临床研究 DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.003677

精子线粒体膜电位与供精妊娠结局的相关性研究

黄 静，万 凌，杨继高，孙大光，张 益，张天枫，王 红，盛维琼
（重庆市人口和计划生育科学技术研究院人类精子库，重庆 400020）

【摘 要】目的：比较用于供精人工受精（artificial insemination with donor semen，AID）技术的人类精子库冷冻精液标本高生育力组、中生育力组与低生育力组精液常规参数、精子形态、精子线粒体膜电位水平，精子DNA碎片率。探讨上述指标与供精妊娠结局的相关性，从而筛选出评估人类精子库捐精志愿者生育力的有效指标。**方法：**收集外供生殖中心用于AID同批次冷冻精液标本共140例，分别是“低生育力组”44例、“中生育力组”48例以及“高生育力组”48例。使用流式细胞仪检测精子线粒体膜电位水平（mitochondrial membrane potential，MMP）以及精子DNA碎片率（DNA fragmentation，DFI）。比较各组间精液常规参数、正常精子形态率、精子MMP以及精子DFI。**结果：**年龄（P=0.476），禁欲天数（P=0.320）、体质指数（P=0.475）、精子浓度（P=0.751）、前向运动精子百分率（P=0.230）、正常精子形态率（P=0.444）在各组间差异无统计学意义，精子MMP（P=0.000）、精子DFI（P=0.004）在各组间存在显著性差异。AID临床妊娠率与精子DFI呈负相关（r=−0.308，P=0.000）。**结论：**精子MMP、精子DFI是精子功能评价的重要指标。精子MMP是否能成为完全独立的精子质量指标尚有待进一步的研究。精子MMP联合精子DFI能否预测AID妊娠结局，还需进一步研究。

【关键词】供精人工受精；精子；线粒体膜电位；精子DNA碎片率
【中图分类号】R69 **【文献标志码】**A **【收稿日期】**2024-03-22

Relationship between sperm mitochondrial membrane potential and the outcome of artificial insemination with donor semen

Huang Jing，Wan Ling，Yang Jigao，Sun Daguang，Zhang Yi，Zhang Tianfeng，Wang Hong，Sheng Weiqiong
（*1.Human Sperm Bank，Chongqing Population and Family Planning Science and Technology Research Institute*）

【Abstract】*Objective*：To compare the routine semen parameters，sperm morphology，sperm mitochondrial membrane potential（MMP），and sperm DNA fragmentation index（DFI）of frozen semen specimens in the high-fertility，medium-fertility，and low-fertility groups from a human sperm bank used for artificial insemination with donor semen（AID），and to investigate the association of the above indicators with AID outcome to select useful indicators for assessing the fertility of sperm donors. ***Methods*：**We collected 140 frozen semen specimens of the same batch used for AID from a reproductive center，including 44 specimens in the low-fertility group，48 specimens in the medium-fertility group，and 48 specimens in the high-fertility group. Sperm MMP and DFI were measured by flow cytometry. Routine semen parameters，the percentage of morphologically normal sperm，sperm MMP，and sperm DFI were compared between the groups. ***Results*：**There were no significant differences in routine semen parameters and the percentage of morphologically normal sperm between the groups（P>0.05）. Sperm MMP and DFI were significantly different between the groups（P<0.01）. The clinical pregnancy rate of AID showed a significant negative correlation with sperm DFI（r=−0.313，P<0.01）. ***Conclusion*：**Sperm MMP and sperm DFI are important indicators for sperm function evaluation. Further studies are needed to determine whether sperm MMP can be a completely independent indicator of sperm quality and whether sperm MMP combined with DFI can predict pregnancy outcome in AID.

【Key words】artificial insemination with donor semen；sperm；mitochondrial membrane potential；sperm DNA fragmentation rate

实施供精人工授精（artificial insemination with donor semen，AID）是不育夫妇实现生育愿望的有效途径之一[1]。因此，如何筛选健康、优良的冷冻精液标本成为提高AID成功率的关键。

现有评估外供精液标本质量的评判标准仍依

作者介绍：黄 静，Email：693642094@qq.com，
研究方向：生殖领域的基础和临床研究。
通信作者：万 凌，Email：48359852@qq.com。
基金项目：重庆市科卫联合医学科研资助项目（编号：2022MSXM063）。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20241226.1605.022（2024-12-27）

