

林麝泌香的分子机制研究进展

刘晨苗 洪婷婷 王淑辉 董响贵 任战军*

西北农林科技大学动物科技学院 杨凌 712100

摘要: 林麝 (*Moschus berezovskii*) 是国家 I 级重点保护野生动物, 以分泌麝香而闻名。麝香是雄性林麝的香腺分泌的特殊物质。由于过度猎杀取香、栖息地破碎等原因, 野生林麝的数量急剧下降至濒危。自 1950 年代以来, 我国开展了人工养殖林麝, 积累了丰富经验, 取得了一定成果, 但在林麝营养需要、饲料加工与饲养管理、遗传特征与选育、繁殖、泌香机理与取香等基础理论及关键技术方面研究进展不大, 所以, 林麝种群扩繁速度低, 种群规模不大, 麝香产量不高。本文综述了近年来有关林麝香腺的显微与超微结构、麝香的分泌形成过程、利用分子标记研究麝香的分泌、性激素基因与林麝麝香分泌的关系、林麝泌香相关基因组与转录组研究等方面的研究进展, 以期为深入研究林麝泌香的分子机制提供参考。

关键词: 林麝; 泌香; 分子标记; 分子机制

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2022) 01-152-07

Research Progress on Molecular Mechanism of Musk Secretion in Forest Musk Deer

LIU Chen-Miao HONG Ting-Ting WANG Shu-Hui DONG Xiang-Gui REN Zhan-Jun*

College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Forest Musk Deer (*Moschus berezovskii*) is a kind of national first-class protected wild animal and is famous for secreting musk. The musk is a special substance secreted by the musk gland of male Forest Musk Deer. Due to excessive hunting and habitat fragmentation, the number of wild forest musk deer has dropped sharply to an endangered status. Since the 1950s, artificial breeding of Forest Musk Deer has been conducted in China, accumulated rich experience. However, little progress has been made in both basic theories and key technologies in the many aspects including nutritional needs, feed processing and feeding management, genetic characteristics and breeding, reproduction, as well as musk secretion and extraction, which affect its population growth and musk yield. Understanding the secretion mechanism is essential to increase the yield of musk. This paper reviews the research progress on the microstructure and ultrastructure of Forest Musk Deer gland, the musk secretion process, the regulation of musk secretion as revealed by

基金项目 陕西省林科院科技创新计划专项 (No. SXLK2020-0207), 国家林业和草原局野生动植物保护项目 (No. 2020070212);

* 通讯作者, E-mail: renzhanjun@nwsuaf.edu.cn;

第一作者简介 刘晨苗, 女, 博士研究生; 研究方向: 特种经济动物饲养; E-mail: 2795560013@qq.com。

收稿日期: 2021-03-31, 修回日期: 2021-09-25 DOI: 10.13859/j.cjz.202201016

molecular markers, the relationship between sex hormones and musk secretion, and musk secretion related genome and transcriptome changes, in order to provide a reference for the study of the molecular mechanisms of musk secretion.

Key words: Forest Musk Deer, *Moschus berezovskii*; Musk secretion; Molecular marker; Molecular mechanism

林麝 (*Moschus berezovskii*) 隶属于哺乳纲 (Mammalia) 偶蹄目 (Artiodactyla) 麝科 (Moschidae) 麝属, 国家 I 级重点保护野生动物 (汪松等 2004, 孟根达来等 2018), 以分泌麝香而闻名, 为我国极其重要的资源动物。麝香是雄麝麝香腺分泌的特殊物质, 主要有效成分为麝香酮 (蒋且英等 2018), 对中枢神经系统呈双向性的影响 (安谈红 2010); 麝香具有特异强烈的香气, 在香料工业发挥着重要作用 (Su et al. 2001)。我国是麝的主要分布国, 也是世界上麝资源最丰富的国家, 麝香产量曾占全世界产量的 90% (刘文华等 2005)。由于医药和香料工业对麝香的巨大需求, 以及缺乏科学的保护和严格的管理, 野生林麝种群的数量急剧下降至濒危 (Shrestha et al. 1998, Yang et al. 2003)。同时, 人工养殖林麝长期面临缺乏系统的理论指导, 饲养管理粗放, 其饲养种群长期受到健康状态不稳定和疾病高发的困扰, 严重制约我国养麝业的发展 (魏雨婷等 2016)。林麝数量大幅度减少, 天然麝香难以获取, 必将直接影响我国医药和香料工业 (王岚等 2016)。因此, 为了更好地利用林麝资源, 对人工养殖林麝泌香的分子机制进行研究具有十分重要的意义。

