

分类号：
学 号：20222013016

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于磁性转染对猪 *Zfy* 基因干扰载体 性控效果的验证

学 位 申 请 人	刘亚星
指 导 教 师	贾斌 教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科 、 专 业 名 称	畜牧学
研 究 方 向	动物遗传育种与繁殖
所 在 学 院	动物科技学院

中国·新疆·石河子
2025年6月

分类号：
学 号：20222013016

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



基于磁性转染对猪 *Zfy* 基因干扰载体 性控效果的验证

学 位 申 请 人	刘亚星
指 导 教 师	贾斌 教授
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	畜牧学
研 究 方 向	动物遗传育种与繁殖
所 在 学 院	动物科技学院

中国·新疆·石河子
2025 年 6 月

**Validation of vector control effect of *Zfy* gene interference based on
magnetic transfection**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Liu Ya-xing

(Animal Genetics, Breeding and Reproduction)

Dissertation Supervisor: Prof. Jia Bin

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明


本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：


时间： 2025 年 5 月 24 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

时间： 2025 年 5 月 24 日

导师签名：

时间： 2025 年 5 月 24 日

课题来源

项目名称：猪性别控制技术应用与示范（横向）

项目编号：校 2022032

摘 要

性别控制技术对猪产业意义重大。在生产效率方面，能精准调控仔猪性别，若实现多生母猪，可直接扩大种猪群规模，加快母猪繁殖速度，增加猪只存栏量，提高养殖效益。从成本控制看，避免了养殖过多非生产性公猪的饲料、场地等成本浪费，优化资源配置。在市场需求上，种猪市场对母猪需求旺盛，掌握性别控制技术能更好满足市场，提升企业竞争力。同时，母猪作为繁育核心，数量增多可提供更多选育种猪机会，加速优良基因传递，提升猪群整体品质。

目的：本研究旨在构建基于磁性纳米载体介导的 RNA 干扰 (RNAi) 递送系统，通过干扰 Y 染色体性别决定区关键基因 *Zfy* 的表达，诱导经处理公猪精液人工授精 (AI) 的母猪所产仔猪性别比例发生改变，实现雌性表型子代比例显著性升高。该技术可直接应用于种猪繁育，预计将雌性仔猪比例提高至 70% 以上，显著降低养殖成本并提升经济效益。

方法：(1) 采集新鲜的猪睾丸组织，采用酶消化法培养猪生精细胞，待细胞生长良好后，使用实验室筛选出高效的干扰载体，分别加入磁性纳米颗粒和转染试剂 LP3000 在细胞水平上使用 RT-qPCR 比较 *Zfy* 基因的干扰效率。(2) 选取 9 头 240 日龄健康雄性长白猪 (3 头不做任何注射，3 头用于注射普通质粒，3 头用于注射普通质粒与磁性纳米颗粒复合物)，每头猪每侧睾丸注射 1.5 mg 质粒，雌性长白猪 228 头作为试验对象。分别采取睾丸注射完成第 7 天、14 天、21 天、28 天的新鲜性控精液鉴定鲜精精液品质 (精子活力、精子密度、精子畸形率、质膜完整率、顶体完整率、pH 值、细菌数)，并提取性控精液总 RNA，RT-qPCR 检测 *Zfy*、*Zfx*、*SYCP3*、*Afaf*、*Odf3*、*TNP2*、*Sox9*、*Tektin4*、*Ube2b* 相关基因的表达量。(3) 使用睾丸注射完成第 7 天、14 天、21 天、28 天的新鲜性控精液进行配种，统计仔猪性别、初生重和断奶重。

