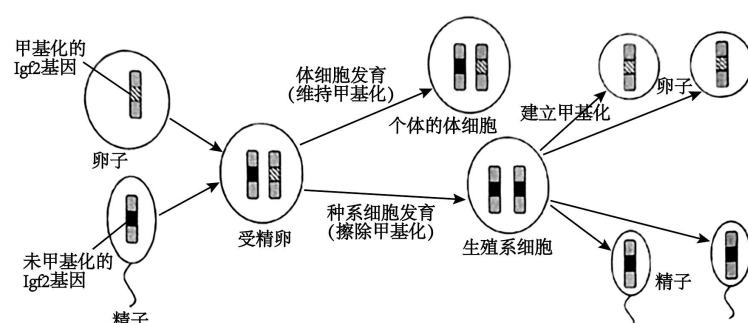


专项练习（选做）

一、解答题

1. 细胞中一个基因标记其亲本来源的过程称为遗传印记，带有标记的基因称作印记基因。DNA 甲基化是遗传印记的一种常见类型。印记基因表达与否取决于它们所在染色体的来源（父系或母系），有些印记基因只从母源染色体上表达，父源染色体上等位基因不表达，称为父系印记；反之称为母系印记。回答以下问题：

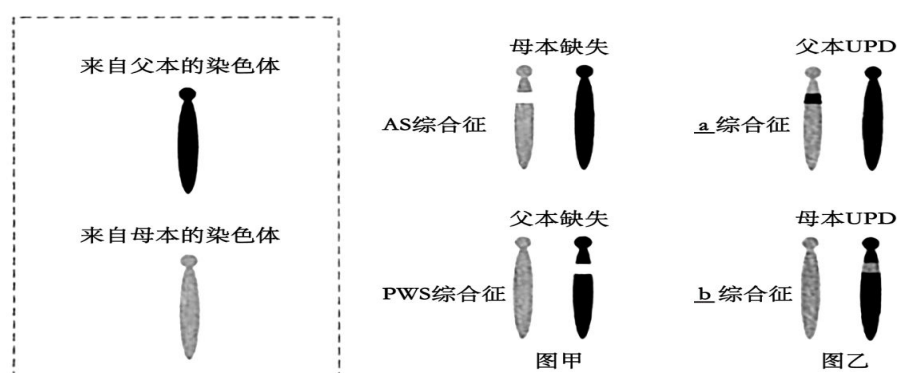
(1) 小鼠体内母源染色体上的 *Igf2* 基因终身不表达，下图是小鼠 *Igf2* 基因的印记擦除、建立与维持过程示意图。*Igf2* 基因是_____（填“父系印记”或“母系印记”）基因。母源染色体上的 *Igf2* 基因终身不表达与图示过程有关，推测体细胞中相关 DNA 新发生甲基化的链是_____条（填“1”或“2”）



(2) 小鼠具有 71 个印记基因，有一些是父系印记，有一些是母系印记。从受精卵中移去雄原核（精细胞细胞核）而代之以雌原核的孤雌生殖，或移去雌原核代之以雄原核的孤雄生殖的小鼠胚胎都不能正常发育，对其中一种现象做出合理解释：_____。

(3) 若 A、a 是小鼠体内的印记基因，则 $Aa \times Aa$ ，子代显性：隐性=_____；为探究 A、a 的印记是父系印记还是母系印记，可选用以下杂交组合进行正反交实验，再统计子代性状及比例。杂交组合：_____，_____，_____，（只要写出基因组合，不要求标注父本和母本）。

(4) 人类的 PWS 综合征和 AS 综合征是与印记基因有关的遗传病，都与 15 号染色体有关。前者症状包括肥胖、四肢短小等；后者症状包括运动失调、面容特殊、常呆笑等，因此也称快乐木偶症。部分患者是由于染色体 q11-q13 区域片段缺失造成的（图甲），也有患者是由于该区域的单亲二倍体（UPD）（同源染色体的部分片段均来源于双亲中的一方）现象造成的（图乙）。



注：图中不同颜色的染色体表示来自不同亲本的染色体

①父本缺失与母本缺失的症状不一样，原因是_____。

②父本 UPD 表现出的是_____综合征。

③为确定某患者快乐木偶症是哪一种情况导致的，检测的方法可以是_____。（答出一点即可）

2. 赤霉病严重影响小麦的品质和产量，为培育抗赤霉病品种，科研人员利用小麦的近缘种长穗偃麦草开展下列研究。

(1)长穗偃麦草（ $2n=14,EE$ ）的 7 号染色体（7E）上带有显性赤霉病抗性基因 A。从小麦（ $2n=6x=42,AABBDD$ ）与长穗偃麦草的杂交后代中选育获得纯合品系甲（ $2n=42$ ），其 D 组 7 号染色体（7D）被长穗偃麦草的 7E 代替。小麦与品系甲的杂交子代中，由于 7D 与 7E 在减数分裂形成配子时不能_____，而无法发生染色体片段的互换。

(2)小麦的 5B 染色体上显性基因 H 失活后得到品系乙，可诱导 7D 与 7E 在减数分裂时发生交换。进行图 1 所示杂交实验。

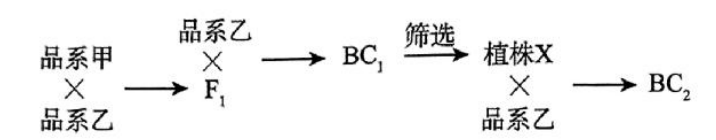


图1

①植株 X 的基因型为 Aahh，筛选该种基因型植株的目的是_____。

②简单重复序列（SSR）一般为几十个核苷酸组成的串联重复序列，同一 SSR 位点在不同个体间存在差异。利用 SSR 检测 BC2 植株 7 号染色体上的 DNA 组成，结果如下表。

植株	SSR 1	SSR 2	SSR 3	SSR 4	SSR 5	SSR 6	SSR 7	抗性
1	W	T	T	T	W	W	W	无
2	W	T	W	T	T	T	W	有
3	W	W	W	W	T	T	W	有
4	W	W	W	T	W	W	W	无
5	W	W	T	T	T	T	W	有
6	W	T	W	W	W	W	W	无

注：w 表示不含来自长穗偃麦草的 SSR；T 表示含有来自长穗偃麦草的 SSR

据以上信息，可选择植株_____进行自交并筛选获得纯合抗性品系丙，最有利于

对基因 A 进行快速、精细定位。

(3)对基因 A 测序结果进行分析，推测该基因来自真菌 M，跨物种转移至长穗偃麦草中。支持这一推测的证据有_____（多选）。

- a.真菌 M 和长穗偃麦草均为真核生物
- b.长穗偃麦草的祖先与真菌 M 的祖先存在共生关系
- c.真菌 M 中存在基因 A 的同源基因，而其他植物中暂未发现其同源基因
- d.真菌 M 的基因组中还存在其他与 7E 染色体同源的序列

(4)纯合品系丁的 3D 染色体上带有显性赤霉病抗性基因 B。利用 SSR-A 和 SSR-B 对品系丁与品系丙杂交所得 F₂ 的部分子代进行检测，结果如图 2。其中类型_____（填数字）的植株能将赤霉病抗性性状稳定遗传给后代，这样的个体在 F₂ 中的占比为_____。