先前基于解剖学 (孙竹珑等 1988)、微卫星分子标记 (赵莎莎 2009)、扩增片段长度多态性 (amplified fragment length polymorphism, AFLP) (陈轩 2007) 和性激素基因 (王勤等 2012) 的研究, 探索了麝香分泌的机制。随着分子生物学技术的迅猛发展, 基因组学、转录组学等新兴测序技术正不断地运用到林麝泌香的分子机制研究中 (王永奇等 2015)。本文就林麝香腺的显微与超微结构、麝香的分泌形成过程、利用分子标记研究麝香的分泌、性激素

基因与林麝麝香分泌的关系以及林麝泌香相关基因组与转录组研究进行综述, 为深入研究林麝泌香的分子机制提供参考。

1 林麝香腺的显微与超微结构

林麝的香腺位于雄性个体肚脐和阴囊之间, 表面被腹部皮肤及胸腹皮肤所覆盖 (He et al. 2014)。腹面隆起部位有两个开口, 阴茎口上方是麝香囊口 (图 1)。香腺由腺体部和香囊部组成, 腺体是分泌香液的器官, 香囊是收集、贮存香液与麝香成熟并最终形成的器官 (沈琰等 1982)。过去几十年间, 我国研究学者对林麝香腺的显微与超微结构进行了一定的研究。

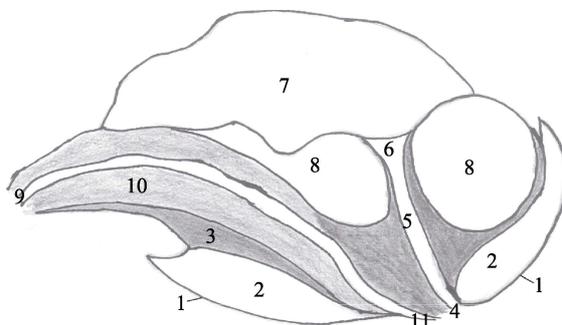


图 1 麝香腺的解剖 (引自冯文和等 1981)

Fig. 1 Anatomic diagram of musk gland (from Feng et al. 1981)

1. 皮肤; 2. 汗腺及皮脂腺; 3. 横纹肌层; 4. 香囊口; 5. 麝香排泄管; 6. 香囊颈部; 7. 香囊体; 8. 麝香分泌腺; 9. 阴茎; 10. 包皮环; 11. 包皮口
1. Skin; 2. Sweat glands and sebaceous glands; 3. Rhabdoid muscle layer; 4. Musk sac mouth; 5. Musk excretion tube; 6. Musk sac neck; 7. Musk sacs; 8. Musk secretory glands; 9. Penis; 10. Foreskin ring; 11. Foreskin

成年林麝香腺的腺体部通过光学显微镜观察, 主要由三部分组成, 分别是腺组织、疏松

结缔组织和横纹肌。结缔组织包裹每个腺体，并与横纹肌纤维将腺组织分隔成许多小叶（冯文和等 1981）。腺体分为腺末房和排泄管两部分，属于复管泡状腺。腺末房由单层柱状上皮细胞构成，细胞核呈卵圆形，多位于细胞中、下端。泌香盛期，腺末房的腺细胞为高柱状，游离部为圆顶状，朝向腺泡腔突出，持续从腺细胞脱落下来（芮菊生等 1984）。排泄管是一个管道，运输麝香液到麝香囊。香囊部是贮存香液、最终形成麝香的器官，由囊体、囊颈和囊口三部分组成。囊体分为黏膜、肌层和外膜。黏膜呈白色，浅层细胞由复层鳞状上皮组成，没有血管，深层细胞连接紧密，毛细血管丰富；肌层为纵横排列的平滑肌层；外膜为疏松结缔组织，含有胶原纤维束和血管（毕书增等 1993）。囊颈部有大量皮脂腺和平滑肌纤维，还有少量腺体排泄管分布。颈部有环状排列的刚毛，相互交叉，伸入麝香囊内。囊口由大量皮脂腺、平滑肌组成，周围肌肉富有伸缩性，控制香囊口的收缩（孙竹珑等 1988）。

