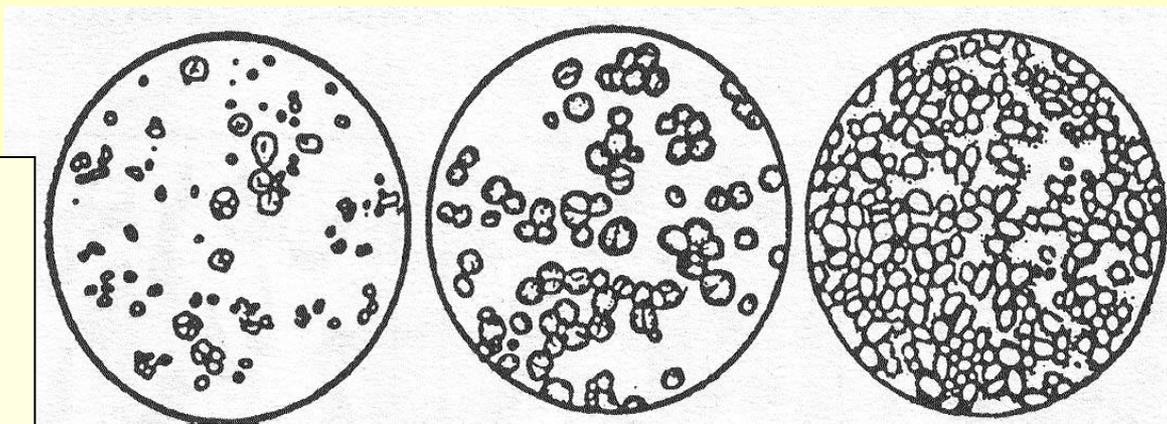
●孟德尔，圆粒对皱粒是完全显性。

●用显微镜检查豌豆种子淀粉粒发现：

◇纯合圆粒淀粉粒：持水力强，发育完善，结构饱满；

◇纯合皱粒淀粉粒：持水力较弱，发育不完善，皱缩；

◇杂种 $F_1$ 淀粉粒：发育和结构是两者中间型，而外形为圆粒。



在显微镜下看到的豌豆淀粉粒

右 饱满豆粒的淀粉(大多数是球形到卵圆形,数目多)

左 皱缩豆粒的淀粉(多角形,有放射状裂纹,数目少)

中 子一代豆粒的淀粉(形状和数目在前两者之间)

●从种子外表观察，圆粒对皱粒是完全显性；但淀粉粒的形态结构则是不完全显性。

## 例2 镰刀形贫血病的遗传

◎从红细胞形状上看，镰刀形贫血病属于共显性遗传。

◎从病症表现上来看，又可认为镰刀形贫血病是不完全显性(表现为两种纯合体的中间类型)。

◇基因型纯合的贫血病人经常性表现为贫血；

◇杂合体在一般情况下表现正常，而在缺氧的条件下会表现为贫血。

## (三)、基因作用的代谢基础

- ◎ 显隐性关系实际就是等位基因间作用的结果。那么杂合状态下等位基因间如何作用呢？
- ◎ 等位基因间往往不是基因彼此直接作用，而是分别控制各自所决定的代谢过程，在代谢水平上相互作用从而控制性状发育。