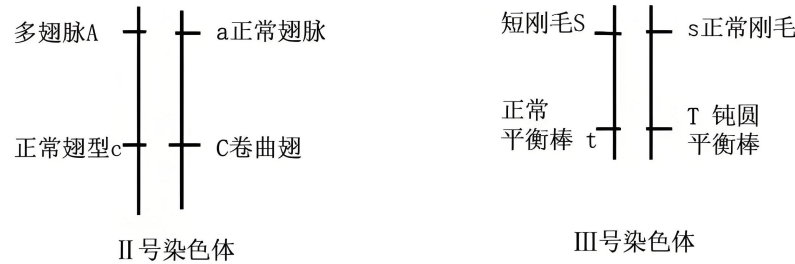


注：SSR-A与A基因距离极近，SSR-B与B基因距离极近。

图2

3. 果蝇共有 3 对常染色体，编号为 II、III、IV。某实验室保存有野生型和一些突变型果蝇。研究者在一个果蝇纯系中发现了几只黑檀体果蝇（雌蝇、雄蝇都有）。假设黑檀体是常染色体上的单基因隐性突变性状，而它们同代的其他个体都是灰体。

(1)某灰体果蝇的 4 种突变性状各由一种显性突变基因控制，并且突变基因纯合的胚胎死亡，其基因分布如下图所示（不考虑新的基因突变和染色体变异）。



①若只考虑 II 号和 III 号染色体，图示灰体果蝇雌雄个体间相互交配产生的子代成体的所有基因型是_____。灰体果蝇的上述四个性状_____（选填“能”或“不能”）稳定遗传。

②用黑檀体雌蝇和灰体雄蝇杂交，子代果蝇中黑檀体个体和灰体个体的比例为 1：1，并且所有正常刚毛、钝圆平衡棒的个体都是黑檀体，所有短刚毛、正常平衡棒的个体都是灰体。说明控制灰体和黑檀体的基因位于_____号染色体上。

(2)果蝇控制红眼和白眼的基因位于 X 染色体上且红眼对白眼为显性。为验证基因的遗传规

律，某同学让纯合白眼黑檀体雄果蝇与红眼灰体（野生型）雌果蝇进行杂交得到 F_1 ， F_1 相互交配得到 F_2 。实验结果中：

①能够验证自由组合定律的 F_1 表型是_____， F_2 表型及分离比是_____（不考虑性别）。

②验证伴性遗传时应分析的相对性状是_____，能够验证伴性遗传的 F_2 表型及分离比为_____。

(3)科研人员用大剂量射线照射处理实验室中的甲、乙两管果蝇：

①甲管中果蝇在传代过程中，雌果蝇与雄果蝇的比值逐代增大。假设出现上述现象的原因是该果蝇种群中某条性染色体上的基因 M 发生了隐性突变，成为隐性纯合不完全致死基因 m ，分析 m 基因所在的染色体并写出判断依据_____。

②乙管中出现一个完全致死基因 n ，基因 n 在纯合时使胚胎致死。科研人员将构建的一只红眼果蝇 ($X^{nD}X^d$) 与白眼果蝇 (X^dY) 杂交， F_1 中雄果蝇占比为_____； F_1 雌雄果蝇随机交配，产生的 F_2 中 X 的基因频率为_____。

4. 水体中的雌激素能使斑马鱼细胞产生 E 蛋白，激活卵黄蛋白原 (vtg) 基因的表达，因此斑马鱼可用于监测环境雌激素污染程度。为了实现可视化监测，科学家将图 1 中的 vtg 基因与图 2 中 Luc 基因载体连接，形成 vtg-Luc 基因重组载体，成功培育了转基因斑马鱼，当极微量雌激素污染水体，斑马鱼的肝脏就发出荧光。Luc 表示荧光素酶基因（无启动子）， Kan^r 为卡那霉素抗性基因，ori 为复制起点，BamHI、BclI、HindIII、BsrGI 为限制酶，→表示转录方向。

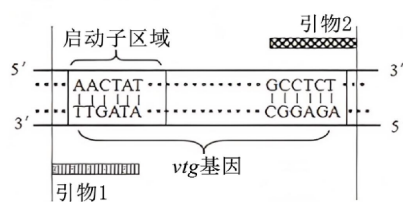


图1

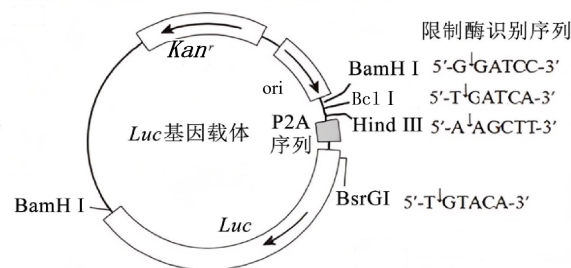


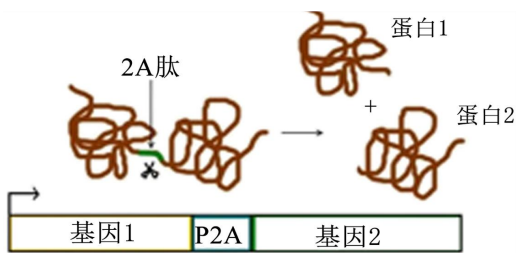
图2

注：图 1 DNA 片段不含有图 2 所示限制酶的识别序列

(1)为使 vtg 基因与 Luc 基因载体形成重组载体，选用限制酶_____切割 Luc 基因载体可降低“空载”概率。通过 PCR 技术获取 vtg 基因时，需设计合适的引物。依据图示信息，推测引物 1 包含的碱基序列为 5'_____3'。（写出已知的所有碱基序列）

(2)将“vtg-Luc 基因重组载体”导入大肠杆菌中进行扩增，为便于筛选，应将大肠杆菌接种在含_____的培养基中，转基因成功的斑马鱼只在肝脏中发出荧光指示污染，其原因是_____。

(3)Luc 基因载体上有一段 P2A 序列，其功能如图所示，据此推测 P2A 的作用_____。



(4)进一步研究发现，E 蛋白能与 vtg 基因启动子的特定序列结合，启动该基因的表达。已知 vtg 基因启动子含区域 1 和区域 2，为研究 E 蛋白的结合位点，设计如下实验：用限制酶将启动子切割成含区域 1 和区域 2 的两个片段，将两个酶切片段分别与 Luc 基因载体连接，连接位点位于 Luc 基因的上游，形成两种重组载体。将重组载体分别导入斑马鱼的_____，待发育成熟后，往水体中添加_____进行检测。

5. 玉米是雌雄同株异花植物，利用玉米纯合雌雄同株品系 M 培育出雌株突变品系，该突变品系的产生原因是 2 号染色体上的基因 Ts 突变为 ts，Ts 对 ts 为完全显性。将抗玉米螟的基因 A 转入该雌株品系中获得甲、乙两株具有玉米螟抗性的植株，但由于 A 基因插入的位置不同，甲植株的株高表现正常，乙植株矮小。为研究 A 基因的插入位置及其产生的影响，进行了以下实验：

