

睾丸切除对麝鼠香腺形态和麝鼠香成分的影响

靳玮江 张天祥 张美善 韩香雨 蒋元琳

张宝峰 李大卫 刘树强* 胡德夫

北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083

摘要: 对麝鼠 (*Ondatra zibethicus*) 去势, 探讨睾丸切除对麝鼠香腺形态和麝鼠香成分的影响。6 只成年雄性麝鼠, 随机分为去势组和对照组, 每组 3 只。麝鼠香腺内香液排尽后, 施行去势手术。去势 30 d 后, 麻醉处死动物, 采集和分离麝鼠的血清备用, 然后采集麝鼠香。采用酶联免疫吸附法 (ELISA) 检测血清和麝鼠香中的睾酮 (T) 含量。取香腺, 测量其长度, H.E 染色观察香腺组织结构的变化, 并测量腺细胞直径。同时, 利用气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 测定麝鼠香化学成分。去势组的血清中睾酮含量极显著低于对照组 ($t = 5.270, P < 0.01$), 去势组麝鼠香中睾酮含量显著低于对照组 ($t = 3.229, P < 0.05$)。形态学上, 去势组和对照组的麝鼠香腺长度无显著差异 ($t = 1.243, P > 0.05$)。组织学上, 去势组腺细胞直径显著缩小 ($t = 9.434, P < 0.01$)。麝鼠香中, 去势组和对照组含量最高的 3 类成分相同, 均为大环类、类固醇和脂肪酸。其中, 去势组的大环类物质含量显著升高 ($t = -3.084, P < 0.05$), 而类固醇含量极显著降低 ($t = 3.407, P < 0.05$)。完成建立麝鼠去势模型, 切除睾丸后导致麝鼠香腺腺细胞形态和麝鼠香成分发生了变化。

关键词: 麝鼠; 去势; 香腺; 麝鼠香

中图分类号: Q956 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2021) 04-582-09

Changes in Scent Gland Morphology and Musk Compositions after Castration by Testicular Resection in the Muskrat

JIN Wei-Jiang ZHANG Tian-Xiang ZHANG Mei-Shan HAN Xiang-Yu JIANG Yuan-Lin

ZHANG Bao-Feng LI Da-Wei LIU Shu-Qiang* HU De-Fu

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Castration surgery was accomplished on muskrats (*Ondatra zibethicus*) to observe the changes in scent gland morphology and musk compositions after castration. Six adult male muskrats were randomly divided into castrated and control groups (3 in each group). The musk in scent glands was drained, and then

基金项目 北京市自然科学基金项目 (No. 5202016);

* 通讯作者, E-mail: liushuqiang@bjfu.edu.cn;

第一作者介绍 靳玮江, 男, 硕士研究生; 研究方向: 野生动物生理学。E-mail: weijiangan135@126.com。

收稿日期: 2020-12-14, 修回日期: 2021-03-26 DOI: 10.13859/j.cjz.202104010

both testes were removed under general anesthesia. Thirty days after the castration, the muskrats were anesthetized and killed, and the serum and the musk were collected. The testosterone (T) concentration in serum and muskrat musk was detected by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). The scent glands were collected, and their lengths were measured. The paraffin sections of scent glands were stained by the H.E method, and the diameters of glandular cells were measured. And then, the compositions of muskrat musk were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The comparison of differences between the two groups was analyzed with independent-samples T test method using SPSS 20.0. The concentration of testosterone in the serum of the castrated group was significantly lower than that of the control group ($t = 5.270, P < 0.01$), and the testosterone content of muskrat musk in the castrated group was also significantly lower than that of the control group ($t = 3.229, P < 0.05$) (Table 1). Morphologically, the lengths of muskrat scent glands in the castrated group and the control group were similar and there was no significant difference ($t = 1.243, P > 0.05$). Histologically, the Diameter of glandular cells of the castrated group was significantly reduced compared with the control group ($t = 9.434, P < 0.01$) (Fig. 2). The GC-MS analysis showed that both groups contained three rich compositions: macrocyclics, steroids and fatty acids. Among them, the content of macrocyclics in the castrated group was significantly higher ($t = -3.084, P < 0.05$), while the content of steroids was significantly reduced ($t = 3.407, P < 0.05$) (Table 2). Thus, the muskrat castration model was established, in which the morphology of the muskrat scent gland cells and the compositions of muskrat musk changed.