结果：(1) 磁性转染试剂比 LP3000 转染试剂转染能力高 12.46%，且差异显著 ($P < 0.05$)。(2) 在睾丸注射的第 7 天和第 28 天所有参数 (活力、畸形率、质膜/顶体完整率、密度、pH、细菌数) 均无显著差异；第 14 天出现明显变化，在精子畸形率、质膜完整率、顶体完整率和细菌个数指标中：磁转组和质粒组与对照组相比差异均极显著升高 ($P < 0.01$)。磁转组与质粒组相比差异极显著升高 ($P < 0.01$)。精子活力：磁转组和质粒组与对照组相比差异均极显著降低 ($P < 0.01$)，磁转组与质粒组相比差异极显著降低 ($P < 0.01$)。精子密度：磁转组和质粒组与对照组相比差异均不显著。pH 值：质粒组与对照组差异显著降低 ($P < 0.05$)，磁转组与对照组和质粒组差异极显著降低 ($P < 0.01$)；第 21 天在精子畸形率、质膜/顶体完整率指标中：磁转组和质粒组与对照组相比差异均显著升高 ($P < 0.05$)。磁转组与质粒组相比差异显著升高 ($P < 0.05$)；精子活力：磁转组和质粒组与对照组相比差异均显著降低 ($P < 0.05$)，磁转组与质粒组相比差异显著降低 ($P < 0.05$)。在精子密度和 pH 值这两个指标中：质粒组与对照组精子密度差异不显著，磁转组与对照组差异显著降低 ($P < 0.05$)，磁转组与质粒组差异显著降低 ($P < 0.05$)。细菌个数：质粒组与对照组差异显著升高 ($P < 0.05$)，磁转组与对照组差异显著升高 ($P < 0.05$)。磁转组与质粒组差异不显著。

(3) 在睾丸注射的第 7 天和第 28 天, 所有检测基因 (*Zfy*、*SYCP3*、*Afaf*、*Ube2b*、*Odf3*、*TNP2*、*Sox9*、*Tektin4*) 表达量在磁转组、质粒组和对照组三组之间均无显著差异; 第 14 天呈现显著降低, *Zfy*、*SYCP3*、*Afaf*、*Ube2b* 表达量在其它两组间与对照组表达差异极显著降低 ($P < 0.01$), *Sox9* 表达量在质粒组与对照组差异显著降低 ($P < 0.05$), 磁转组与对照组差异极显著降低 ($P < 0.01$), *TNP2* 和 *Odf3* 表达量分别呈现组间显著差异; 至第 21 天, *Zfy*、*SYCP3*、*Afaf*、*Sox9*、*Ube2b* 表达量仍保持显著组间差异, 而 *Odf3*、*TNP2*、*Tektin4* 表达量则恢复无差异状态。(4) 在睾丸注射的第 7 天和第 28 天, 对照组、质粒组和磁转组的仔猪性别比例均无显著差异。而在第 14 天, 磁转组雌性率 (72.18%) 显著高于质粒组 (8.22% 差异), 且磁转组、质粒组和对照组三组之间差异极显著 ($P < 0.01$); 第 21 天时, 仅磁转组与对照组性别比例差异显著 ($P < 0.05$)。

结论: 磁性转染试剂在细胞水平干扰效率磁转组与对照组相比差异极显著 ($P < 0.01$), 与 LP3000 组相比差异显著 ($P < 0.05$); 性控试验子一代雌性率磁转组与对照组相比差异极显著 ($P < 0.01$), 与质粒组相比差异显著 ($P < 0.05$)。磁性转染试剂作用效果最好的时间在睾丸注射第 14 天左右。

关键词: 猪; *Zfy* 基因; 磁性转染; RNA 干扰; 性别控制

Abstract

Sex control technology is of great significance to the swine industry. In terms of production efficiency, it enables precise regulation of piglet sex ratios. By increasing the proportion of female piglets, it directly expands the breeding sow population, accelerates sow reproductive rates, increases herd size, and enhances farming profitability. From a cost-control perspective, it avoids the waste of resources such as feed and space associated with raising excessive non-productive boars, thereby optimizing resource allocation. In terms of market demand, the breeding sow market exhibits strong demand for female pigs. Mastering sex control technology allows enterprises to better meet market needs and enhance competitiveness. Simultaneously, increasing the number of sows facilitates genetic improvement. As the core of reproduction, a larger sow population provides more opportunities for selective breeding, accelerates the transmission of superior genes, and improves the overall quality of the swine herd.