实验一：品系 M (TsTs) × 甲 (Atsts) → F₁ 中抗螟：非抗螟约为 1 : 1

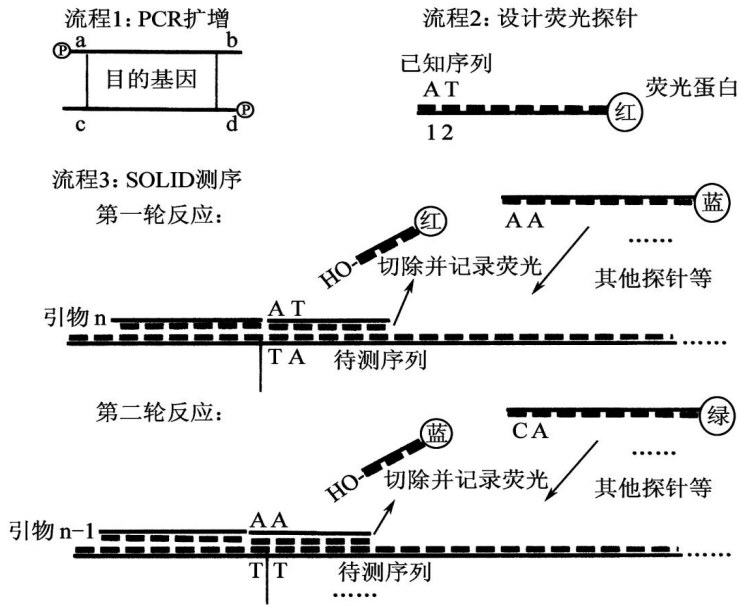
实验二：品系 M (TsTs) × 乙 (Atsts) → F₁ 中抗螟矮株：非抗螟正常株高约为 1 : 1

(1) 实验一中作为母本的是_____，实验二的 F₁ 中非抗螟植株的性别表现为_____（填：雌雄同株、雌株或雌雄同株和雌株）。

(2) 选取实验一的 F₁ 抗螟植株自交，F₂ 中抗螟雌雄同株：抗螟雌株：非抗螟雌雄同株约为 2 : 1 : 1。由此可知，甲中转入的 A 基因与 ts 基因_____（填：是或不是）位于同一条染色体上，F₂ 中抗螟雌株的基因型是_____。若将 F₂ 中抗螟雌雄同株与抗螟雌株杂交，子代的表现型及比例为_____。

(3) 选取实验二的 F₁ 抗螟矮株自交，F₂ 中抗螟矮株雌雄同株：抗螟矮株雌株：非抗螟正常株高雌雄同株：非抗螟正常株高雌株约为 3 : 1 : 3 : 1，由此可知，乙中转入的 A 基因_____（填：位于或不位于）2 号染色体上，理由是_____。F₂ 中抗螟矮株所占比例低于预期值，说明 A 基因除导致植株矮小外，还对 F₁ 的繁殖造成影响，结合实验二的结果推断这一影响最可能是_____。F₂ 抗螟矮株中 ts 基因的频率为_____，为了保存抗螟矮株雌株用于研究，种植 F₂ 抗螟矮株使其随机受粉，并仅在雌株上收获籽粒，籽粒种植后发育形成的植株中抗螟矮株雌株所占的比例为_____。

6. 基因测序技术在基因工程中被广泛运用，SOLID 测序是基于 DNA 连接酶法，利用四色荧光标记寡核苷酸探针进行测序的技术。其一般流程如下图所示。请回答下列问题。

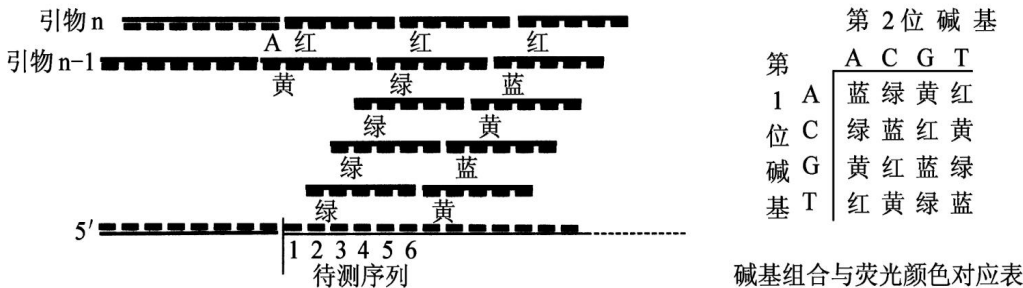


(1)流程 1 利用 PCR 技术扩增目的基因时，反应体系中需加入引物，引物结合的位置为_____（填字母），其作用是_____。PCR 完成以后，常采用_____技术来初步鉴定 PCR 的产物。

(2)流程 2 构建 8 碱基单链荧光探针时，其第 1 位和第 2 位碱基是确定的，探针的_____端分别添加了红蓝绿黄 4 种颜色的荧光蛋白。DNA 连接酶催化形成_____键连接两个 DNA 片段。

(3)流程 3 测序时，荧光探针与待测序列通过_____原则配对，之后通过化学方法在第_____位碱基之间进行切割并发出代表探针第 1、2 位碱基的荧光信号被计算机记录，每次测序的位置间隔_____个碱基。在测序完成后，要将新连接的 DNA 单链变性并洗脱。接着用引物 n-1 进行第二轮测序。引物 n-1 与引物 n 的区别是，二者在与接头配对的位置上相差一个碱基。以此类推，直至第_____轮测序结束可以完成所有位置的碱基测序。

(4)下图为某次测序结果，结合碱基组合和荧光颜色对应表，待测序列前 6 位碱基依次为_____。该测序法的最大优点在于每个测量位点进行了_____次测序，大大提高了准确率。



7. 科学家对果蝇进行研究时，偶然发现展翅和粘胶眼（控制基因均位于 3 号染色体）两种突变性状，并存在致死现象，对其进行单对杂交实验，结果如表。

组合	亲本组合	F ₁	F ₂ （由 F ₁ 展翅粘胶眼雌雄果蝇杂交获得）
组合一	展翅×展翅	展翅：野生型=2:1	\
组合二	粘胶眼×粘胶眼	粘胶眼：野生型=2:1	\
组合三	展翅×粘胶眼	展翅粘胶眼：展翅：粘胶眼：野生型=1:1:1:1	大量展翅粘胶眼、少量展翅、少量粘胶眼、极少野生型

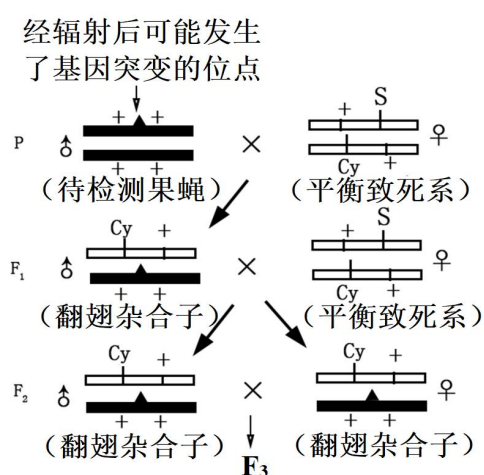
(1)组合一、二中 F₁ 的分离比不为 3：1 的原因最可能是_____。

(2)组合三 F₂ 中出现少量非展翅粘胶眼是因为_____。

(3)经研究，果蝇 2 号染色体存在颠倒片段，可确保参与受精的配子 2 号染色体上的基因未发生交换。翻翅基因（Cy）和星状眼基因（S）均位于 2 号染色体上，且纯合致死。将某品系翻翅星状眼雌雄果蝇杂交，后代均为翻翅星状眼，这样的品系称为平衡致死系。据此分析推测，要保持一个稳定的平衡致死系应具备的条件是_____

（写出两条即可，不考虑突变）。

(4)平衡致死系可用于检测果蝇相应染色体上的其他突变基因类型（如显性、隐性、是否致死等）。欲判断诱变处理后的野生型雄果蝇 2 号染色体上是否发生了非 Cy 和 S 等位的基因突变，研究人员设计如下实验（已知突变基因控制新性状）。