超微结构显示，泌香盛期前，腺细胞包括明细胞和暗细胞，暗细胞较多，明细胞较少，且明细胞多分布在暗细胞之间。暗细胞具有较多的游离核糖体和糖元颗粒，内质网、高尔基复合体发达，可以清楚地看到线粒体的存在。明细胞具有较多的线粒体和溶酶体，几乎没有游离核糖体和分泌颗粒。泌香盛期，暗细胞、明细胞都分泌大量的特殊颗粒，但是暗细胞具有较多的溶酶体，高尔基复合体发达，而明细胞内质网较发达。泌香盛期后，胞质内含有极少的分泌颗粒，具有较多的游离核糖体，粗面内质网发达（毕书增等 1987）。囊体部腔面为复层鳞状上皮，浅层细胞是容易剥落的角质鳞片，没有细胞核和细胞器。深层细胞间密切相连，有桥粒存在。囊颈和囊口分布有大量皮脂腺和平滑肌（毕书增等 1993）。

2 麝香的分泌、形成过程

麝香是林麝香腺腺体部分分泌的初香液与香

囊颈和排泄管部皮脂腺分泌的皮脂共同形成。泌香盛期，腺体部腺细胞呈高柱状，游离部呈圆顶状，朝向腺泡腔，持续从腺细胞脱落下来，以顶浆分泌方式分泌大量初香液，初香液经排泄管输送到香囊颈，进入香囊腔后与皮脂一起形成、转化为成熟麝香（郑程莉等 2019）。雄麝泌香存在年周期性，每年 5 至 7 月份都有一次泌香生理反应，短者持续 1 d，长者达十余日，以 3~7 d 者居多（冯达勇等 2020）。每年 7 至 9 月份为麝香成熟期，7 月份麝香成熟率达 80%，8 月份高达 100%（程建国等 2011）。泌香期雄麝睾丸肿大，阴囊水肿、呈粉白状，麝香囊体积增大（王永奇等 2019）。期间，雄麝呈现特定行为反应，采食量、饮水量变小，甚至完全停食，活动也减少，多静卧，但仍会发生一些固有行为（排便、擦臀）（白瑞丹等 2019）。雄麝体内睾酮和雌二醇的含量急剧升高，显著高于正常期（白康等 2013）。研究表明，雄麝睾酮浓度与泌香量显著正相关（孙太福等 2020）。

麝香的分泌与年龄有关（程建国等 2002）。雄麝 1 岁以后开始分泌麝香，这时的麝香呈无香味的乳白色液体；1.5 至 2 岁，雄麝香囊内有成熟的麝香，呈咖啡色的细小颗粒和粉末（张慧珍等 2009）；3 岁时，雄麝分泌完全成熟的麝香，香气浓烈，呈深咖啡色或黑褐色（孔燕萍等 2014）；3 至 13 岁为雄麝泌香旺盛期；13 岁后，雄麝泌香能力逐年减弱，至 15 岁时基本停止泌香（吴建平等 1995）。

此外，雄麝的体重、圈养环境等因素与雄麝麝香分泌及麝香产量也有明显关联（乔佳伦等 2018，王静等 2020）。雄麝泌香启动越早，整体泌香持续时间越短，雄麝泌香盛期时长也越短。圈养麝的泌香量及麝香质量，主要受雄麝个体体况和管理模式等的影响（康发功等 2015，郭妍妍等 2018）。

3 利用分子标记研究麝香的分泌

分子标记 (molecular markers) 以个体间遗

传物质内核苷酸序列变异为基础，是遗传标记中非常重要的一种（王永飞等 2001）。相较于形态学标记、生物化学标记、细胞学标记，DNA 分子标记直接以 DNA 形式出现，不易受环境的影响；与基因的表达无关；标记数量多，在整个基因组分布（戴扬等 2020）。迄今为止，DNA 分子标记技术已经被运用于生物学问题的各个方面。近年来，研究人员利用微卫星 DNA 和扩增片段长度多态性分子标记方法，对林麝泌香的分子机制进行了分析研究。