Objectives: This study aimed to establish a magnetic nanoparticle-mediated RNA interference (RNAi) delivery system to suppress the expression of the Y-chromosomal sex-determining gene *Zfy*, thereby inducing epigenetic alterations in the sex ratios of piglets born to sows artificially inseminated (AI) with treated boar semen. The goal was to achieve a statistically significant increase in female offspring. This technology is directly applicable to swine breeding programs, with an anticipated female piglet ratio exceeding 70%, significantly reducing production costs and enhancing economic efficiency.

Methods: (1). Fresh porcine testicular tissues were collected and cultured using enzymatic digestion to isolate spermatogenic cells. After confirming cell viability, high-efficiency RNAi vectors (pre-screened in the laboratory) were transfected using magnetic nanoparticles or the traditional transfection reagent LP3000. RT-qPCR was employed to compare the interference efficiency of *Zfy* at the cellular level. (2). Nine 240-day-old healthy male Landrace pigs were divided into three groups: 3 un-injected controls, 3 injected with standard plasmids, and 3 injected with plasmid-magnetic nanoparticle complexes (1.5 mg plasmid per testis). 228 female Landrace pigs served as breeding subjects. Fresh semen was collected at 7, 14, 21, and 28 days post-injection for quality assessment (sperm motility, density, deformity rate, membrane integrity, acrosome integrity, pH, bacterial count). Total RNA was extracted from semen, and RT-qPCR was performed to quantify the expression of *Zfy*, *Zfx*, *SYCP3*, *Afaf*, *Odf3*, *TNP2*, *Sox9*, *Tektin4*, and *Ube2b*. (3). Fresh semen collected at 7, 14, 21, and 28 days post-injection was used for artificial insemination. The sex, birth weight, and weaning weight of piglets were statistically analyzed.

Results: (1). The magnetic transfection reagent exhibited a 12.46% higher transfection efficiency than

LP3000, with a significant difference ($P < 0.05$). (2). At Day 7 and Day 28 post-testicular injection, no significant differences were observed in any parameters (motility, deformity rate, membrane/acrosome integrity, density, pH, bacterial count) among groups. At Day 14: Sperm deformity rate, membrane integrity, acrosome integrity, and bacterial count: Both the magnetic transfection (MT) group and plasmid group exhibited highly significant increases compared to the control group ($P < 0.01$). The MT group showed highly significant increases compared to the plasmid group ($P < 0.01$). Sperm motility: Both the MT and plasmid groups demonstrated highly significant reductions compared to the control group ($P < 0.01$). The MT group showed highly significant reductions compared to the plasmid group ($P < 0.01$). Sperm density: No significant differences between the MT/plasmid groups and the control group. pH value: The plasmid group showed a significant reduction compared to the control group ($P < 0.05$). The MT group exhibited highly significant reductions compared to both the control and plasmid groups ($P < 0.01$). At Day 21: Sperm deformity rate and membrane/acrosome integrity: Both the MT and plasmid groups showed significant increases compared to the control group ($P < 0.05$). The MT group displayed significant increases compared to the plasmid group ($P < 0.05$). Sperm motility: Both the MT and plasmid groups had significant reductions compared to the control group ($P < 0.05$). The MT group showed significant reductions compared to the plasmid group ($P < 0.05$). Sperm density and pH: No significant differences between the plasmid group and control group in density. The MT group exhibited significant reductions in density compared to the control group ($P < 0.05$) and plasmid group ($P < 0.05$). Bacterial count: The plasmid and MT groups showed significant increases compared to the control group ($P < 0.05$). No significant differences between the MT and plasmid groups. (3). At 7 and 28 days post-testicular injection, no significant differences were observed in the expression levels of the tested genes (*Zfy*, *SYCP3*, *Afaf*, *Ube2b*, *Odf3*, *TNP2*, *Sox9*, *Tektin4*) among the magnetic transfection (MT) group, plasmid group, and control group. At 14 days: The expression levels of *Zfy*, *SYCP3*, *Afaf*, and *Ube2b* showed highly significant decreases in both the MT and plasmid groups compared to the control group ($P < 0.01$). *Sox9* expression exhibited a significant decrease in the plasmid group versus the control ($P < 0.05$) and a highly significant decrease in the MT group versus the control ($P < 0.01$). *TNP2* and *Odf3* expression displayed significant intergroup differences (specific comparisons not detailed). By 21 days: *Zfy*, *SYCP3*, *Afaf*, *Sox9*, and *Ube2b* expression levels maintained significant intergroup differences. *Odf3*, *TNP2*, and *Tektin4* expression returned to baseline with no significant differences. (4). At 7 and 28 days post-testicular injection, no significant differences in piglet sex ratios were observed among the control group, plasmid group, and magnetic transfection (MT) group. At 14 days: The MT group exhibited a significantly higher female rate (72.18%) compared to the plasmid group (8.22% difference, $P < 0.05$). Highly significant differences in sex ratios were observed among the MT group, plasmid group, and control group ($P < 0.01$). By 21 days: Significant differences in sex ratios were detected only between the MT group and the control group ($P <$