①将待测雄果蝇与平衡致死系翻翅星状眼雌果蝇杂交得 F₁，F₁ 出现_____，说明待测雄果蝇未发生显性突变或发生了显性致死突变。

②选取 F₁ 中翻翅雄果蝇，再与平衡致死系的雌果蝇单对交配，分别饲养，杂交得到 F₂。在 F₂

中选取翻翅个体相互交配，得到 F₃。观察并统计 F₃ 表型及比例。

预测结果与结论：

若 F₃ 中_____，则说明待测雄果蝇 2 号染色体上未发生基因突变。

若 F₃ 中_____，则说明待测雄果蝇 2 号染色体上发生了隐性且致死的基因突变。

若 F₃ 中翻翅：新性状=2：1，则说明待测雄果蝇 2 号染色体上发生了隐性不致死的基因突变。

8. 果蝇（2N=8 条）是遗传实验常用材料，性状（刚毛与截毛；红眼与白眼；有眼与无眼等）多，子代个体多等特征。某实验室保存有野生型和一些隐性突变型果蝇，隐性突变性状、相关基因以及基因在染色体上的位置，如下表所示。回答下列问题：

隐性突变果蝇编号	①	②	③	④	⑤	⑥
隐性突变性状	截毛	白眼	残翅	黑体	无眼	短肢
隐性突变基因	t	r	d	b	e	a
突变基因所在染色体	XY	X	II	III	IV	?

(1)果蝇种群中刚毛雄果蝇的基因型有_____，该性状遗传与性别_____（填“有关”或“无关”）。有一只 XXY 的截毛果蝇（双亲均为刚毛），分析其变异的原因只可能是由某亲本形成配子时，在减数第二次分裂中染色体分配异常造成，那么，该双亲的基因型是_____。

(2)现有基因型为 EeX^rX^r 的果蝇甲，镜检发现其一条 IV 号染色体移接到一条 X 染色体末端，且移接的 IV 号常染色体着丝粒丢失。已知甲在减数分裂时，未移接的 IV 号常染色体随机移向一极，配子的存活力正常，子代个体若含有结构异常的染色体会致死 50%，不考虑其他突变和染色体互换。甲×⑤，得到 F₁，当 F₁ 雌雄个体性状及比例为_____，说明是 e 所在的染色体发生了移接。若再让 F₁ 中有眼个体自由交配，F₂ 中有眼雌性个体数_____（填“多于”“等于”或“少于”）有眼雄性个体数。

(3)现发现一新的隐性突变个体⑥若干，请以实验室中果蝇（均为纯合子）为材料设计杂交实验，判定 A/a 所在的染色体。已知 A/a 不在 Y 染色体上，要求简要写出实验思路、结果及结论：_____。

9. “端稳中国饭碗，守好大国粮仓”，科研人员在选育优质水稻品种上开展了大量的研究。水稻是二倍体作物，稻米香味是衡量水稻品质的重要指标，水稻的非香和米香由位于 8 号染色体上的 1 对等位基因控制。为确定该对基因（序列未知）的具体位置，科研人员利用 8 号染色体上的分子标记（能反映个体间基因组差异的特异性 DNA 片段，碱基序列较短且已

知，位置如下图)，做了如下实验：将米香水稻甲和非香水稻乙杂交，F₁全为非香。再将 F₁ 与甲杂交得 F₂，对部分 F₂ 个体 8 号染色体上的分子标记进行检测，结果如下表所示。



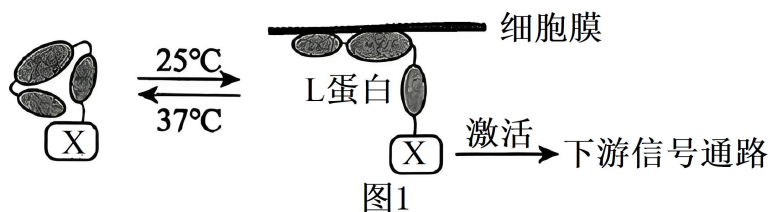
分子标记 F ₂ 个体	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
米香个体 1	—	—	+	+	+	+	+
米香个体 2	+	+	+	+	—	—	—
非香个体 3	+	+	+	—	—	—	—
非香个体 4	+	+	—	—	—	—	—
非香个体 5	—	—	—	—	—	+	+

注：两条 8 号染色体上的分子标记均与亲本甲一样的个体记为“+”
两条 8 号染色体上的分子标记分别来自亲本甲和亲本乙的个体记为“—”
回答下列问题：

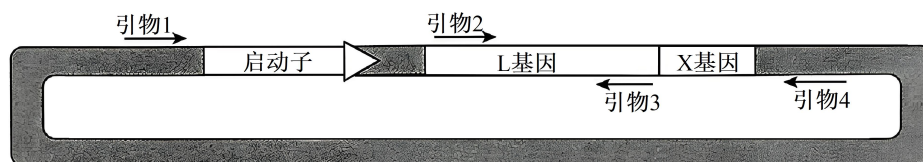
- (1)F₂ 中非香个体所占比例为_____。表中，非香个体含“—”型分子标记的原因是_____，米香个体中含“—”型分子标记是因为 F₁ 产生配子时发生了_____。
- (2)已知分子标记均不位于该对等位基因的内部。根据米香个体结果分析，该对基因不位于分子标记_____之间；根据非香个体结果分析，该对基因位于分子标记_____之间。综合推测，控制非香和米香性状的等位基因位于分子标记_____之间。
- (3)科研人员进一步提取水稻乙的总 DNA 为模板，依据上述推测中的分子标记设计引物，进行 PCR 扩增，获得了一定长度的 DNA 片段。该实验能否验证上述推测？若能，写出判断理由；若不能，补充实验设计思路。_____

10. 蛋白质是生命活动的主要承担者。科研人员利用细胞内已有蛋白质 L 创建出一种能被更精准调控的蛋白模块，为疾病治疗提供新的方向。

- (1)正常细胞内，L 蛋白的功能在不同条件下会发生动态的变化。L 蛋白与连接的 X（可变蛋白质组分）构成蛋白模块。在 25℃下，L 蛋白的_____发生改变，定位到细胞膜上，进而活化 X 蛋白，激活下游信号通路，如图 1。



(2)科研人员构建编码 LX 蛋白模块的基因表达载体，导入到动物细胞中。利用 PCR 技术筛选成功构建的基因表达载体，最佳引物组合是图 2 中的_____。



(3)诱导上述细胞表达 L-X 蛋白模块，进行 25°C/37°C 温度转换，检测蛋白模块与细胞膜的结合情况。结果显示，经过多次温度转换，L-X 蛋白模块响应模式始终相似，表明该蛋白模块的优点是具有_____。

(4)活化的 C 蛋白可启动细胞凋亡通路，诱导细胞凋亡。X 选用 C 蛋白，组成 L-C 蛋白模块。向小鼠左侧后腿注射肿瘤细胞，右侧注射表达 L-C 蛋白模块的同种肿瘤细胞，并对右侧后腿进行局部冷却处理。与对照组相比，一周后左侧肿瘤体积显著减小。请结合免疫学原理，补充左侧肿瘤被抑制的途径：右侧后腿局部冷却处理→①→释放肿瘤抗原→②→左侧后腿肿瘤被抑制。