# (三) 基因作用的代谢基础

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

◎兔子的皮下脂肪有白色和黄色。白脂肪的纯种兔子(YY)和黄脂肪的纯种兔子(yy)杂交

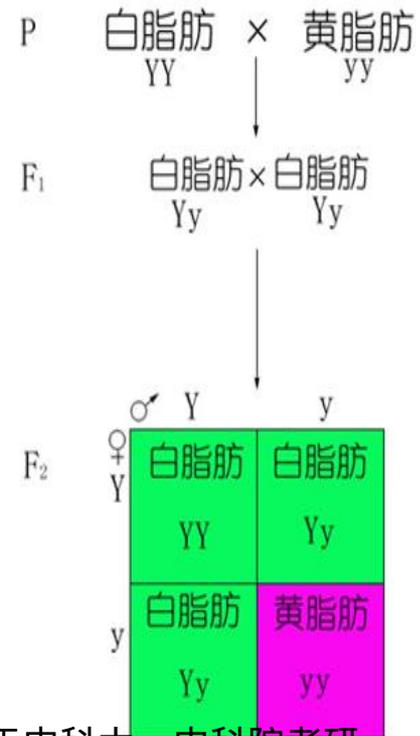
◇F<sub>1</sub>(Yy)脂肪为白色；

◇F<sub>2</sub>群体中，3/4白脂肪，1/4黄脂肪。

代谢水平分析发现，脂肪颜色由一系列代谢过程决定

绿色植物(黄色素)→脂肪中积累→呈黄色(yy)；

黄色素→(YY/Yy:黄色素分解酶)→脂肪中无黄色素积累→白色(YY)。



◎ 上世纪初有一种倾向：明显符合孟德尔式遗传的性状才是遗传的；受环境影响的性状是由环境所决定，与遗传无关。

◎ 事实上，生物的性状是遗传与环境共同作用的结果。

◎ 影响性状表现的环境分外环境和内环境(生理环境)。不同性状受环境影响的程度不同：

◇ 一些性状通常不受环境条件影响而发生表现类型明显改变，如CC开红花，cc开白花。

◇ 还有一些性状的表现会受环境条件影响而表现不同。

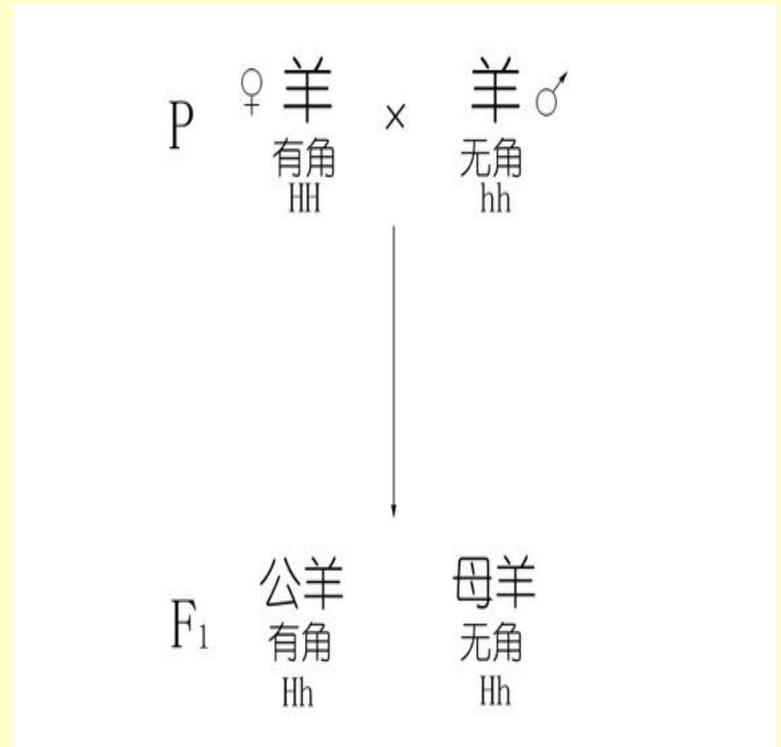
# 生理环境(内环境)对性状表现的影响

◎同一种基因型，处于不同的遗传背景(其它各对基因的组成)和生理环境下，可能会表现出不同的性状，等位基因间的显隐性关系也可能发生改变。

例如，绵羊有角/无角性状的遗传。

- ◇ HH基因型：无论母羊还是公羊都有角，
- ◇ hh基因型：无论是母羊还是公羊都无角。
- ◇ 杂合体(Hh)：公羊表现为有角，Hh的母羊则表现为无角。

◎ 杂合体处于公羊的生理环境下，H表现为显性，表现出有角；而处于母羊的生理环境下，H表现为隐性，h表现为显性。



# 外界环境条件对性状表现的影响

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

◎相同基因型个体处于不同外界环境中，可能改变显隐性关系。

◎例：金鱼草(*Antirrhinum majus*)红花品种与象牙色花品种杂交，其 $F_1$ ：