Key words: Muskrat, *Ondatra zibethicus*; Castration; Scent glands; Muskrat musk

泌香动物特有的外分泌腺——香腺，可分泌具有特殊气味的分泌物，主要用于动物之间的化学通讯。林麝 (*Moschus berezovskii*)、马麝 (*M. chrysogaster*)、麝鼠 (*Ondatra zibethicus*)、河狸 (*Castor fiber*) 和大灵猫 (*Viverra zibetha*) 等泌香动物都在我国有分布 (张小谷等 1999)。其中，林麝、马麝等麝科动物的雄性个体的香腺分泌的麝香可以作为名贵药材和高级香料 (郝吉福等 2004)。目前，圈养林麝是我国天然麝香的主要获取来源，但圈养后林麝的麝香产量和品质存在普遍下降的问题，尤其是代表麝香质量的关键指标成分麝香酮含量显著下降 (盛和林等 2007, 李硕等 2011)。药理试验结果表明，麝香中的大环酮化合物麝香酮 (3-甲基环十五烷酮) 是麝香最主要活性成分 (Liang et al. 2010, Du et al. 2018)。因此，探究麝科动物泌香的调控机理对提高麝科动物的麝香产量和改善麝香的品质具有重要的意义。但由于林麝、马麝等麝类是国家 I 级

保护野生动物，且其生性机警、胆怯的生物学特质导致无法从生理层面对麝类开展香腺泌香调控机理的研究。因此，有必要寻找与麝类的香腺具有相似泌香特性的动物或组织，对其展开研究并获取其香腺泌香机理，最终用于指导麝类的麝香生产。

目前研究表明，麝香和麝鼠香分别是雄性林麝和雄性麝鼠香腺分泌的信息素 (徐振营等 1986, Fan et al. 2018)。虽然麝香和麝鼠香的化学成分复杂，但多种主要化学成分相同或相似，都以大环类物质 (如麝香酮、环十五烷酮) 和类固醇 (如胆固醇) 为主 (刘科峰等 2008, Jin et al. 2009, 汪雨等 2011)。同时，这两个物种的香腺具有相似的组织学结构、细胞形态和发育过程 (毕书增等 1985, 陈玉山等 2007)。此外，林麝和麝鼠香腺是雄性林麝和麝鼠的特殊副性征。其中，林麝泌香期 (5~7 月) 的雄激素水平调控了林麝香腺的泌香启动，而林麝体内高雄激素含量维持的时间与其泌香时间成

正相关(洪沂升等 1981, 白康等 2013)。而与林麝相比, 虽然麝鼠泌香时间更长(3 ~ 10 月), 但雄激素同样在调控麝鼠香腺泌香过程中发挥重要作用(Zhang et al. 2017a)。由此可知, 林麝和麝鼠香腺的发育及功能都受周期性变化的雄激素调控(Lu et al. 2014, 孙太福等 2020)。香腺的分泌物成分、形态与发育、受雄激素调控等相似或相同的结果, 证明林麝与麝鼠的香腺泌香机理存在相似性。因此, 探究麝鼠的香腺泌香机理将推动麝类香腺泌香机理的研究。

雄性动物体内雄激素主要是由睾丸的间质细胞合成与分泌的, 而雄激素控制雄性动物的生殖器官和附属性组织的发育和功能。同样, 雄激素在香腺的发育和泌香过程中发挥重要作用(Zhang et al. 2017a, 王静等 2020)。但对麝鼠雄激素含量与其香腺发育和泌香的关系缺乏研究, 因此, 有必要在麝鼠泌香期通过消除内源性雄激素, 开展诸如注射不同水平外源雄激素的研究, 探究雄激素含量在调控香腺发育和泌香过程中发挥的作用。消除内源雄激素的方法中, 对雄性动物进行去势是非常方便和有效的。本研究旨在构建雄性麝鼠去势模型, 继而分析摘除睾丸对香腺形态和麝鼠香成分的影响。同时, 通过此模型获得的数据将有利于后续开展外源雄激素注射实验, 进一步探究雄激素如何调控香腺发育、启动泌香和香液合成等。

本研究在泌香期(7 和 8 月)对雄性麝鼠采用麻醉后摘除其双侧睾丸, 并对术后的麝鼠护理 30 日, 根据观察麝鼠状态和检测血清睾酮(testosterone, T)含量判断造模是否成功。通过制作香腺组织切片, 观察睾丸切除后香腺的外观形态和香腺细胞形态学变化, 初步评估雄激素缺乏对香腺发育的影响。此外, 通过气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定去势组和对照组麝鼠香化学成分, 由麝鼠香成分的改变初步评估雄激素缺乏对香腺泌香的影响。

1 材料与方法

1.1 实验动物

成年雄性健康麝鼠 6 只, 年龄均为 1 岁, 体重约为 1.5 kg, 购买自河北辛集金牧科技有限公司的麝鼠场, 饲养于河北辛集金牧麝鼠场, 麝鼠生活的窝舍是麝鼠场特别建造的, 位于室外, 动物自由饮水和进食。所有动物实验操作均符合国家实验动物福利伦理的相关规定, 并经过北京林业大学动物伦理委员会审核(审批号: EAWC_BJFU_20200001)。