①_____ ②_____

(5)目前，主要采用光激活蛋白 G 组成 G-C 蛋白模块治疗癌症，但是治疗深层组织癌症的效果不佳。L-C 蛋白模块比 G-C 蛋白模块更具有临床应用优势，利用下列材料和设备验证该推测，请简要写出实验设计思路_____。主要实验材料和设备：琼脂（模拟人体组织）、L 细胞（表达 L-TEV 蛋白模块和荧光蛋白的细胞）、G 细胞（表达 G-TEV 蛋白模块和荧光蛋白的细胞）、光源、冷却装置、荧光检测系统。注：活化的 TEV 蛋白可诱导荧光蛋白发出荧光，荧光不会激活 L 或 G 蛋白。

《专项练习（选做）》参考答案

1. (1) 母系印记 1

(2) 孤雌生殖时母系印记基因都不能表达，孤雄生殖时父系印记基因都不能表达，母系印记基因和父系基因中都存在调控胚胎发育的关键基因。

(3) 1:1 $AA \times aa$ $Aa \times aa$ $AA \times Aa$

(4) 染色体 q11-q13 区域涉及了两对印记基因，其中一对是父系印记基因，父系印记基因功能缺失导致 AS 综合征，另一对是母系印记基因，母系印记基因功能缺失导致 PWS 综合征 AS 基因测序

【详解】(1) 印记基因表达与否取决于它们所在染色体的来源（父系或母系），有些印记基因只从母源染色体上表达，父源染色体上等位基因不表达，称为父系印记；反之称为母系印记。而卵子中 Igf2 基因已甲基化，精子是未甲基化的，甲基化会使基因无法表达，所以 Igf2 基因是母系印记基因。受精卵发育成体细胞的过程发生了 DNA 复制，而 DNA 是通过半保留的发生进行复制，原来已有一条链发生甲基化，作为复制过程中的母链，如果体细胞中相关 DNA 新发生甲基化的链有 1 条，那么体细胞中会出现甲基化的染色体，与图示过程一致，所以推测体细胞中相关 DNA 新发生甲基化的链是 1 条。

(2) 因为从受精卵中移去雄原核（精细胞细胞核）而代之以雌原核的孤雌生殖，或移去雌原核代之以雄原核的孤雄生殖的小鼠胚胎都不能正常发育，都只有父方或母方的印记基因，所以推测只有一方印记基因不能使胚胎发育；孤雌生殖时母系印记基因都不能表达，孤雄生殖时父系印记基因都不能表达，母系印记基因和父系基因中都存在调控胚胎发育的关键基因。

(3) 若 A、a 是小鼠体内的母系印记基因，则 $Aa \times Aa$ 中来自母本的 A 或 a 基因不表达，子代显性：隐性=1:1，若 A、a 是小鼠体内的父系印记基因，则结果相同。可选用 $AA \times aa$ ，进行正反交实验，若是父系印记或母系印记，则子代表现型全为显性或隐性。 $Aa \times aa$ 进行正反交实验，若是父系印记或母系印记，则子代表现型全为隐性或显性：隐性=1:1。 $AA \times Aa$ 进行正反交实验，若是父系印记或母系印记，则子代表现型全为显性或显性：隐性=1:1。

(4) ①对于 AS 综合征而言，若缺失的印记基因为母系印记，则不论母本上的该基因是否缺失，都只有父本基因表达，最终都表现为父本基因控制的性状，表型不会出现差异；若缺失的印记基因为父系印记，当母本该基因不缺失时可正常表达，表现为正常性状，当母本该基因缺失时，该基因不能正常表达，表现为 AS 综合征。同理，对于 PWS 综合征而言，若缺失的印记基因为母系印记，当父本该基因不缺失时可正常表达，表现为正常性状，当父本该基因缺失时，该基因不能正常表达，表现为 PWS 综合征。

②父本 UPD 表现出的是 AS 综合征。因为在父本 UPD 中，患者获得的 15 号染色体 q11-q13 区域相关基因都来自父亲，而染色体 q11-q13 区域相关基因遵循母系印记，只从父源染色体上表达，母源染色体上等位基因不表达。

③为确定某患者快乐木偶症是哪一种情况导致的，可以通过基因测序来分析该患者的 15 号染色体 q11-q13 区域是否存在缺失或是否存在单亲二倍体现象。

2. (1) 联会 (2) 使 BC₂ 中 7D 上带有基因 A 的植株比例提高 3

(3) b、c、d (4) 1、2、4、7、9 7/16

【详解】(1) 小麦 ($2n=6x=42, AABBDD$) 的 7 号染色体为 7D，品系甲的 7 号染色体为长穗偃麦草的 7E（含显性抗赤霉病基因 A）。小麦与品系甲杂交后，子代的 7 号染色体为 7D 和 7E。由于 7D 和 7E 来自不同物种，属于非同源染色体，在减数分裂时无法正常联会，因此不能发生染色体片段的互换。

(2) ①品系乙的 5B 染色体上显性基因 H 失活（基因型为 hh），可诱导 7D 与 7E 在减数分裂时发生交换。植株 X 的基因型为 Aahh，其中 Aa 表示携带长穗偃麦草的 7E（含 A）和小麦的 7D（无 A），hh 可诱导 7D 与 7E 配对并交换。筛选 Aahh 植株的目的是通过

诱导交换,使 7D 染色体上获得抗赤霉病基因 A,从而提高后代中 7D 携带 A 的概率,为后续筛选纯合抗性品系奠定基础。

②SSR 标记中,T 表示含有长穗偃麦草的 7E 片段(含 A 基因),W 表示不含。抗性植株需携带 A 基因(位于 7E)。分析表格:植株 3:SSR 5、6 为 T,其余为 W,说明 7E 片段在 SSR 5 和 6 位点存在。选择植株 3 自交,并筛选获得纯合抗性品系丙,最有利于对基因 A 进行快速、精细定位。

(3)支持基因 A 来自真菌 M 的证据需体现跨物种转移的可能性:

a(均为真核生物)仅说明分类关系,无法直接证明基因转移,a 错误;

b:祖先共生关系可能促进基因水平转移(如共生生物间的基因交流),b 正确;

c:真菌 M 中存在 A 的同源基因,而其他植物中无,说明 A 可能从真菌转移至长穗偃麦草,而非植物共同祖先遗传,c 正确;

d:真菌 M 基因组含 7E 染色体的同源序列,暗示染色体片段或基因转移的可能,d 正确。故选 bcd。

(4)品系丙(纯合,含 A 基因,7 号染色体)与品系丁(纯合,含 B 基因,3D 染色体)杂交, F_1 为双杂合($AaBb$),SSR-A 与 A 基因紧密连锁,SSR-B 与 B 基因紧密连锁,则 SSR-A 的上面的条带可表示 A 基因,SSR-B 的下面的条带可表示 B 基因, F_2 中需稳定遗传的植株,则含有 AA__或__BB,均可稳定遗传,不发生性状分离,则子代符合条件的是,1、2、4、7、9。则 F_2 符合条件的个体为,1/16AABB、2/16AABb、1/16AAbb、2/16AaBB、1/16aaBB,共 7/16。