◇如果培育在低温、强光用的条件下，花为红色；

◇如果在高温、遮光的条件下，花为象牙色。

◎镰刀形贫血病杂合体通常情况不表现严重病症，在缺氧条件下会表现为贫血；

◎兔子的皮下脂肪

# 三、非等位基因间的互作

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

◎ **基因互作(interaction of genes)**: 细胞内各基因在决定生物性状表现时，所表现出来的相互作用。基因互作包括：

❁ **基因内互作(intragenic interaction)**: 等位基因间互作。一对等位基因在决定一个性状时表现出来的相互关系：完全显性、不完全显性、共显性等。

❁ **基因间互作(intergenic interaction)**: 非等位基因间互作。决定一个单位性状的多对非等位基因间表现出来的相互关系。

# 两对非等位基因间互作的类型

(共同决定一个单位性状时)

---

- ⊙ 互补作用
- ⊙ 积加作用
- ⊙ 重叠作用
- ⊙ 显性上位性作用
- ⊙ 隐性上位性作用
- ⊙ 抑制作用

**RRpp**  
玫瑰冠



**X**



**rrPP**  
豌豆冠



**RrPp**  
胡桃冠



**9R\_P\_**



**3R\_pp**



**3rrP\_**



**1rrpp**

# 1. 互补作用(*complementary effect*)

两对独立遗传基因分别处于显性纯合或杂合状态时，共同决定一种性状表现；当只有一对基因是显性，或两基因都是隐性纯合时，则表现另一种性状。发生互补作用的基因称为**互补基因** (*complementary gene*)。

# 1. 互补作用 (complementary effect)

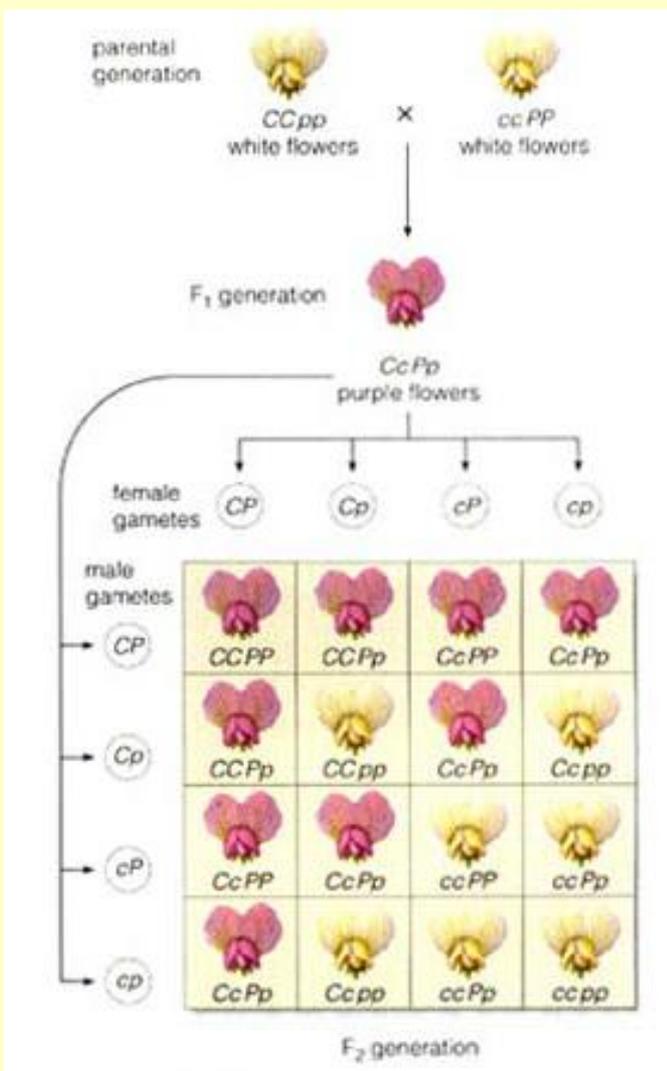
高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程 访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