3.1 基于微卫星位点的分子标记

赵莎莎（2009）利用磁珠富集法筛选了 12 个多态性微卫星位点，选择了其中 8 个位点，对林麝基因组进行了扫描，并对微卫星标记与林麝麝香产量相关性进行了分析，发现 Mb06 和 Mb33 这 2 个微卫星标记位点与麝香产量存在显著的相关性（ $P < 0.05$ ），表明这 2 个位点可能存在影响泌香性能的数量性状位点（quantitative trait locus, QTL），为后续林麝泌香性能的机制研究奠定了基础。

3.2 基于扩增片段长度多态性的分子标记

陈轩（2007）利用扩增片段长度多态性比较各引物组合在 3 组林麝样品中的多态位点比率（percentage of polymorphic loci, PPL）差异，结果显示，泌香量高的组遗传多样性较高，表明林麝的泌香量与遗传多样性之间是正相关关系。此外，陈轩（2007）在泌香量高的组和泌香量低的组间还发现了 34 个等位基因频率分布有显著差异的标记位点。赵莎莎（2009）利用扩增片段长度多态性强大的多态检出能力，筛选出了 34 个在泌香量高的组和泌香量低的组间等位基因频率分布有显著差异的标记位点，这些标记可能会与影响泌香性状的相关遗传因素关联，这一发现与陈轩（2007）的研究结果一致。

4 性激素基因与林麝麝香分泌的关系

关于性激素与林麝泌香活动关系的研究表明，激素调节林麝泌香的途径为，下丘脑至促

黄体激素释放激素（luteinizing hormone releasing hormone, LRH）至垂体至促黄体生成素（luteinizing hormone, LH）和促卵泡生成素（follicle stimulating hormone, FSH）至睾丸至雄性激素至香腺腺体部至分泌麝香液至香腺香囊部至麝香（毕书增等 1980）。洪沂生等（1981）的研究说明了雄性激素对麝香的分泌有诱发、调节和决定作用。雄性激素与雄性激素受体结合才能发挥其生理功能，所以雄性激素受体很可能在麝香分泌过程中发挥着重要作用。白康（2012）采用 PCR-单链构象多态性（PCR-single-strand conformation polymorphism, SSCP）技术检测雄性林麝雄性激素受体（androgen receptor, AR）基因外显子 1、4、8 的多态性，发现其扩增片段不存在多态性，具高度保守性。在后续研究中，还需要对林麝雄性激素受体基因的全序列进行深入分析。汪建隆等（1982）的研究表明，促卵泡素（FSH）与促黄体生成素（LH）对林麝的泌香有调节作用。王勤等（2012）克隆并分析了林麝 FSH β 和 LH β 基因 DNA 全序列，为研究林麝泌香过程中性激素基因的表达提供了基础。以上研究结果表明，性腺轴激素与林麝的麝香分泌密切相关。即性腺轴激素能够诱导林麝产生泌香活动，是调节麝香分泌活动的关键因素（竭航等 2014）。

5 林麝泌香相关基因组与转录组研究

随着测序技术的发展，基因组和转录组已被广泛用于许多物种的研究（Wang et al. 2009, Davey et al. 2011）。近年来，研究人员利用测序技术开发了林麝的基因组和转录组资源。

5.1 林麝泌香相关基因组研究

Fan 等（2018）对林麝的整个基因组进行了测序，提供了林麝的第一个基因组序列和基因注释。林麝的基因组组装约为 2.72 Gb，Contig N50 长度为 22.6 kb，Scaffold N50 长度为 2.85 Mb。总共鉴定了 24 352 个基因，其中包括 1 236 个嗅觉受体基因。为了进一步研究林麝麝香分泌和适应性免疫的遗传机制，Zhou

等 (2019) 将林麝基因组与其他 9 种偶蹄动物基因组进行比较, 发现了与林麝麝香分泌密切相关相关的 6 个正向选择基因, 即 *akr1d1*、*mvd*、*fnta*、*dhdds*、*scnn1a* 和 *fyd4*。在类固醇激素生物合成中注释了 1 个与类固醇代谢有关正向选择基因 (*akr1d1*)。在类萜骨架生物合成中标注了 3 个与类萜代谢有关正向选择基因 (*mvd*、*fnta* 和 *dhdds*)。另外, 在醛固酮调节的钠重吸收中标注了 2 个与醛固酮代谢有关正向选择基因 (*scnn1a* 和 *fyd4*) (Zhou et al. 2019)。此外, Zhou 等 (2019) 还确定了许多与疾病, 以及对病毒、细菌和寄生虫病的免疫反应有关正向选择基因。