3. (1) AaCcSsTt 能 III

(2) 灰体红眼 灰体红眼:灰体白眼:黑檀体红眼:黑檀体白眼=9:3:3:1 眼色/红眼和白眼 红眼雌性:红眼雄性:白眼雄性=2:1:1

(3) m 仅位于 Y 染色体上,雄蝇(XY^m)部分死亡或 m 仅位于 X 染色体上,雄蝇的死亡率(X^mY)高于雌蝇(X^mX^m) 1/3 10/11

【详解】(1)①根据图解可知,图示果蝇的基因型为 AaCcSsTt,由于分别有两对基因连锁,因此产生的配子基因型为 AcSt、AcsT、aCSt、aCsT,雌雄个体间相互交配,又由于“突变基因纯合的胚胎不活”,因此子代成体果蝇的基因型为 AaCcSsTt,该果蝇可以杂合子形式连续稳定遗传。

②黑檀体是常染色体上的单基因隐性突变性状,而它们同代的其他个体都是灰体,用黑檀体雌蝇和灰体雄蝇杂交,子代果蝇中黑檀体个体和灰体个体的比例为 1:1,说明灰体为杂合子,同时发现,子代果蝇中所有正常刚毛、钝圆平衡棒的个体都是黑檀体,所有短刚毛、正常平衡棒的个体都是灰体,说明黑檀体基因与正常刚毛基因、钝圆平衡棒基因连锁,灰体基因与短刚毛基因、正常平衡棒基因连锁,即控制灰体和黑檀体的基因位于 III 号染色体上。

(2)用 E/e 表示体色,用 W/w 表示眼色,则某同学让纯合白眼黑檀体雄果蝇 eeX^wY 与红眼灰体(野生型)雌果蝇 EEX^WX^W 进行杂交得到 F_1 (EeX^WX^w 、 EeX^WY), F_1 相互交配得到 F_2 ($E_X^W_$ 、 E_X^wY 、 $eeX^W_$ 、 eeX^wY)。

①能够验证自由组合定律的 F_1 表型是红眼灰体, F_2 表型及分离比是 $E_X^W_$ 灰体红眼: E_X^wY 灰体白眼: $eeX^W_$ 黑檀体红眼: eeX^wY 黑檀体白眼=9:3:3:1。

②验证伴性遗传时应分析的相对性状是由 X 染色体的 W/w 控制的眼色,能够验证伴性遗传的 F_2 表型及分离比为 X^WX -红眼雌性: X^WY 红眼雄性: X^wY 白眼雄性=2:1:1。

(3)①若 m 仅位于 X 染色体,果蝇种群中, X^mX^m 的出现概率比 X^mY 低,雌蝇的死亡率低,雄蝇的死亡率高,雌蝇/雄蝇的比值会逐代增大;若 m 基因仅仅在 Y 染色体上, XY^m 部分死亡,雌蝇/雄蝇的比值会逐代增大。

②一只红眼果蝇(X^DX^d)与白眼果蝇(X^dY)杂交, F_1 基因型及比例 $1X^DX^d$: $1X^dX^d$: $1X^dY$:

1X^dY，由于基因 n 在纯合时使胚胎致死，基因型为 XnDY 的雄果蝇致死，则 F₁ 中雄果蝇 X^dY 在后代中的占比为 1/3。F₁ 雌果蝇产生的配子为 1/4XnD、3/4X^d，雄果蝇产生的配子为 1/2X^d、1/2Y，F₁ 雌雄果蝇随机交配子代基因型为 1/8XnDX^d：3/8X^dX^d：1/8XnDY（雄性致死）：3/8X^dY，则产生的 F₂ 中 X^d 的基因频率=（1+6+3）÷（2+6+3）=10/11。

4. (1) Bcl I 和 Hind III 5'-TGATCAAACCTAT-3'

(2) 卡那霉素 vtg 基因在肝脏中特异性表达

(3) 有助于序列两侧的基因表达成独立的蛋白质

(4) 受精卵 雌激素和荧光素

【详解】(1) 由图可知，限制酶 BsrGI 会破坏 Luc，因此不能选择 BsrGI，Luc 基因载体上存在两个 BamHI 识别位点，因此不能选择 BamHI，为防止目的基因和载体的自身环化和反向连接，因此需选用两种限制酶，即选择 BclI、HindIII 切割 Luc 基因载体可降低“空载”概率。根据启动子的位置和基因载体上限制酶的位置，因此需要在引物 1 上添加限制酶 BclI 识别序列，因此引物 1 包含的碱基序列为 5'TGATCAAACCTAT3'。

(2) Kanr 为卡那霉素抗性基因做为标记基因，供重组 DNA 的鉴定和选择，因此为便于筛选，应将大肠杆菌接种在含卡那霉素的培养基中；转基因成功的斑马鱼只在肝脏中发出荧光指示污染，说明 vtg 基因只在肝脏中特异性表达。

(3) 由图可知 2A 肽的作用可使两侧基因形成完整蛋白，即 P2A 有助于序列两侧的基因表达成独立的蛋白质。

(4) 可利用显微注射法将目的基因导入动物的受精卵中。由题意可知，在含有雌激素的污水中，转基因斑马鱼可发出荧光，因此可在斑马鱼发育成熟后，往水体中添加雌激素和荧光素检测是否发荧光。

5. 甲 雌雄同株 是 AAtsts 抗螟雌雄同株：抗螟雌株=1：1 不位于 抗螟性状与性别性状间是自由组合的，因此 A 基因不位于 Ts、ts 基因所在的 2 号染色体上 含 A 基因的雄配子不育 1/2 1/6

【详解】(1) 根据题意和实验结果可知，实验一中玉米雌雄同株 M 的基因型为 TsTs，为雌雄同株，而甲品系的基因型为 tsts，为雌株，只能作母本，根据以上分析可知，实验二中 F₁ 的非抗螟植株基因型为 OOTsts，因此为雌雄同株。

(2) 根据以上分析可知，实验一的 F₁AOTsts 抗螟雌雄同株自交，后代 F₂ 为 1AAtsts 抗螟雌株：2AOTsts 抗螟雌雄同株：1OOTsts 非抗螟雌雄同株，符合基因分离定律的结果，说明实验一中基因 A 与基因 ts 插入到同一条染色体上，后代中抗螟雌株的基因型为 AAtsts，将 F₂ 中 AAtsts 抗螟雌株与 AOTsts 抗螟雌雄同株进行杂交，AAtsts 抗螟雌株只产生一种配子 Ats，AOTsts 抗螟雌雄同株作为父本产生两种配子，即 Ats、OTs，则后代为 AAtsts 抗螟雌株：AOTsts 抗螟雌雄同株=1:1。

(3) 根据以上分析可知，实验二中选取 F₁AOTsts 抗螟矮株雌雄同株自交，后代中出现抗螟雌雄同株：抗螟雌株：非抗螟雌雄同株：非抗螟雌株=3：1：3：1，其中雌雄同株：雌株=3:1，抗螟：非抗螟=1:1，说明抗螟性状与性别之间发生了自由组合现象，故乙中基因 A 不位于基因 ts 的 2 号染色体上，且 F₂ 中抗螟矮株所占比例小于理论值，说明 A 基因除导致植株矮小外，还影响了 F₁ 的繁殖，根据实验结果可知，在实验二的 F₁ 中，后代 AOTsts 抗螟矮株雌雄同株：OOTsts 非抗螟正常株高雌雄同株=1:1，则说明含 A 基因的卵细胞发育正常，而 F₂ 中抗螟矮株所占比例小于理论值，故推测最可能是 F₁ 产生的含基因 A 的雄配子不育导致后代中雄配子只产生了 OTs 和 Ots 两种，才导致 F₂ 中抗螟矮株所占比例小于理论值的现象。根据以上分析可知，实验二的 F₂ 中雌雄同株：雌株=3:1，故 F₂ 中抗螟矮植株中 ts 的基因频率不变，仍然为 1/2；根据以上分析可知，F₂ 中抗螟矮株的基因型雌雄同株为 1/3AOTsTs、2/3AOTsts，雌株基因型为 AOTsts，由于 F₁ 含基因 A 的雄配子不育，则 1/3AOTsTs、2/3AOTsts