香豌豆花色由两对基因(C/c, P/p)控制：

**P** 白花(CCpp) × 白花(ccPP)

↓  
**F<sub>1</sub>** 紫花(CcPp)

↓ ⊗  
**F<sub>2</sub>** 9 紫花(C\_P\_) :  
7 白花(3C\_pp + 3ccP\_ + 1ccpp)



## 2. 积加作用(*additive effect*)

当两种显性基因同时存在时产生一种性状；单独存在时，表现另一种相似的性状；而两对基因均为隐性纯合时表现第三种性状。

## 2. 积加作用(additive effect)

南瓜果形受A/a、B/b两对基因共同控制：

P 圆球形 (AAbb) × 圆球形 (aaBB)



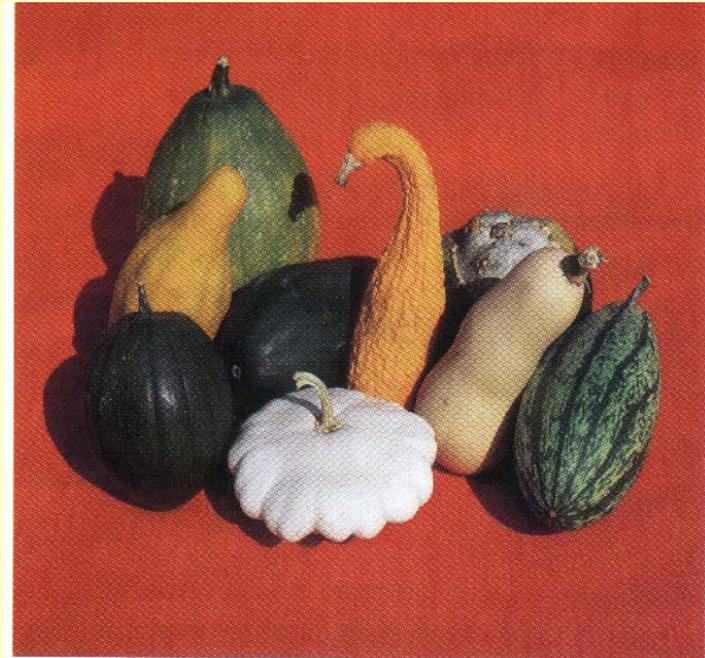
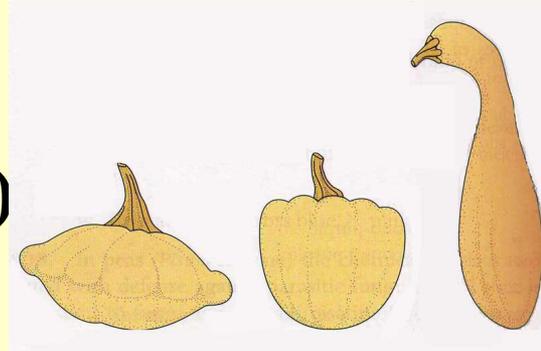
F<sub>1</sub> 扁盘形 (AaBb)



F<sub>2</sub> 9 扁盘形(A\_B\_) :

6圆球形(3A\_bb + 3aaB\_) :

1 长圆形 (aabb)



**FIGURE 4.10** Summer squash exhibiting various fruit-shape phenotypes, where disc (white), long (orange gooseneck), and sphere (bottom left) are apparent.