1.2 实验方法

1.2.1 动物分组和去势前排香 6 只雄性麝鼠随机分为去势组和对照组 2 组, 每组 3 只。所有动物适应生活环境。在去势前, 将麝鼠香腺内已有的麝鼠香全部排尽。具体操作如下: 一人负责将麝鼠竖直保定, 另一人向下挤压香腺外部的皮毛(约处于麝鼠阴茎向上 3 cm), 麝鼠香腺内的麝鼠香液从阴茎包皮内面的泌香管口流出, 直至多次挤压后再无香液排出。两组麝鼠均采用上述方法排尽麝鼠香。

1.2.2 去势和术后护理 麝鼠去势方法: 肌肉注射赛拉嗪, 1 mg/kg 麻醉, 将麝鼠仰卧位固定, 剪去麝鼠腹中下部被毛, 采用碘伏消毒。在麝鼠腹部阴茎向上 4 cm 处, 做长约 1 cm 的纵行切口, 向两侧分离皮肤、筋膜和肌肉, 并剪开肌肉层, 打开腹腔。以无齿镊探入腹腔, 拉拽出睾丸及带有的脂肪组织, 采用 0 号手术线结扎连接睾丸的血管, 结扎后, 将睾丸、附睾及周边的脂肪组织全部切除; 将其他组织轻轻还纳入腹腔, 分别缝合肌肉层和皮肤, 并用酒精棉球对切口消毒。肌肉注射盐酸苯噻啶 0.003 ~ 0.010 ml/kg, 催醒麝鼠, 将麝鼠放回窝舍。对照组麝鼠剪开同样部位, 但不摘除其组织。

术后护理: 术后 7 d 内, 在麝鼠饲料中添加抗生素药物以防止感染, 每日 9 时和 15 时左右更换水源、清理粪便和消杀。去势手术 7 d 后, 除不再添加抗生素药物, 其他护理照旧。

1.2.3 样品采集 去势手术 30 d 后, 麝鼠经赛

拉啉 (1 mg/kg) 肌肉注射麻醉后, 仰卧位固定, 然后进行心采血。取血方法: 用一次性采血针刺入胸腔, 针尖刺入心时, 血液由于起搏而流入采血针内, 之后立即将采血针的另一端插入添加有抗凝剂的采血管内, 3 000 r/min 离心 5 min, 分离血浆得到血清, -20 °C 保存, 用于睾酮含量的检测。

解剖麝鼠, 摘取其香腺, 将香腺内的麝鼠香液挤压到离心管内, 低温保存, 然后将香腺组织置于 4% 多聚甲醛中固定 24 h, 再转移至 70% 酒精中保存, 后续用于组织学观察。

1.3 血清和麝鼠香中的睾酮水平检测

参照王毅花等 (2016) 的林麝粪便中类固醇激素的提取方法提取麝鼠香中的睾酮。具体操作如下: 取 0.15 g 麝鼠香于 2 ml 离心管中, 加入 1.5 ml 预冷的 90% 酒精, 漩涡震荡器震荡混匀。3 000 r/min 离心 15 min。吸取上清 1 ml 于新的离心管中, 并敞开离心管口, 采用 70 °C 烘箱持续 6 h 烘干。烘干后, 加入 1 ml PBS 缓冲液, 用超声波清洗机震荡 5 min, 获得含有睾酮的麝鼠香提取物。

采用酶联免疫吸附法 (enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA) 测定血清和麝鼠香提取物中的睾酮含量。

1.4 香腺的组织学观察

香腺组织经过梯度酒精脱水后, 置于二甲苯中透明, 之后浸泡在 60 °C 的熔融石蜡中。石蜡包埋完成后, 用切片机 (KD-2260, 浙江省金华市科迪仪器设备有限公司) 将样品切成厚度为 5 μm 的切片, 60 °C 烘片 3 h, 收片常温保存。脱蜡水化后, 采用苏木精染液染色 3 min, 1% 盐酸酒精分化, PBS 溶液中, 50 °C 水浴返蓝 20 min, 置于伊红染液 (货号 G1100, 北京索莱宝生物科技有限公司) 1 min, 自来水冲洗 2 min, 脱水封片, 显微镜下观察。