0.05).

Conclusion: The magnetic transfection reagent demonstrated highly significant interference efficiency compared to the control group ($P < 0.01$) and significant superiority over the LP3000 group ($P < 0.05$) at the cellular level. In the sex control experiment, the magnetic transfection group achieved a significantly higher female rate in the first-generation offspring compared to both the control group ($P < 0.01$) and the plasmid group ($P < 0.05$). The magnetic transfection reagent demonstrated peak effectiveness around Day 14 post-testicular injection.

Key words: Swine; *Zfy* gene; Magnetic transfection; RNA interference; Sex control

目录

摘 要	I
Abstract	III
主要缩写词表	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 论文研究的目的与意义	1
1.2 性别控制在畜牧业中的意义与研究进展	2
1.2.1 家畜性别控制的经济与产业价值	2
1.2.2 现有性别控制技术的局限性	2
1.3 <i>Zfy</i> 基因在性别决定中的作用机制	4
1.3.1 哺乳动物性别决定的关键基因网络	4
1.3.2 <i>Zfy</i> 基因干扰对性别比例的影响	5
1.4 磁性纳米颗粒介导的基因递送机制	6
1.5 精子发生相关基因	7
1.6 技术路线	10
第 2 章 猪 <i>Zfy</i> 基因干扰载体在化学转染和磁性转染中的效果分析	11
2.1 材料与方法	12
2.1.1 主要仪器设备	12
2.1.2 主要试验试剂	12
2.1.3 试验动物	13
2.1.4 干扰菌液的复苏	14
2.1.5 小量质粒的提取	14
2.1.6 猪生精细胞与支持细胞共培养	14
2.1.7 猪生精细胞的转染	15
2.1.8 猪生精细胞转染后总 RNA 的提取及反转录	16
2.1.9 细胞水平检测干扰效率	16
2.1.10 数据处理与统计分析	17
2.2 结果与分析	17
2.2.1 质粒质量检测	17
2.2.2 猪生精细胞的培养和转染	17
2.2.3 体外两组转染试剂的干扰效率	18
2.3 讨论	19

2.4 小结	20
第 3 章 睾丸注射 <i>Zfy</i> 基因干扰载体与 MNPs 复合物后性控精液品质分析	21
3.1 材料与方法	22
3.1.1 主要仪器设备	22
3.1.2 主要试验试剂	22
3.1.3 试验动物	22
3.1.4 干扰菌液的复苏及质粒的大量提取	23
3.1.5 质粒 DNA 与 MNPs 的混合	23
3.1.6 猪睾丸注射质粒和质粒混合物	23
3.1.7 人工采精及预处理	24
3.1.8 猪精子形态学检测	25
3.1.9 RT-qPCR 检测精子相关基因表达量	26
3.1.10 数据处理与统计分析	27
3.2 结果与分析	28
3.2.1 体内干扰猪 <i>Zfy</i> 基因对鲜精精液品质的影响	28
3.2.2 体内干扰 <i>Zfy</i> 基因对精子相关基因表达的影响	30
3.3 讨论	35
3.4 小结	37
第 4 章 睾丸注射 <i>Zfy</i> 基因干扰载体与 MNPs 复合物后对后代仔猪性别偏移的影响	38
4.1 材料与方法	39
4.1.1 主要仪器设备	39
4.1.2 主要试验试剂	39
4.1.3 试验动物	39
4.1.4 睾丸注射质粒和质粒混合物	39
4.1.5 仔猪体重的测量	39
4.1.6 数据处理与统计分析	40
4.2 结果与分析	40
4.2.1 睾丸注射完成第 7 天对仔猪性别偏移的影响	40
4.2.2 睾丸注射完成第 14 天对仔猪性别偏移的影响	40
4.2.3 睾丸注射完成第 21 天对仔猪性别偏移的影响	41
4.2.4 睾丸注射完成第 28 天对仔猪性别偏移的影响	41
4.2.5 睾丸注射对后代仔猪初生均重、断奶均重和日增重的影响	42
4.3 讨论	42
4.4 小结	44