### 3. 重叠作用(*duplicate effect*)

不同对基因对性状产生相同影响，只要两对等位基因中存在一个显性基因，表现为一种性状；只有双隐性个体表现另一种性状； $F_2$ 产生15:1的比例。这类作用相同的非等位基因叫做**重叠基因** (*duplicate gene*)。

### 3. 重叠作用(duplicate effect)

高参考价值的真题·答案·学长笔记·辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

荠菜蒴果受 $T_1/t_1$ 、 $T_2/t_2$ 两对基因控制：

P 三角形 ( $T_1T_1T_2T_2$ ) × 卵形 ( $t_1t_1t_2t_2$ )

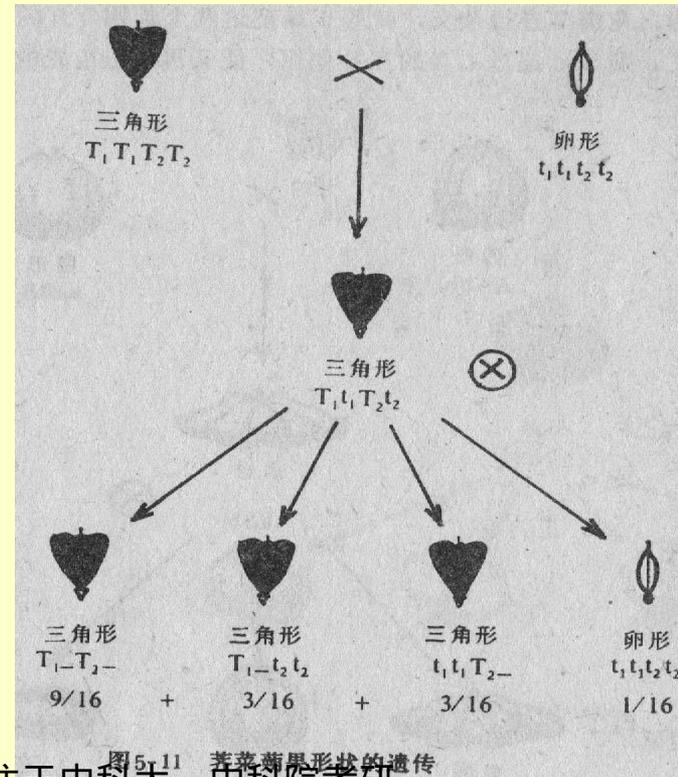


F<sub>1</sub> 三角形 ( $T_1t_1T_2t_2$ )



F<sub>2</sub> 15 三角形

( $9T_1\_T_2\_ + 3T_1\_t_2t_2 + 3t_1t_1T_2\_$ ) :  
1 卵形 ( $t_1t_1t_2t_2$ )



## 4. 显性上位性作用(*dominant epistasis*)

两对独立遗传基因共同对一对性状发生作用，而且其中一对基因对另一对基因的表现有遮盖作用——上位性(*epistasis*)。被遮盖——下位性(*hypostasis*)；如果起遮盖作用的基因是显性基因，称为上位显性基因；其作用称为显性上位性作用。

例如：狗毛色遗传

# 4. 显性上位性作用(dominant epistasis)

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

**P** 褐色狗 (bbii) × 白色狗 (BBII)

↓

**F<sub>1</sub>** 白色狗 (BbIi)

↓ ⊗

**F<sub>2</sub>** 12 白 (9B\_I\_ + 3bbI\_)

: 3 黑 (B\_ii)

: 1 褐 (bbii)



black white chocolate

# 5. 隐性上位性作用(recessive epistasis)

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：[www.kaoyancas.net](http://www.kaoyancas.net)

在两对互作基因中，其中一对的隐性基因对另一对基因起上位性作用。如玉米 (*Zea mays*) 胚乳蛋白质层颜色遗传

有色(C)/无色(c)；紫色(Pr)/红色(pr)。

P 红色 (CCprpr) × 白色 (ccPrPr)



F<sub>1</sub> 紫色(C\_Pr\_)



F<sub>2</sub> 9 紫色(C\_Pr\_) : 3 红色 (C\_prpr) :  
4 白色 (3ccPr\_ + 1ccprpr)