产生的雄配子为 2/3OTs、1/3Ots，AOts 产生的雌配子为 1/2Ats、1/2Ots，故雌株上收获的籽粒发育成的后代中抗螟矮植株雌株 AOts 所占比例为 $1/2 \times 1/3 = 1/6$ 。

【点睛】本题考查基因分离定律和自由组合定律的知识点，要求学生掌握基因分离定律和自由组合定律的实质和常见的分离比，能够根据题意和实验结果分析相关个体的基因型及其比例，充分利用题干中的条件和比例推导导致后代比例异常的原因，这是该题考查的难点，能够利用配子法计算相关个体的比例，这是突破该题的重点。

6. (1) b、c (答全得分) 使 DNA 聚合酶沿着 3'端连接脱氧核苷酸 电泳
(2) 5' 磷酸二酯键
(3) 碱基互补配对 5 和 6 3 五
(4) CGTGTG 2

【详解】(1) 流程 1 利用 PCR 技术扩增目的基因时，反应体系中需加入引物，子链的延伸发生在引物的 3'端，且 DNA 单链之间是反向平行的，因此引物需要反向接在模板链的 3'端，因此，图示引物结合的位置为 b、c，引物的作用是使脱氧核苷酸依次连在引物的 3'端，并与模板链之间进行碱基互补配对，即引物的作用表现为使 DNA 聚合酶沿着 3'端连接脱氧核苷酸。PCR 完成以后，常采用电泳技术来初步鉴定 PCR 的产物，电泳的原理是根据 DNA 片段的大小进行鉴定的。

(2) 流程 2 构建 8 碱基单链荧光探针时，其第 1 位和第 2 位碱基是确定的，结合图示可知，探针的 5'端分别添加了红蓝绿黄 4 种颜色的荧光蛋白。DNA 连接酶催化形成磷酸二酯键连接两个 DNA 片段，进而形成 DNA 分子的基本骨架。

(3) 流程 3 测序时，荧光探针与待测序列通过碱基互补配对原则配对，之后通过化学方法在第 5 和 6 位碱基之间进行切割并发出代表探针第 1、2 位碱基的荧光信号被计算机记录，每次测序的位置间隔 3 个碱基。在测序完成后，要将新连接的 DNA 单链变性并洗脱。接着用引物 n-1 进行第二轮测序。引物 n-1 与引物 n 的区别是，二者在与接头配对的位置上相差一个碱基。以此类推，直至第五轮测序结束可以完成所有位置的碱基测序。

(4) 下图为某次测序结果，根据黄的第一位碱基是 A 并结合表格可推测，黄色荧光对应的序列为 AG，因而对应红色荧光序列为 GC，结合表格可分析出四个绿色依次为 CA、AC、CA、AC，而后对应的红色为 CG，因此相应的子链序列为 AGCACAC，由于第一个碱基 A 对应的 T 是已知的，因此，根据碱基互补配对原则可以看出模板上对应的碱基序列为 CGTGTG。该测序法的最大优点在于每个测量位点进行了 2 次测序，即进行了两次重复的配对，因而大大提高了准确率。

7. (1) 显性基因纯合致死

(2) 极少数性原细胞形成配子时同源染色体发生片段交换

(3) 一对同源染色体的两条染色体各含一个非等位致死基因；致死基因间未发生交换

(4) 翻翅：星状眼=1:1 (不出现新性状) 翻翅：野生型=2:1 全为翻翅

【详解】(1) 组合一和组合二中均出现了性状分离，故展翅和粘胶眼是显性性状，野生型是隐性性状。根据基因分离定律的实质可知，无致死情况下， F_1 的分离比应为 3:1，但展翅：野生型=2:1，粘胶眼：野生型=2:1，说明显性基因纯合致死。

(2) 展翅和粘胶眼控制基因均位于 3 号染色体，都属于显性性状， F_1 展翅粘胶眼 (杂合子) 雌雄果蝇杂交， F_2 中出现少量非展翅粘胶眼，说明控制 F_1 展翅显性基因和粘胶眼显性基因连锁在同一条染色体上，因此 F_2 中出现少量非展翅粘胶眼是因为极少数性原细胞形成配子时同源染色体发生片段交换。

(3) 据题意可知，翻翅基因 (Cy) 和星状眼基因 (S) 均位于 2 号染色体上，且纯合致死。野生型用 + 表示，即基因型 Cy^+/Cy^+ ， S^+/S^+ 均致死，只有基因型 Cy^+/S^+ 杂合子存活，则一对同源染色体的两条染色体各含一个非等位致死基因，致死基因间未发生交换。

(4) ①诱变处理后的雄果蝇与平衡致死系的雌果蝇基因型为 $++/++$ (突变)、 $Cy+/S+$, F_1 的基因型 $Cy+/++$ 、 $Cy+/++$ (突变)、 $S+/++$ 、 $S+/++$ (突变)四种。若待测雄果蝇未发生显性突变或发生了显性致死突变, 则 F_1 的基因型只有 $Cy+/++$ 和 $S+/++$ 两种, 表现型及比例为翻翅: 星状眼=1: 1。

②选取 F_1 中翻翅雄果蝇 $Cy+/++$, 再与平衡致死系的雌果蝇 $Cy+/S+$ 单对交配, 杂交得到 F_2 。 F_2 的基因型为 $Cy+/Cy+$ (致死), $Cy+/S+$, $Cy+/++$, $S+/++$, 在 F_2 中选取翻翅个体 $Cy+/++$ 相互交配, 得到 F_3 , 基因型及比例为 $Cy+/Cy+$: $Cy+/++$: $++/++=0:2:1$, 若待测雄果蝇 2 号染色体上未发生基因突变, $Cy+/++$ 表现为翻翅, $++/++$ 表现为野生型, 即翻翅: 野生型=2:1。若待测雄果蝇 2 号染色体上发生了隐性且致死的基因突变, $++/++$ 表现为致死, 只有 $Cy+/++$, 即全部为翻翅。

8. (1) X^TY^T 、 X^TY^t 、 X^tY^T 有关 X^TX^t 与 X^tY^t

(2) 红眼♀: 无眼♀: 白眼♂: 无眼♂=1:1:1:1 少于

(3)让⑥×③、⑥×④、⑥×⑤得 F_1 , F_1 雌雄相互交配, 观察 F_2 的性状及比例, 若 F_2 中出现三种性状且比例为 1:2:1 的杂交组合, 则 A/a 与该杂交亲本的突变基因在同一条染色体; 否则在 X 染色体上

【详解】(1)由表可知, 截毛为隐性性状, 由位于 X、Y 染色体上的基因 t 控制, 则果蝇种群中刚毛雄果蝇的基因型有 X^TY^T 、 X^TY^t 、 X^tY^T , 由于该基因位于性染色体上, 所以其所控制的性状的遗传与性别有关。有一只 XXY 的截毛果蝇 ($X^tX^tY^t$), 说明亲本提供 X^tX^t 或 X^tY^t 配子, 又由于其变异的原因只可能是由某亲本形成配子时, 在减数第二次分裂中染色体分配异常造成, 若是父本异常, 可能提供的是 X^tX^t 或 Y^tY^t 配子, 说明是其母本异常导致的, 即该果蝇是由 X^tX^t 和 Y^t 受精形成的, 又因为双亲为刚毛, 则双亲应为 X^TY^T 与 X^tY^t 。