第 5 章 全文结论	45
第 6 章 论文创新点	46
参考文献	47
附录	57
致谢	59
作者简介	60

主要缩写词表

英文缩写	中文名称	英文全称
AI	人工授精	Artificialinsemination
cDNA	互补链 DNA	Complementary DNA
FBS	胎牛血清	Fetal bovine serum
MNPs	磁性纳米粒子	Micro- and nanoplastics
mRNA	信使 RNA	Messenger RNA
miRNA	微 RNA	Micro-RNA
PBS	磷酸盐缓冲液	Phosphate buffered saline
PCR	聚合酶链式反应	Polymerase Chain Reaction
RT-qPCR	实时荧光定量逆转录 PCR	Real-time RT-PCR
RNAi	RNA 干扰/沉默	Interference on mRNA expression level
RT-PCR	反转录 PCR	Reverse-transcription PCR
shRNA	短发夹 RNA	Short hairpin RNA
siRNA	小干扰 RNA	Small interference RNA
<i>SRY</i>	Y 染色体性别决定基因	Sex-determining Region on the Y Chromosome
TDF	睾丸决定因子	Testes determining factor
TF	转录因子	Transcription factor
<i>Zfx</i>	锌指蛋白转录因子	Zinc-finger transcriptional factor X- chromosome-linked
<i>Zfy</i>	锌指蛋白转录因子	Zinc-finger transcriptional factor Y- chromosome-linked

第1章 绪论

1.1 论文研究的目的与意义

猪的性别控制技术对现代畜牧业具有重要的经济价值。在商品化养殖中，雌性猪因其繁殖性能和肉质特性（如脂肪分布更均匀）往往具有更高的经济价值，而雄性猪则因生长速度较快在育肥阶段更具优势。然而，传统性别控制技术如流式细胞分选法存在分离效率低（约90%）、成本高昂（需精密仪器和冷冻设备）及精子损伤率高等问题，导致其难以大规模应用。此外，胚胎性别鉴定技术因操作复杂且可能损害胚胎活力，实际应用受限。因此，开发一种高效、精准且低成本的性别控制技术是当前畜牧业亟需突破的瓶颈。

Zfy 基因是位于 Y 染色体上的关键功能基因，其编码的锌指蛋白在 Y 精子发育中起核心调控作用。研究表明，通过 RNA 干扰（RNAi）或 CRISPR 技术沉默 *Zfy* 基因可显著抑制 Y 精子的生成，从而增加后代雌性比例。磁性转染技术通过磁性纳米颗粒（MNPs）与基因载体的结合，在外部磁场引导下实现靶向递送，具有以下突破性优势：1. 高效性与靶向性：MNPs 可通过磁场精准定位至目标组织（如睾丸生精细胞），显著提高转染效率并减少载体用量。2. 低毒性与生物相容性：相较于病毒载体或化学转染试剂，磁性纳米颗粒的细胞毒性更低，更适合体内应用。3. 技术兼容性：磁性转染可与现有 RNAi 或 CRISPR 载体结合，为基因编辑提供更优的递送方案。目前，该技术在猪 *Zfy* 基因干扰中的应用尚未见报道，填补这一空白是本研究的核心创新点。