1.5 麝鼠香成分检测

取 50 mg 麝鼠香于离心管中, 加入 1 ml 二氯甲烷, 漩涡震荡器震荡 1 min。气相色谱-质谱 (GC-MS) 条件: DB-1 气相色谱柱 (28.0

m \times 0.25 mm \times 0.25 μm); 载气为高纯氦气 (99.999%); 流量 1.0 ml/min, 进样量 1 μl , 进样口温度 270 °C, 不分流进样。程序升温, 初始温度为 100 °C, 保持 2 min, 以 6 °C/min 的速率升温至 280 °C, 保持 10 min。离子源为 EI 源, 电子能量 70 eV, 质量扫描范围 (m/z) 为 20.0 ~ 400.0, 离子源温度 750 °C。

获得的质谱数据通过美国国家标准技术研究院 (national institute of standards and technology, NIST) 质谱图库进行检索及分析, 再结合有关文献进行人工谱图分析, 确定麝鼠香的各种组成物质。采用面积归一化法计算每种组分含量。

1.6 数据分析

应用 SPSS 20.0 处理, 组间差异比较采用独立样本 t 检验, 实验数据以平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。 $P < 0.01$ 代表极显著差异, $P < 0.05$ 代表显著差异。

2 实验结果

2.1 麝鼠一般情况观察

采用外科手术摘除雄性麝鼠双侧睾丸, 完成去势 (图 1)。去势手术前已排尽所有麝鼠香腺内香液, 共对 3 只麝鼠去势。术后经过护理, 全部麝鼠均正常存活 30 d。去势组和对照组麝鼠精神状态相似且良好, 反应灵敏。在预实验中, 共对 3 只麝鼠进行了去势, 这些麝鼠由于后期护理不及时, 因感染而死亡。

2.2 血清和麝鼠香中的睾酮水平

去势组麝鼠血清睾酮含量极显著低于对照组 ($t = 5.270$, $P < 0.01$), 去势组麝鼠香中的睾酮含量显著低于对照组 ($t = 3.229$, $P < 0.05$) (表 1)。

2.3 香腺组织形态学变化

对照组香腺饱满, 表面更为光滑润泽, 而去势组则出现皱缩 (图 2a ~ d)。去势组与对照组的香腺长度相近 ($t = 1.234$, $P > 0.05$), 分别为 (4.28 \pm 0.24) cm 和 (4.08 \pm 0.31) cm。香腺的 H.E 染色结果发现, 对照组和去势组都存

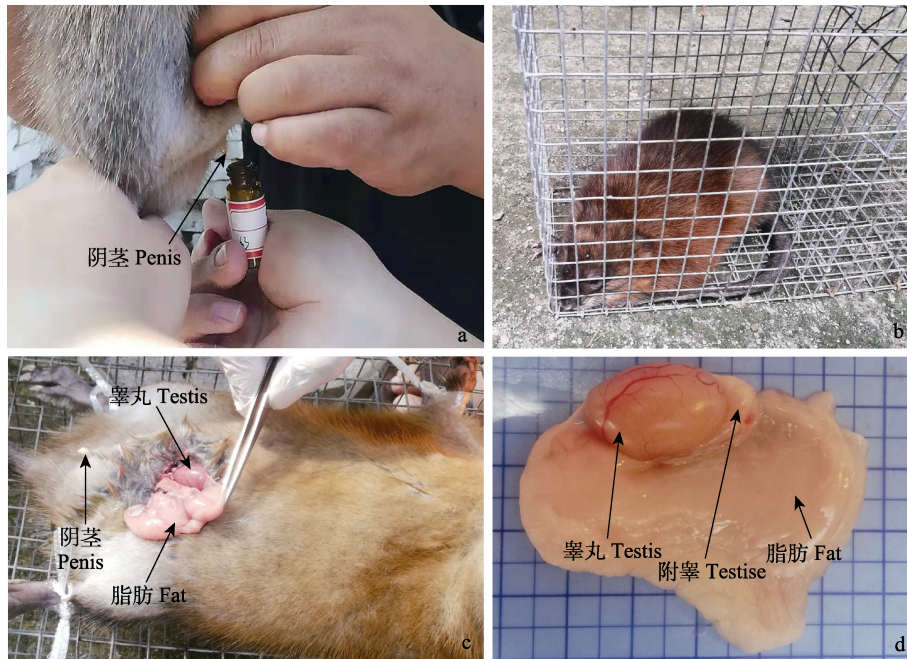


图 1 麝鼠去势流程

Fig. 1 Muskrat castration

a. 去势手术前采香; b. 麝鼠麻醉后; c. 结扎并摘除睾丸; d. 摘除的睾丸。
a. Musk collection before castration; b. Muskrat anesthesia; c. Ligation and removal of the testis; d. Testis.