赖于传统的精子浓度及活力等常规分析指标[2-3]。在长期供精实践中发现，部分冷冻精液标本虽然符合甚至高于原卫生部176号文件中关于人类精子库冷冻精液标本的外供标准（浓度>12×10⁶/mL，前向运动精子百分率>40%），但AID临床妊娠率仍不高，并且不同的捐精志愿者冷冻精液标本受孕能力也各不相同。部分捐精志愿者冷冻精液标本的周期妊娠率很高，超过50%，最高可达100%（即5个AID周期有5例妇女受孕）；而有些捐精志愿者冷冻精液标本的周期妊娠率却很低，更有甚者使用10个AID周期后，出现未使1例妇女受孕的情况。这一现象说明临床上普遍采用的精液常规分析指标实则并不能准确地反映精子的内部结构和功能，无法全方位呈现精子状态，故而无法全面评估男性生育能力[4]。

有研究证实精子线粒体作为精子活动能量的来源场所，与精子发生、发展、凋亡、受精过程密切相关[5]。目前研究证实精子受精过程所需的能量主要来自精子线粒体合成的腺苷三磷酸（adenosine triphosphate，ATP），且精子线粒体脱氧核糖核酸（deoxyribonucleic acid，DNA）与精子发生、发展密切相关[6-7]，精子线粒体的功能对精子质量及男性生育力存在至关重要的影响。而精子线粒体膜电位是评价线粒体功能的重要指标之一[8-9]。

国内关于精子MMP与辅助生殖技术（assisted reproductive technology，ART）妊娠结局的相关研究较少[10-11]，尤其是针对人类精子库捐精志愿者冷冻精液标本开展精子MMP方面的研究尚属空缺。本研究通过回顾性分析，比较了不同生育力组别之间精液常规参数、精子MMP以及精子DNA碎片率的差异性，进一步分析了精子MMP与AID临床妊娠率的相关性，探讨了精子MMP对于AID妊娠结局的预测价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集符合条件的精液样本140例，分别是“低生育力组”44例、“中生育力组”48例和“高生育力组”48例。回顾性分析了重庆市人类精子库2015年4月至2023年12月期间AID妊娠结局。统计AID外供周期以及妊娠结局数据分布情况，据此制订高生育力组、中生育力组及低生育力组的入组标准。排除女方影响因素及各种混杂因素后，将周期妊娠率≤10%精液判定为“低生育力组”（外供周期≥10，使0~1例妇女受孕），将精液周期妊娠率≥50%判定为“高生育力组”（外供周期≤10，至少使5例及其以上妇女受孕），将10%<周期妊娠率<50%判定为“中生育力组”。

女方入组条件：年龄≤35岁，以男性不育或男方和/或家族有不宜生育的严重遗传性疾病实施AID。

女方排除条件：内分泌因素、子宫内膜因素、宫腔因素等导致的女方不孕。

所有提供本研究精液样本的捐精志愿者均签署了知情同意书，并经重庆市人口和计划生育科学技术研究院生殖医学伦理委员会批准同意后实施[（2021）伦审第（011）号]。

所有研究对象均需禁欲2~7 d后，通过手淫法获取精液。

1.2 方法

1.2.1 精液标本冷冻 使用人工冷冻法进行精液冷冻，在广口保温瓶中装入液氮备用，将分装好的冻存管依次放在冷冻盘上，冷冻盘固定于距液氮液面上方1 cm处（不能与液面接触），盖上保温盖，开始计时。30 min后将冻存管放入液氮中，至少5 min后方能复苏。

1.2.2 冷冻精液标本复苏 将冻存于液氮的精液冷冻管取出室温平衡1 min后，放置于37 ℃水浴箱5 min进行解冻。

1.2.3 精子冷冻前后相关参数、指标检测 参照《世界卫生组织人类精液检查与处理实验手册》第五版的标准、方法，对精子浓度、活力、形态进行检测。精子形态采用改良巴氏染色法（巴氏染色液，成都朴华科技）对样本进行涂片、染色。符合原卫生部176号文件外供标准要求者，方可外供实施AID。

1.2.4 精子MMP、精子DFI检测 精子线粒体膜电位染色试剂盒（JC-1染色法）、精子DNA碎片染色试剂盒均购自青岛复诺医疗科技有限公司，严格按照试剂说明书进行操作。荧光信号采用流式细胞仪（厦泰DxPAthena™）进行检测。使用Flowjo10.9.0流式细胞分析软件对精子MMP、DFI检测数据进行分析。

1.2.5 统计学分析 采用SPSS 22.0统计软件进行数据分析，计量资料以均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）表示。2组间均数比较采用t检验，方差齐者多组间均数的比较采用单因素方差分析，方差不齐采用秩和检验。相关性分析采用Spearman分析。检验水准α=0.05。