本研究旨在通过以下目标系统验证磁性转染技术的性控潜力：1. 评估体外转染效率：通过 RT-qPCR 检测生精细胞中 *Zfy* 基因的表达抑制率，对比磁性转染和脂质体转染的效果差异。2. 验证体内性控效果：通过睾丸注射将磁性复合载体导入公猪体内，追踪子代性别比例变化，分析其与载体递送效率的相关性。本研究推动基因递送技术的革新，为大型动物活体基因编辑提供高效工具。相较于传统方法，磁性转染有望将 *Zfy* 基因抑制率提升至 80% 以上，并降低脱靶风险。若性控效果稳定，该技术可直接应用于种猪繁育，预计将雌性仔猪比例提高至 70% 以上，显著降低养殖成本并提升经济效益。

本研究的成果不仅可服务于畜牧业的性别控制需求，还可拓展至濒危物种保护（如通过性别比例调控优化种群结构）及人类生殖医学领域（如性别相关遗传病的干预）。此外，磁性转染技术的成功验证将为其他农业动物（如牛、羊）的基因调控研究提供重要参考。本研究不仅回应了产业需求与技术瓶颈，更通过技术创新为性别控制领域开辟了新的研究方向，兼具科学价值与社会效益。

1.2 性别控制在畜牧业中的意义与研究进展

1.2.1 家畜性别控制的经济与产业价值

在现代生猪养殖业中，猪的性别对生产效益具有显著影响，这种影响主要体现在生长性能和繁殖性能两个方面。研究表明，雄性猪在生长速度和饲料转化率上具有明显优势，而雌性猪则在繁殖性能上表现出独特价值^[1]。因此，性别控制技术在生猪养殖中的应用显得尤为重要，它不仅能够优化生产结构，还能提高经济效益和可持续发展能力。雄性猪（公猪）在生长速度和饲料转化效率方面表现出显著优势^[2]。公猪的平均日增重比雌性猪高 10%~15%，且饲料转化率更高。这种差异主要是由于雄性猪体内雄激素的作用，促进了肌肉生长和蛋白质合成，从而提高了生长速度和瘦肉率。此外，公猪在肉质上也更具优势，其瘦肉率更高，脂肪含量更低，更符合现代市场对瘦肉型猪肉的需求^[3]。雌性猪（母猪）在繁殖性能方面具有独特的优势。母猪的繁殖能力是生猪养殖业的核心竞争力之一，其繁殖性能直接影响到后代的数量和质量^[4]。通过优化母猪的繁殖管理，可以有效提高母猪的窝产仔数和后代的存活率，进而提升整体生产效益。此外，母猪在繁殖过程中还可以通过选育和杂交等方式，进一步优化后代的遗传特性^[5]。

鉴于猪的性别对生产效益的显著影响，性别控制技术在生猪养殖中显得尤为重要。性别控制技术可以通过人为干预，使雌性动物生产出符合人类期望性别的后代^[6]。近年来，随着生物技术的发展，性别控制技术取得了显著进展。例如，基于基因编辑的 X/Y 精子分离技术是一种新兴的性别控制方法^[7-9]。通过干扰与精子发生相关的特异性基因（如 *Zfy* 基因），可以限制或损坏 Y 精子的功能发育，从而改变后代的性别比例。此外，*SRY*-PCR 法是一种常用的早期胚胎性别鉴定技术，通过检测胚胎的 *SRY* 基因是否存在，进行早期胚胎的性别鉴定，胎儿出生后的性别符合率可高达 100%^[10]。这种方法虽然操作简便、准确率高，但由于需要从胚胎分离部分细胞，可能会对胚胎后期发育造成损伤。

性别控制技术的应用不仅可以提高生猪养殖的经济效益，还能优化种猪的选育过程，加快良种繁育的进程^[11]。例如，在商品猪生产中，通过性别控制技术可以选择更多的雄性猪用于肉用生产，同时保留优质的雌性猪用于繁殖。这不仅提高了资源利用效率，还满足了市场对瘦肉型猪肉的需求。此外，性别控制技术还可以增强良种选种中的强度和um提高育种效率。通过选择具有优良性状的性别，可以进一步优化种群的遗传结构，提高整体生产性能^[12]。这种技术的应用不仅有助于提高生猪养殖的经济效益，还能促进生猪养殖业的可持续发展。

1.2.2 现有性别控制技术的局限性

性别控制技术作为现代生物技术的重要分支，在畜牧业、医学研究及人类辅助生殖