表 1 对照组和去势组的麝鼠血清和麝鼠香中的睾酮含量 (平均值 ± 标准差, $n = 3$)

Table 1 Testosterone content of serum and muskrat musk in control group and the castrated group (Mean ± SD, $n = 3$)

组别 Group	血清 Serum	麝鼠香 Muskrat musk
	睾酮 Testosterone (µg/L)	睾酮 Testosterone (µg/g)
对照组 Control group	0.94 ± 0.170	0.62 ± 0.067
去势组 Castrated group	0.37 ± 0.069**	0.47 ± 0.045*

与对照组相比, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

Compared with control group, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

在腺细胞、间质细胞和上皮细胞 (图 2e, f)。其中, 上皮细胞排列紧密, 间质细胞分布于上皮细胞和腺细胞之间以及腺细胞和腺细胞之间。对照组和去势组的腺细胞直径分别为 $(17.55 \pm 2.61) \mu\text{m}$ 和 $(10.23 \pm 1.49) \mu\text{m}$ 。与

对照组相比, 去势组腺细胞细胞质萎缩, 腺细胞直径显著变小 ($t = 9.434, P < 0.01$) (图 2e, f)。

2.4 麝鼠香成分变化

经气相色谱-质谱联用法 (GC-MS) 检测麝鼠香化学成分, 以峰面积占比来表示物质成分占比。麝鼠香占比最高的前三类成分见表 2, 其中, 大环类占比最高, 类固醇次之, 最后是脂肪酸。与对照组相比, 去势麝鼠的麝鼠香中大环类物质含量显著增加 ($t = -3.084, P < 0.05$), 类固醇含量显著降低 ($t = 3.407, P < 0.05$), 脂肪酸含量二者差异不显著 ($t = -1.525, P > 0.05$)。大环类物质主要包括环十七醇、灵猫醇和环十七酮, 含量主要发生变化的也是这三种物质。类固醇主要包括胆固醇、胆甾 3, 5-二烯和烯胆甾烷醇, 其中含量主要发生变化的是胆固醇。

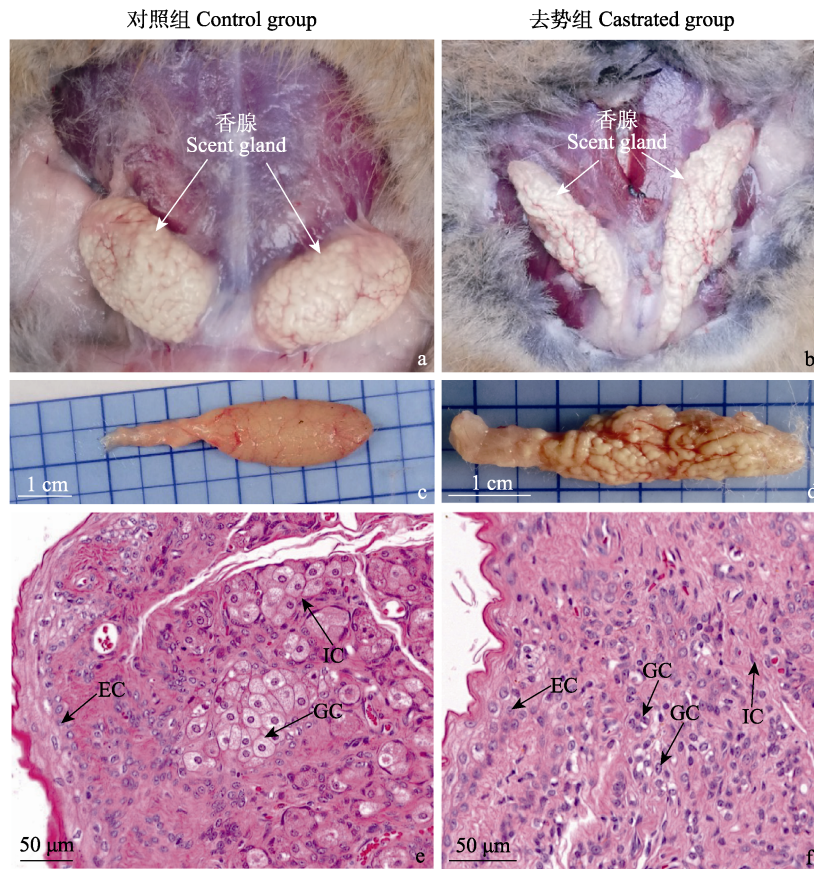


图 2 麝鼠香腺的解剖结构及组织形态学观察

Fig. 2 Anatomical structure and histomorphology of muskrat scent glands

a 和 b. 麝鼠香腺形态解剖位置；c 和 d. 香腺的形态；e 和 f. 香腺的组织学结构。

a and b. Anatomical positions of scent glands in control and castrated groups. c and d. Morphological result of scent glands in control and castrated groups. e and f. Histological structure of muskrat scent glands in control and castrated groups.