2 结 果

2.1 不同生育力组间精液参数、精子MMP、精子DFI比较

捐精志愿者年龄（F=0.746，P=0.476）、禁欲天数（F=1.150，P=0.320）、体质量指数（F=0.749，P=0.475）在各组之间差异无统计学意义，精子浓度（F=0.288，P=0.751）、前向运动精子百分率（F=1.486，P=0.230）、正常形态精子百分率（F=0.818，P=0.440）在各组之间均无统计学差异，精子MMP（F=24.642，P=0.000）、DFI（F=5.885，P=0.004）在各组间存在显

著性差异。其中，精子MMP水平在低生育力组显著低于中生育力组（P=0.000），但与高生育力组相比差异无统计学意义（P=0.335），精子MMP水平在中生育力组却显著高于高生育力组（P=0.000）。精子DFI在低生育力组检测值显著高于中育力组（P=0.006）、高生育力组（P=0.002），见表1。

2.2 未妊娠组与妊娠组之间精液参数、精子MMP、精子DFI比较

将研究对象按照是否使受者妊娠进行分组，捐精志愿者年龄（t=0.788，P=0.432）、禁欲天数（t=−1.215，P=0.227），BMI（t=0.960，P=0.339）、精子浓度（t=0.034，P=0.973）、前向运动精子百分率（t=1.544，P=0.125）、正常形态精子百分率（t=−0.639，P=0.524）在两组之间均无统计学差异，精子MMP（t=−3.913，P=0.000）、DFI（t=3.655，P=0.000）在各组间存在显著性差异，且精子MMP水平在未妊娠组显著低于妊娠组（t=−3.913，P=0.000），精子DFI在未妊娠组显著高于妊娠组（t=3.655，P=0.000），见表2。

2.3 AID临床妊娠率与精子MMP、精子DFI、精液参数相关性分析

AID临床妊娠率与精子浓度（r_s=0.030，P=0.732）、前向运动精子百分率（r_s=−0.122，P=0.150）、正常精子形态率（r_s=−0.080，P=0.346）、精子MMP（r_s=−0.033，P=0.696）均无相关性，但与精子DFI呈负相关（r_s=−0.308，P=0.000），见表3。

3 讨 论

精子MMP是指在正常精子线粒体中发生的三羧酸循环产生的能量传递给电子，电子经呼吸链的传递产生ATP，与此同时将质子从线粒体内膜的基

表1 不同生育力组间精液参数、精子DFI、精子MMP比较

参数	低生育力组（n=44）	中生育力组（n=48）	高生育力组（n=48）	F值	P值
年龄（岁）	28.80 ± 6.37	28.60 ± 6.16	27.44 ± 4.91	0.746	0.476
禁欲天数（d）	4.30 ± 0.51	4.46 ± 0.54	4.42 ± 0.54	1.150	0.320
体质指数（kg/m^2）	22.82 ± 2.82	22.0 ± 3.91	22.51 ± 2.76	0.749	0.475
精子浓度（× 10^{6}mL）	59.16 ± 12.23	60.88 ± 12.72	59.40 ± 10.65	0.288	0.751
前向运动精子百分率	0.47 ± 0.06	0.46 ± 0.04	0.45 ± 0.06	1.486	0.230
正常精子形态率	0.29 ± 0.08	0.30 ± 0.07	0.28 ± 0.08	0.818	0.444
精子DNA碎片率	0.21 ± 0.07^a	0.16 ± 0.07^b	0.15 ± 0.09^b	5.885	0.004
精子线粒体膜电位	0.19 ± 0.15^d	0.40 ± 0.14^c	0.22 ± 0.17^d	24.642	0.000

注：与中生育力组，与高生育力组比较，a，P<0.01；与低生育力组比较，b，P<0.01；与低生育力组，与高生育力组比较，c，P<0.01；与中生育力组比较，d，P<0.01

表2 未妊娠组与妊娠组间精液参数、精子DFI、精子MMP比较

参数	未妊娠组（n=42）	妊娠组（n=98）	t值	P值
年龄（岁）	28.86 ± 6.48	28.01 ± 5.54	0.788	0.432
禁欲天数（d）	4.31 ± 0.52	4.43 ± 0.54	−1.215	0.227
体质指数（kg/m^2）	22.83 ± 2.89	22.26 ± 3.34	0.960	0.339
精子浓度（× 10^{6}mL）	59.88 ± 12.01	59.81 ± 11.81	0.034	0.973
前向运动精子百分率（%）	0.47 ± 0.59	0.46 ± 0.05	1.544	0.125
正常精子形态率（%）	0.28 ± 0.08	0.29 ± 0.08	−0.639	0.524
精子DNA碎片率（%）	0.21 ± 0.07^a	0.16 ± 0.08^a	3.655	0.000
精子线粒体膜电位	0.18 ± 0.14^b	0.31 ± 0.18^b	−3.913	0.000