5.2 林麝泌香相关转录组研究

转录组测序是特定细胞在某一功能状态下所能转录出来的所有 RNA 的总和, 已成为研究物种基因功能和基因表达调控的主要手段。Xu 等 (2017) 使用 Illumina HiSeq 平台研究了林麝心和麝香腺组织的转录组, 确定了它们之间的差异表达基因。与心中的相同基因相比, 林麝的麝香腺中总共检测到 8 986 个差异表达基因, GnRH 信号传导途径和类固醇激素生物合成途径在差异表达基因中显著丰富, 这两种途径都对 *sts*、*ugt1a3*、*hsd17b7*、*cyp1b1* 和 *srd5a1* 等基因进行了注释, 因此, 这些基因可能编码参与调节麝香生成的蛋白质。Xu 等 (2017) 得到的与麝香形成有关的类固醇生物合成、类固醇激素生物合成及萜类骨架生物合成通路, 与 Zhou 等 (2019) 注释的通路一致。另外, Xu 等 (2017) 还确定了几个与类固醇、萜类和酮体代谢密切相关的候选基因, 即 *dhcr7*、*dhcr24*、*nsdhl*、*cyp3a5*、*fdft1*、*fdps* 和 *hmgcl*, 为进一步深入研究林麝泌香的分子机制提供了参考。

Yang 等 (2021) 使用 RNA-seq 和 RT-qPCR 比较并分析了林麝麝香腺和睾丸中类固醇激素生物合成相关基因的表达模式, 探索了 21 个共表达的类固醇激素合成相关基因。通过 RT-qPCR 在麝香腺组织中检测到 CYP11A1、CYP17A1 和 HSD3B 这 3 种关键限速酶, 并基

于免疫组化确定其定位于林麝麝香腺的腺细胞中, 进一步表明类固醇激素 (包括雄激素) 可以在林麝的麝香腺中合成, 为未来研究林麝麝香分泌机制提供了重要参考。

6 存在问题

虽然近年来有关林麝泌香的分子机制研究逐渐广泛和深入, 但依然存在一些问题值得进一步探讨。首先, 林麝香腺的显微与超微结构缺乏系统、清晰的研究。过去几十年间, 研究者虽然对林麝香腺的显微与超微结构进行了一定的研究, 但是这些研究主要集中于 20 世纪 80 年代, 由于当时实验技术等限制, 对于林麝香腺的组织结构缺乏清晰的展示和描述 (毕书增等 1986)。其次, 性激素与林麝麝香分泌的关系缺乏深入研究, 研究进展缓慢。研究发现, 雄激素作用于麝香腺, 影响麝香的分泌, 体外诱导试验也表明外源雄激素可以诱导林麝泌香, 但是雄激素怎样作用于麝香腺, 影响麝香分泌的机制是什么, 还有待进一步探索 (尹淑媛等 1990, 1991)。第三, 林麝是国家 I 级保护野生动物, 给林麝泌香的分子机制研究带来极大困难 (姜海瑞等 2007)。林麝是濒危动物, 不允许因为科学研究而过分干扰林麝和对林麝有任何伤害, 只能采集林麝的毛发、粪便等样品进行实验研究 (周俊彤等 2020)。对于因疾病死亡的林麝, 常常无法及时采集样品, 造成 RNA 降解, 这大大限制了林麝泌香分子机制的研究进展。

参 考 文 献

- Davey J W, Hohenlohe P A, Etter P D, et al. 2011. Genome-wide genetic marker discovery and genotyping using next-generation sequencing. *Nature Reviews Genetics*, 12(7): 499-510.
- Fan Z X, Li W J, Jin J Z, et al. 2018. The draft genome sequence of forest musk deer (*Moschus berezovskii*). *Gigascience*, 7(4): 1-6.
- He L, Wang W X, Li L H, et al. 2014. Effects of crowding and sex on fecal cortisol levels of captive forest musk deer. *Biological Research*, 47(1): 48.