EC. 上皮细胞；GC. 腺细胞；IC. 间质细胞

EC. Epithelial cells; GC. Glandular cells; IC. Interstitial cells

表 2 对照组与去势组麝鼠香成分

(平均值 ± 标准差, $n = 3$)

Table 2 Compositions of muskrat musk in the control group and the castrated group

(Mean ± SD, $n = 3$)

成分 Composition	对照组 (%) Control group	去势组 (%) Castrated group
大环类 Macrocycles	59.87 ± 3.97	69.06 ± 3.30 [*]
类固醇 Steroids	27.50 ± 6.46	14.69 ± 0.86 [*]
脂肪酸 Fatty acids	1.24 ± 0.51	2.39 ± 1.20

与对照组相比, * $P < 0.05$.

Compared with control group, * $P < 0.05$.

3 讨论

不同于林麝，麝鼠不受保护生物学限制，可以开展一系列生理学实验。其中，与麝鼠香腺发育和泌香相关的研究包括在非泌香期转化生长因子- β 通路和钙离子通路与腺细胞凋亡的关系 (Li et al. 2017a)，过氧化物酶体 (Zhang et al. 2019)、脂联素受体 (Zhang et al. 2016)、氨基酸代谢通路 (Li et al. 2017b)、促卵泡刺激素受体和促黄体生成素受体 (Zhang et al. 2017b) 在香腺泌香过程所发挥的作用等。此外，Lu 等

(2014) 和 Zhang 等 (2017a) 的研究表明, 血清雄激素水平随麝鼠睾丸的发育而周期性变化, 雄激素通过与香腺雄激素受体结合, 并在调控麝鼠香腺腺细胞增殖、分化和泌香启动过程中发挥重要作用, 但涉及的具体通路还不清楚。因此, 有必要建立合适的麝鼠实验模型, 探究雄激素在香腺发育和泌香过程中发挥的具体作用。

本研究通过切除双侧睾丸来完成麝鼠的去势。在正式实验中对 3 只麝鼠成功完成去势并使其存活了 30 d。而预实验中对 3 只麝鼠去势, 但均在术后 5~7 d 内死亡。我们认为应从以下 3 个方面来提高麝鼠去势后长时间存活可能性。第一, 术后抗感染阶段减少捕捉和采用饲料中添加抗生素药物。本研究所在麝鼠场人工饲养麝鼠已有 30 多年, 但麝鼠仍胆小易惊, 同时术后剧烈运动可能造成伤口撕裂, 因此, 术后抓捕麝鼠不利于其恢复。第二, 对麝鼠手术去势应采用从腹部摘除睾丸方法。本研究发现麝鼠阴囊下垂不明显, 切开腹部拉取睾丸组织和进行结扎更为方便。第三, 定时换水和消杀窝舍。麝鼠存在水中活动和水中排便的习性, 水中的病菌可能引起腹部伤口炎症, 甚至造成病菌进入腹部内腔导致更为严重的疾病。因此, 应在去势后只给麝鼠以水盆排便, 并定时换水和对麝鼠的窝舍消杀, 减少麝鼠腹部接触水的时间。此外, 麝鼠因胆小、机警和适应水域生活的特性, 需要为麝鼠构建避光、方便麝鼠水中排便的特殊窝舍。

本研究中, 麝鼠去势 30 d 时, 去势组血清睾酮含量极显著低于对照组, 结合两组麝鼠精神状态良好, 成功完成麝鼠去势模型的构建。其中, 为确保在去势后麝鼠香腺泌香可能急剧减少的情况下获取足够麝鼠香用于检测, 选择去势手术 30 d 时处死动物。睾丸是合成睾酮的主要场所, 麝鼠睾丸切除导致血清睾酮含量显著降低, 这与 Allrich 等 (1982) 对长白 × 杜洛克公猪 (*Sus domestica*) 的结果研究一致。同时, 本研究还测定了麝鼠香中的睾酮水平,

发现去势组麝鼠香中的睾酮含量也显著低于对照组, 这与去势后血清睾酮含量降低一致, 同样说明麝鼠在去势后睾酮含量下降。

形态学上, 去势组相比于对照组香腺长度相近。组织学上, 去势组的腺细胞萎缩, 细胞直径显著缩小。这表明雄激素对腺细胞的发育具有重要作用。姜峰等 (2006) 的研究表明, 在非泌香期对麝鼠注射丙酸睾酮可诱导其香腺发育和泌香, 这不仅表明雄激素对香腺发育、功能的重要作用, 也表明在麝鼠去势后, 雄激素缺乏导致香腺内的腺细胞发育和功能受到限制。而在非泌香期, 麝鼠睾丸萎缩, 血清睾酮含量远低于泌香期, 香腺的腺细胞已出现大量萎缩和凋亡 (Zhang et al. 2017a)。此外, 牛远杰等 (1998) 的研究表明, 在去势后前列腺细胞上皮细胞逐渐出现萎缩和凋亡。因此, 雄激素对腺细胞的自噬或凋亡启动的研究有待进一步深入。