(2)⑤基因型为 eeX^RX^r , 若甲 e 所在的染色体发生了移接, 则其可产生配子 EX^r : EeX^r : X^r : $eX^r=1: 1: 1: 1$, ⑤可产生 eX^R 和 eY 配子, 由于子代个体若含有结构异常的染色体会致死 50%, 则红眼♀ EeX^RX^r : 红眼♀ $EeeX^RX^r$: 无眼♀ eX^RX^r : 无眼♀ eeX^RX^r : 白眼♂ EeX^rY : 白眼♂ $EeeX^rY$: 无眼♂ eX^rY : 无眼♂ $eeX^rY=2: 1: 2: 1: 2: 1: 2: 1$, 即红眼♀: 无眼♀: 白眼♂: 无眼♂=1: 1: 1: 1。 F_2 中有眼个体 (红眼♀ EeX^RX^r : 红眼♀ $EeeX^RX^r=2: 1$, 白眼♂ EeX^rY : 白眼♂ $EeeX^rY=2: 1$) 自由交配, 由于 e 转移到 X 染色体上, 导致部分 X 染色体不正常, 而 Y 正常, 所以 F_2 中有眼雌性个体数少于有眼雄性个体数。

(3)由表可知, 相关基因可能在 X、Y、II、III、IV 上, 其中⑥为短肢, 可选用⑥分别与③、④、⑤杂交, F_1 雌雄 (若在同一染色体上, 则可即为 Aa) 相互交配, 观察 F_2 的性状及比例, 若 F_2 中出现三种性状且比例为 1:2:1 的杂交组合 (原则上出现 $AA: Aa: aa=1: 2: 1$), 则 A/a 与该杂交亲本的突变基因在同一条染色体; 否则在 X 染色体上。

9. (1) $1/2$ 非香个体为杂合子, 含米香基因的 8 号染色体遗传于甲, 含非香基因的 8 号染色体遗传于乙 染色体互换(或染色体交叉交换)

(2) M1~M2 和 M5~M7 M3~M6 M3~M5

(3)不能。将得到的 DNA 片段导入米香水稻细胞获得转基因植株, 转基因植株自交后检测其稻米的香味

【详解】(1)米香水稻甲和非香水稻乙杂交, F_1 全为非香, 说明非香是显性性状, 设相关基因为 A、a, 则甲的基因型为 aa, 乙的基因型为 AA, F_1 基因型为 Aa。 F_1 与甲 (aa) 杂交, 即 $Aa \times aa$, 根据分离定律, F_2 的基因型及比例为 $Aa:aa=1:1$, 所以 F_2 中非香个体 (Aa) 所占比例为 1/2。表中“-”表示两条 8 号染色体上的分子标记分别来自亲本甲和亲本乙, 非香个体含“-”型分子标记, 是因为 F_1 (Aa) 产生了含有来自亲本乙染色体 (含 A 基因) 的配子, 与甲产生的配子结合, 所以其 8 号染色体上部分分子标记来自亲本乙。米香个体的基因型为 aa, 按照正常情况其 8 号染色体上分子标记都应亲本甲一样为“+”, 但出现含“-”型分子标

记的米香个体，是因为 F₁ 产生配子时发生了交叉互换，导致部分来自亲本乙的分子标记所在片段交换到了含有 a 基因的染色体上；

(2) 观察米香个体 1 和米香个体 2，其分子标记情况显示，M1-M2 之间的分子标记对于米香个体都是“-”，M5 - M7 之间的分子标记对于米香个体都是“+”，说明如果基因在 M1-M2 之间和 M5-M7 之间，就不会出现这种情况，所以该对基因不位于分子标记 M1~M2 和 M5~M7 之间；看非香个体 3、4、5，其分子标记显示 M1- M3 之间有的个体为“-”，有的为“+”，说明基因不在 M1 - M3 之间；其分子标记显示 M3- M5 之间有的个体为“-”，表明该对基因位于分子标记 M3 - M6 之间；其分子标记显示在 M6- M7 之间个体 3、4 全为“-”、个体 5 全为“+”，表明该对基因不在 M6-M7 之间。综合米香个体和非香个体的结果，控制非香和米香性状的等位基因位于分子标记 M3 - M5 之间；

(3) 不能。上述推测是控制非香和米香性状的等位基因位于分子标记 M3 - M5 之间，仅提取水稻乙的总 DNA 为模板，依据 M3 - M5 之间的分子标记设计引物进行 PCR 扩增，获得一定长度的 DNA 片段，只能说明在 M3 - M5 之间有 DNA 片段，但不能确定该片段就是控制非香和米香性状的等位基因。补充实验设计思路：将得到的 DNA 片段导入米香水稻细胞获得转基因植株，转基因植株自交后检测其稻米的香味。

10. (1)空间结构 (2)引物 2 和引物 4(3)可逆性/稳定性

(4) L-C 蛋白模块定位到细胞膜上→启动细胞凋亡通路，诱导肿瘤细胞凋亡 APC 摄取、加工和呈递肿瘤抗原→活化的细胞毒性 T 细胞识别并裂解肿瘤细胞

(5)①将 L 细胞和 G 细胞包埋于不同厚度的琼脂块中，用以模拟人体不同组织深度；

②利用冷却装置控制温度在 25℃/ 37℃ 之间转换处理 L 细胞，利用光源控制光照处理 G 细胞；③利用荧光检测系统，分别检测 L 细胞和 G 细胞的荧光强度

【详解】(1) 由图 1 可知，L 蛋白在 25℃下通过 空间结构改变 (如暴露疏水区域或膜定位信号)，使其锚定到细胞膜，进而活化 X 蛋白。温度变化诱导的构象变化是蛋白质定位调控的常见机制。

(2) 基因表达载体的筛选需扩增完整的 L-X 融合基因。引物 2 位于启动子下游，引物 4 位于 X 基因下游 (图 2)，两者组合可扩增包含 L 基因和 X 基因的连接区域，验证载体是否成功构建。因此最佳引物组合是图 2 中的引物 2 和引物 4。

(3) 多次温度转换后响应模式相似，表明 L-X 蛋白模块在温度变化中能稳定结合细胞膜并恢复初始状态，具有一定的稳定性。

(4) 局部冷却激活 L-C 模块，导致右侧肿瘤凋亡并释放抗原，激活系统性免疫应答，T 细胞对左侧肿瘤产生特异性杀伤。分析题意：整个途径应该为右侧后腿局部冷却处理→L-C 蛋白模块定位到细胞膜上→启动细胞凋亡通路，诱导肿瘤细胞凋亡→释放肿瘤抗原→APC 摄取、加工和呈递肿瘤抗原→活化的细胞毒性 T 细胞识别并裂解肿瘤细胞→左侧后腿肿瘤被抑制。

(5) L-C 优势：冷却可通过热传导作用于深层组织，而光在深层组织衰减严重，L-C 模块激活效率更高。

实验思路：①将 L 细胞和 G 细胞包埋于不同厚度的琼脂块中，用以模拟人体不同组织深度。

②利用冷却装置控制温度在 25℃/ 37℃ 之间转换处理 L 细胞，利用光源控制光照处理 G 细胞。

③利用荧光检测系统，分别检测 L 细胞和 G 细胞的荧光强度。