- Su B, Wang Y X, Wang Q S. 2001. Mitochondrial DNA sequences imply anhui musk deer a valid species in Genus Moschus. *Zoological Research*, 2(3): 169–173.
- Shrestha M N. 1998. Animal welfare in the musk deer. *Applied Animal Behaviour Science*, 59(1/3): 245–250.
- Wang Z, Gerstein M, Snyder M. 2009. RNA-Seq: a revolutionary tool for transcriptomics. *Nature Reviews Genetics*, 10(1): 57–63.
- Xu Z X, Jie H, Chen B L, et al. 2017. Illumina-based de novo transcriptome sequencing and analysis of Chinese forest musk deer. *Journal of Genetics*, 96(6): 1033–1040.
- Yang Q S, Meng X X, Xia L, et al. 2003. Conservation status and causes of decline of musk deer (*Moschus* spp.) in China. *Biological Conservation*, 109(3): 333–342.
- Yang J M, Peng G F, Feng S, et al. 2021. Characteristics of steroidogenesis-related factors in the musk gland of Chinese forest musk deer (*Moschus berezovskii*). *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 212: 105916.
- Zhou C, Zhang W B, Wen Q C, et al. 2019. Comparative genomics reveals the genetic mechanisms of musk secretion and adaptive immunity in Chinese Forest Musk Deer. *Genome Biology and Evolution*, 11(4): 1019–1032.
- 安谈红. 2010. 麝香药用价值研究. *吉林农业*, (8): 211, 224.
- 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*, 33(6): 956–962.
- 白康. 2012. 林麝雄激素受体多态性和性激素水平与其泌香量关系的研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文.
- 白瑞丹, 蔡永华, 郑程莉, 等. 2019. 圈养林麝泌香期的行为多样性及与麝香分泌的关系. *浙江农林大学学报*, 36(2): 343–348.
- 毕书增, 贾林征, 关强. 1986. 麝香腺囊组织结构与分泌机理的探讨. *西北药学杂志*, 1(1): 53–55.
- 毕书增, 贾林征, 关强, 等. 1993. 麝年周期麝香腺囊超微结构和麝香分泌形成研究. *中国药理学杂志*, 28(11): 653–657.
- 毕书增, 颜于宏, 金绍忠, 等. 1980. 下丘脑—垂体—睾丸系统调节麝香分泌和提高麝香产量的初步研究. *中药材科技*, (4): 18–20.
- 毕书增, 张治国, 贾林征, 等. 1987. 麝泌香盛期后麝香腺囊的显微与超微结构和麝香分泌研究. *兽类学报*, 7(2): 96–99.
- 陈轩. 2007. 林麝 AFLP 的多态性研究及产麝性能的标记分析. 杭州: 浙江大学硕士学位论文.
- 程建国, 蔡永华, 罗燕, 等. 2011. 取香时间对林麝麝香产量和麝香酮含量的影响. *安徽农业科学*, 39(16): 9714.
- 程建国, 罗燕, 乔美萍, 等. 2002. 影响林麝泌香量的因素. *特产研究*, (3): 15–18.
- 戴扬, 熊怀阳, 黄剑. 2020. 分子标记技术在水稻育种中的应用分析. *农业开发与装备*, (11): 54–55.
- 冯达勇, 戴晓阳, 杨营, 等. 2020. 圈养雄麝泌香期的部分行为表现. *农业与技术*, 40(9): 126–130.
- 冯文和, 游育信, 雍慧仪, 等. 1981. 林麝麝香腺的组织学观察. *动物学杂志*, (2): 33–35.