本研究中, 去势组麝鼠香中的类固醇含量显著下降且主要为胆固醇, 而大环类化合物含量显著升高。研究表明, 麝鼠的香腺可能具有雄激素合成能力 (Li et al. 2011)。同时也有研究表明, 在皮脂腺内, 5α -双氢睾酮与雄激素受体结合, 进而调节与细胞生长和脂质合成相关的基因, 从而皮脂腺合成和分泌皮脂 (主要成分为酯类和类固醇) (Barrault et al. 2015)。因此, 麝鼠香腺可能也自身合成雄激素, 并通过转化为 5α -双氢睾酮然后与雄激素受体结合调控腺细胞的相关基因, 使其能在睾丸摘除后继续合成麝鼠香。由于麝鼠饲料中不含动物性食物, 因此麝鼠香中的胆固醇均源于自身合成。麝鼠香中的胆固醇含量下降, 可能是因为参与顶浆分泌的麝鼠香腺中腺细胞在去势后对胆固醇的需求下降, 导致腺细胞启动胆固醇负反馈调节, 以避免细胞内胆固醇含量过高带来的毒性 (Espenshade et al. 2007, DeBose-Boyd 2008)。睾丸摘除后, 麝鼠香中的大环类化合物含量升高, 这表明雄激素对香腺合成大环类物质可能具有调控作用。同时, 麝香酮是麝香的

主要活性成分, 探究麝鼠香腺合成大环类化合物的机理也对探究麝香酮的生物合成具有重要启发意义。

综上所述, 本研究成功建立了麝鼠去势模型, 并通过对麝鼠的香腺形态组织学观察和麝鼠香成分检测, 发现切除睾丸后, 腺细胞形态学和麝鼠香成分都出现变化, 这说明去势诱导的雄激素缺乏影响了麝鼠香腺的发育和泌香。通过建立去势模型以达到消除内源雄激素的目的, 注射外源性雄激素, 可以对研究雄激素调控香腺发育和功能进行人为控制。在泌香期, 对去势的麝鼠注射外源性雄激素, 并结合转录组学、蛋白组学等方法, 探究在不同雄激素浓度下, 香腺内基因表达水平与其发育、泌香的关系。建立麝鼠去势模型, 并在此基础上可以进一步开展实验探究雄激素对香腺发育和泌香的调控通路和机制。同时, 林麝与麝鼠的香腺泌香机理相似, 且雄激素同样在林麝泌香过程中发挥重要作用(张争明等 2015, 王静等 2020), 这将有力推动麝鼠和林麝的泌香机理的探究, 并最终用于指导麝鼠的麝鼠香和林麝的麝香生产。

参 考 文 献

- Allrich R D, Christenson R K, Ford J J, et al. 1982. Pubertal development of the boar: testosterone, estradiol-17 β , cortisol and LH concentrations before and after castration at various ages. *Journal of Animal Science*, 55(5): 1139–1146.
- Barrault C, Garnier J, Pedretti N, et al. 2015. Androgens induce sebaceous differentiation in sebocyte cells expressing a stable functional androgen receptor. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 152: 34–44.
- DeBose-Boyd R A. 2008. Feedback regulation of cholesterol synthesis: Sterol-accelerated ubiquitination and degradation of HMG CoA reductase. *Cell Research*, 18(6): 609–621
- Du Y, Gu X, Meng H, et al. 2018. Muscone improves cardiac function in mice after myocardial infarction by alleviating cardiac macrophage-mediated chronic inflammation through inhibition of NF- κ B and NLRP3 inflammasome. *American Journal of Translational Research*, 10(12): 4235–4246.
- Espenshade P J, Hughes A L. 2007. Regulation of sterol synthesis in eukaryotes. *Annual Review of Genetics*, 41: 401–427.
- Fan M, Zhang M, Shi M, et al. 2018. Sex hormones play roles in determining musk composition during the early stages of musk secretion by musk deer (*Moschus berezovskii*). *Endocrine Journal*, 65(11): 1111–1120.
- Jin Y X, Choi S J, Jung E J, et al. 2009. Analysis of volatile components of the musk of *Ondatra zibethicus* by gas chromatography-mass spectrometry. *Korean Journal of Pharmacognosy*, 40(4): 303–308.
- Li Q, Weng J, Zhang H, et al. 2011. Immunohistochemical evidence: testicular and scented glandular androgen synthesis in muskrats (*Ondatra zibethicus*) during the breeding season. *European Journal of Histochemistry*, 52: e32.
- Li Y M, Zhang T X, Zhou J T, et al. 2017a. Transcriptome analysis of muskrat scented glands degeneration mechanism. *PLoS One*, 12(5): e0176935.
- Li Y M, Zhang T, Fan M, et al. 2017b. Comparison of amino acid profiles and metabolic gene expression in muskrat scented glands in secretion and non-secretion season. *Scientific Reports*, 7(1): 41158.
- Liang Q Q, Zhang M, Zhou Q, et al. 2010. Muscone protects vertebral end-plate degeneration by antiinflammatory property. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 468(6): 1600–1610.
- Lu L, Liu S, Li Q, et al. 2014. Seasonal expression of androgen receptor in scented gland of muskrat (*Ondatra zibethicus*). *General and Comparative Endocrinology*, 204: 1–7.
- Zhang H, Zhang F, Zhu M, et al. 2017b. Seasonal expressions of follicle stimulating hormone receptor and luteinizing hormone receptor in the scented gland of male muskrat (*Ondatra zibethicus*). *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 312(4): R569.
- Zhang M, Yang S, Shi M, et al. 2019. Regulatory roles of peroxisomal metabolic pathways involved in musk secretion in muskrats. *Journal of Membrane Biology*, 252(1): 61–75.
- Zhang T X, Li W X, Qi L, et al. 2016. Adiponectin plays a role in energy metabolism for musk secretion in scent glands of