## 6. 抑制作用(*inhibiting effect*)

---

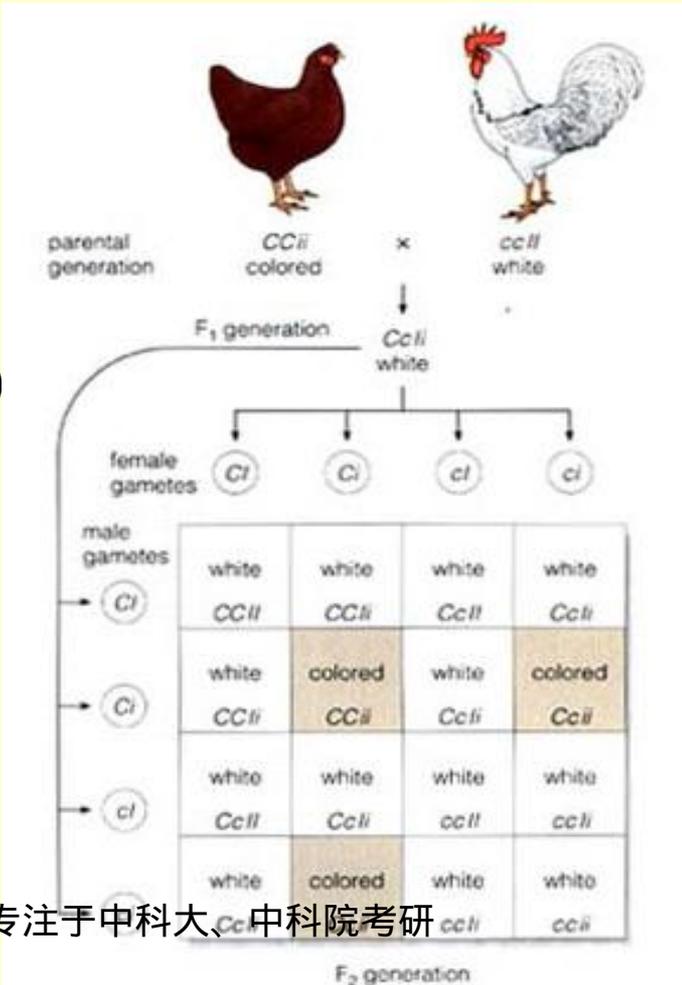
在两对独立基因中，一对基因本身不能控制性状表现，但其显性基因对另一对基因的表现却具有抑制作用。对其它基因表现起抑制作用的基因称为**抑制基因** (*inhibiting gene, suppressor*)。

# 鸡的羽毛颜色遗传

**P** 白羽莱杭 (CCII) × 白羽温德 (ccii)

↓  
**F<sub>1</sub>** 白羽 (CcIi)

↓ ⊗  
**F<sub>2</sub>** 13 白羽 (9C\_I\_ + 3ccI\_ + 1ccii)  
:3 有色羽 (C\_ii)



基因互作方式	9 A-B-	3 A-bb	3 aaB-	1 aabb	基因型比例
无互作	9	3	3	1	9:3:3:1
显性互补	9	7			9:7
抑制作用	9	3	4		13:3
隐性上位	9	3	4		9:3:4
显性上位	12		3	1	12:3:1
重叠作用	15			1	15:1
积加作用	9	6		1	9:6:1