- 郭妍妍, 周杨, 蔡永华, 等. 2018. 川西高原圈养林麝 (*Moschus berezovskii*) 的麝香分泌及影响因素研究. *四川农业大学学报*, 36(2): 273–278.
- 洪沂生, 李复东, 邓文明, 等. 1981. 麝泌香与雄性激素的关系. *中药材科技*, (1): 19–22.
- 姜海瑞, 徐宏发. 2007. 珍稀濒危资源动物——林麝. *生物学通报*, 42(12): 22–23.
- 蒋且英, 罗云, 谭婷, 等. 2018. 气质联用和化学计量学比较不同品种和产地麝香挥发性成分组成. *中国实验方剂学杂志*, 24(3): 49.
- 竭航, 封孝兰, 赵贵军, 等. 2014. 林麝泌香机制研究进展. *中国中药杂志*, 39(23): 4522–4525.
- 康发功, 盛岩, 马冷桃, 等. 2015. 兴隆山自然保护区驯养马麝的麝香分泌及其种群动态和年龄结构的关系. *生态学报*, 35(15): 4993–4999.
- 孔燕萍, 芦广荣. 2014. 麝香传统鉴定经验总结. *首都医药*, (12): 79–80.
- 刘文华, 佟建明. 2005. 中国的麝资源及其保护与利用现状分析. *中国农业科技导报*, 7(4): 28–32.
- 孟根达来, Myagmarsuren, Batkhuu, 等. 2018. 麝属动物的分类学研究历史沿革. *野生动物学报*, 39(4): 966–971.
- 乔佳伦, 孙太福, 齐利平, 等. 2018. 圈养林麝 (*Moschus berezovskii*) 个性及与麝香分泌和繁殖成效的关系. *生态学报*, 38(23): 8306–8313.
- 芮菊生, 陈海明, 李次兰, 等. 1984. 麝香腺分泌周期中组织学及组织化学的初步研究. *动物学杂志*, 19(1): 13–15.
- 沈琰, 毕书增, 朱定轩, 等. 1982. 林麝 (*Moschus berezovskii* Flerov) 泌香盛期前麝香腺囊亚微结构的初步研究. *南通医学院学报*, (4): 1–4.
- 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): 9245-9251.
- 孙竹玟, 胡佐芳. 1988. 林麝香腺解剖及组织结构之探讨. 西南民族学院学报, (1): 29-32.
- 汪建隆, 黄新民, 朱定轩. 1982. 促性腺激素对林麝泌香的影响. 兽类学报, (1): 105-106.
- 汪松, 解炎. 2004. 中国物种红色名录. 北京: 高等教育出版社.
- 王静, 白瑞丹, 蔡永华, 等. 2020. 圈养林麝泌香分泌时间节律及影响因素. 兽类学报, 40(5): 485-492.
- 王岚, 王翰, 刘海萍, 等. 2016. 麝香的研究现状. 资源开发与市场, 32(1): 77-81.
- 王勤, 张修月, 王中凯, 等. 2012. 林麝促卵泡激素和促黄体激素基因的克隆及其序列分析. 四川动物, 31(1): 77.
- 王永飞, 马三梅, 刘翠平, 等. 2001. 遗传标记的发展和分子标记的检测技术. 西北农林科技大学学报, 29(6): 130-136.
- 王永奇, 白康, 任战军, 等. 2015. 林麝 AR 基因外显子 1、4、8 的克隆和多态性检测. 家畜生态学报, 36(6): 11-14.
- 王永奇, 李斐然, 刘文华. 2019. 林麝泌香生理反应启动时间及不同生理阶段的时间分配. 草业科学, 36(1): 226-233.
- 魏雨婷, 周冉, 刘宝庆, 等. 2016. 林麝雌体粪便甲状腺激素的测定及其生物学意义. 北京林业大学学报, 38(5): 108-113.
- 吴建平, 孙森, 马泽芳, 等. 1995. 药用动物饲养学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社.
- 尹淑媛, 戴卫国. 1990. 雄激素生理诱导雄麝二次泌香技术的探讨. 成都科技大学学报, (4): 97-102.
- 尹淑媛, 戴卫国. 1991. 雄麝的香腺和香囊在麝香分泌及形成中的作用. 动物学杂志, 26(4): 23-25.
- 张慧珍, 王敏, 李吉有, 等. 2009. 林麝养殖中活体取香的方法及步骤. 野生动物杂志, 30(4): 175-176.
- 赵莎莎. 2009. 圈养林麝遗传多样性及泌香性能关联标记的分析研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文.
- 郑程莉, 王筋, 王建明, 等. 2019. 圈养麝的麝香化学成分与雄激素关系的研究进展. 四川中医, 37(5): 220-222.
- 周俊彤, 徐尚华, 胡德夫. 2020. 匹拉米洞法、邻联甲苯胺法和联苯胺法检测林麝便隐血的比较. 动物学杂志, 55(3): 401-406.