- muskrats (*Ondatra zibethicus*). *Endocrine Journal*, 63(7): 633–641.
- Zhang T X, Peng D, Qi L, et al. 2017a. Musk gland seasonal development and musk secretion are regulated by the testis in muskrat (*Ondatra zibethicus*). *Biological Research*, 50(1): 10.
- 白康, 任战军, 王永奇, 等. 2013. 林麝泌香期性激素变化及其与泌香量的关系. *中国兽医学报*, (6): 956–962.
- 毕书增, 沈琰, 朱定轩, 等. 1985. 麝泌香盛期麝香腺超微结构和麝香分泌研究. *兽类学报*, 5(2): 81–85.
- 陈玉山, 赵伟刚, 赵蒙, 等. 2007. 麝鼠香腺泌香的组织学观察. *动物学杂志*, 42(2): 91–95.
- 郝吉福, 程怡. 2004. 麝香的药理学研究概况. *时珍国医国药*, 15(4): 60–61.
- 洪沂生, 李复东, 邓文明, 等. 1981. 用雄性激素诱导雄麝泌香在生产上应用的探讨. *中药材科技*, (3): 17–19.
- 姜峰, 张学明, 韩小虎, 等. 2006. 麝鼠香囊腺形态学观察及腺上皮体外培养初报. *畜牧兽医学报*, 22(11): 40–43.
- 李硕, 刘文华, 刘发贵, 等. 2011. 不同年限麝香中麝香酮含量 GC-MS 分析. *长春中医药大学学报*, 27(3): 351–353.
- 刘科峰, 李卓, 张慧丽, 等. 2008. 麝鼠香化学成分及药理作用研究. *长春中医药大学学报*, 24(2): 157.
- 牛远杰, 董克权, 白景文. 1998. 去势前后犬前列腺的动态病理学改变. *中华泌尿外科杂志*, 19(7): 429–432.
- 盛和林, 刘志宵. 2007. *中国麝科动物*. 上海: 上海科学技术出版社, 166–168.
- 孙太福, 王静, 蔡永华, 等. 2020. 圈养林麝粪样类固醇激素水平与麝香分泌的关系. *生态学报*, 40(24): 1–7.
- 汪雨, 刘聪, 陈舜琮, 等. 2011. 气相色谱-质谱法初步鉴定不同品质的麝香. *岩矿测试*, 30(1): 59–62.
- 王静, 白瑞丹, 蔡永华, 等. 2020. 圈养林麝麝香分泌时间节律及影响因素. *兽类学报*, 40(5): 485–492.
- 王毅花, 刘树强, 周俊彤, 等. 2016. 林麝粪便中类固醇激素的提取方法. 中国专利公开号: CN104558084A. [P/OL]. [2020-12-10]. <http://www.zhuanlichaxun.net/p-5164177.html>
- 徐振营, 王晋春. 1986. 麝鼠生殖生理的研究. *毛皮动物饲养*, 3(3): 8–10.
- 张小谷, 刘济滨. 1999. 我国陆生泌香动物资源的消退与保护. *江西教育学院学报: 自然科学*, 20(6): 54–56.
- 张争明, 杨静, 王建明, 等. 2015. 林麝泌香期和发情期血清性激素含量的变化. *中药材*, 38(2): 240–244.