## 四、多因一效和一因多效

### (一) 多因一效(*multigenic effect*)

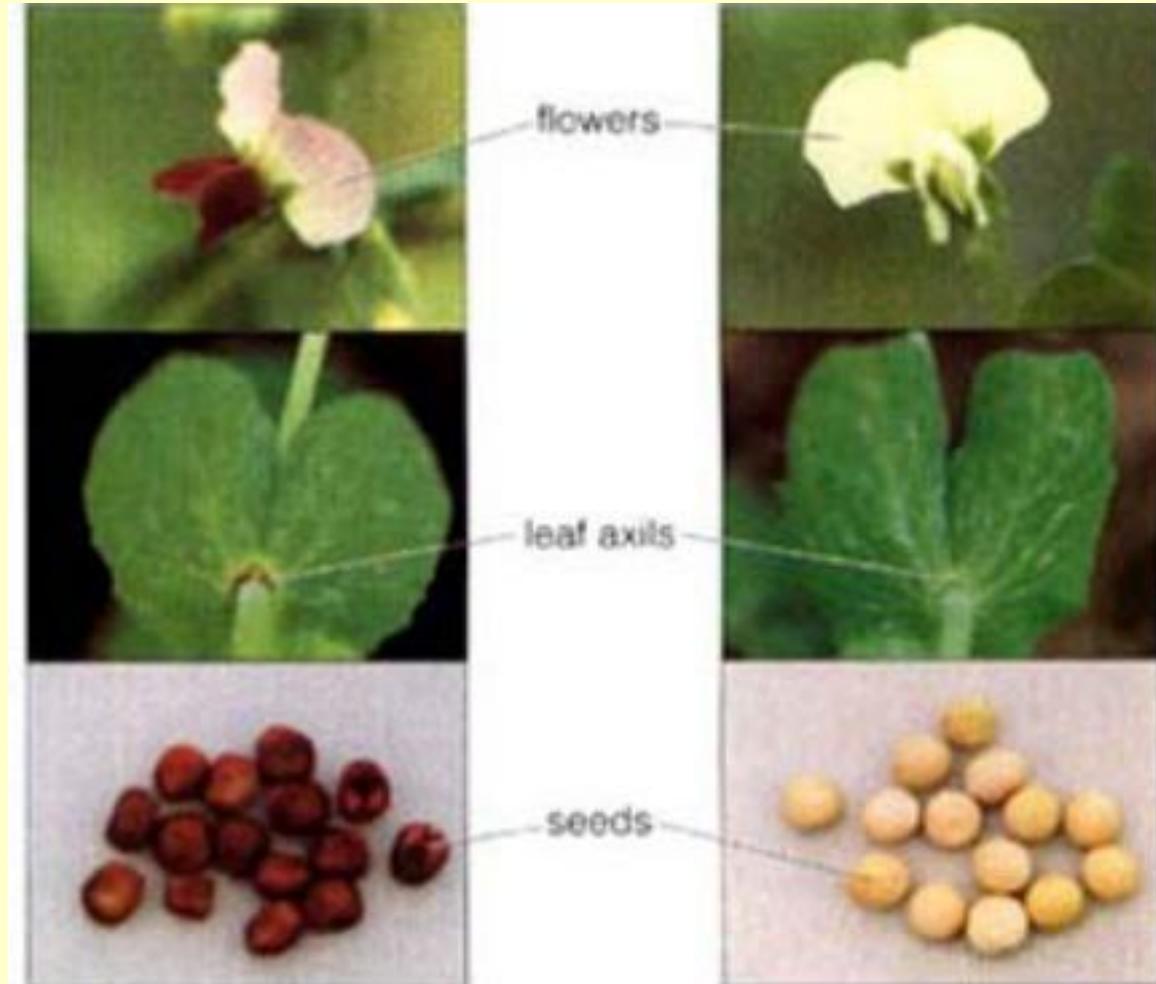
- ◎ 多因一效：由多对基因控制、影响同一性状表现的现象称为多因一效(*multigenic effect*)。
- ◎ 生化基础：一个性状形成是由许多基因所控制的许多生化过程连续作用的结果。
- ◎ 如：玉米正常叶绿素的形成与50多对不同的基因有关，分别控制叶绿素不同成份形成或不同发育阶段的生化反应。

## (二)、一因多效(*pleiotropism*)

- ◎ **一因多效**：一个基因影响、控制多个性状发育的现象。
- ◎ **生化基础**：一个基因改变直接影响以该基因为主的生化过程，同时也影响与之有联系的其它生化过程，从而影响其它性状表现。

## (二)、一因多效(*pleiotropism*)

如：豌豆花色基因 C/c 实际上是与植株色素形成相关的一系列生长反应相关，同时还控制种皮颜色(C-灰色种皮，c-淡色种皮)、叶腋色斑(C-有黑斑，c-无黑斑)。



## 本章重点：

- 1 基本概念
- 2 分离现象及其解释、分离规律验证
- 3 独立分配现象及其解释
- 4 显隐性相对性、基因互作

## 作业：

- 1、2、4、5、6、8、9、11、13、14、15