注：2组间比较，a，P < 0.01；两组间比较，b，P < 0.01

表3 AID临床妊娠率与精子MMP、精子DFI、精液参数的相关性分析

相关系数	r_s值	P值
精子浓度（×10^{6}mL）	0.029	0.732
前向运动精子百分率	−0.122	0.150
正常精子形态率	−0.080	0.346
精子DNA碎片率	−0.308^a	0.000
精子线粒体膜电位	0.033	0.696

注：与临床妊娠率的相关性分析，a，P<0.01

质侧泵至内膜外，形成的跨膜电位差[12]。精子MMP是评价精子线粒体功能的关键指标，进而反映精子功能[13]。在人类精子细胞中MMP的检测，具有广泛的应用价值，很有潜力成为评价精子受精能力的常规分析和诊断指标。

本研究发现，AID外供后反馈的随访数据中，显示不同生育力组别之间，衡量精液质量的传统参数指标（精子浓度、前向运动精子百分率、正常形态精子百分率）均无统计学差异，但精子MMP、DFI两项检测指标均存在显著性差异，精子MMP水平在低生育力组显著低于中生育力组，但与高生育力组相比差异无统计学意义，精子MMP水平在中生育力组却显著高于高生育力组。提示精子MMP、DFI水平与成年育龄男性精液质量密切相关，从而影响AID临床妊娠率。精子DFI值随着AID临床妊娠率的升高而呈现下降趋势。精子MMP结果较复杂，在各组别之间未发现明显升高或下降趋势，推测精子MMP一定范围内的异常通常容易被卵子所修复，卵子不同的修复能力导致了不同的临床妊娠率。但不可否认，精子MMP在低生育力组水平仍低于中、高生育力组。这与白双勇等[13]研究发现正常不育组精子MMP低于正常已生育组的结果一致。精子MMP下降可能与活性氧（reactive oxygen species，ROS）含量过多存在密切关联，精液内ROS含量过多易损伤非致密性的mtDNA，通过线粒体途径引起细胞凋亡，亦可破坏线粒体膜结构、破坏线粒体呼吸功能，降低精子MMP水平。Wang X等[14]研究指出精子内ROS含量是导致精子细胞凋亡率的升高的主要原因。一旦精子细胞凋亡率升高，精子DNA完整性遭到破坏，精子DNA碎片率也相应升高，进而影响男性生育能力[9]。故本研究中精子DFI在低生育力组检测值明显高于中、高生育力组。可见，ROS含量过多是导致精子MMP下降、DFI升高的重要因素之一，但具体发生机制有待进一步研究。

本研究进一步发现，将140例研究对象按照是否妊娠进行分组后，结果显示在精子浓度、前向运动精子百分率、正常精子形态率无统计学差异的情况下，精子MMP、精子DFI在2组间却存在统计学差异，且精子MMP在未妊娠组检测值显著低于妊娠组，精子DFI在未妊娠组检测值显著高于妊娠组。精子MMP越高，精子DFI越低，AID临床妊娠率越高；反之，精子MMP越低，精子DFI越高，AID临床妊娠率越低。本结果与Marchetti C等[15]发现精子MMP越高，精子DNA碎片化越低，IVF受精率越高一致。由此可见，在精液常规参数均符合外供标准的情况下，通过精子MMP和精子DFI 2两项指标，反映出精子受精能力方面的差别，最终导致AID临床妊娠率的高低。

本研究还发现研究对象实施AID后的临床妊娠率与精子浓度、前向运动精子百分率、正常精子形态率、精子MMP均无相关性，但与精子DFI呈显著负相关。这个结果与Kasai T、Meseguer M等[16-17]发现精子MMP与精子受精率呈正相关不相符。DFI呈负相关与国内大多数学者的观点一致[18]。究其原因，一方面本研究纳入对象是精液常规参数指标正常的捐精志愿者，有别于临床不育人群。另一方面，女性卵子细胞质远多于精子，在受精过程中，精子MMP异常可能会被卵子所修复，而且精子DNA损伤比线粒体功能受损更为严重，故检测后数据的统计学分析显示AID临床妊娠率与精子MMP无相关性，但与精子DNA却表现为负相关。精子线粒体具有不同于其他体细胞线粒体的独特特征，影响着精子的活力、获能、顶体反应和最终受精能力。MMP是反映精子线粒体功能的关键指标。MMP水平的变化、mtDNA突变或缺失均可引起精子能量合成障碍，导致男性不育。国外学者建议将精子MMP作为评估男性不育的常规指标[19]。MMP是否能成为完全独立的精子质量指标尚有待进一步的研究。但有学者认为，精子MMP可作为DFI值正常或临界患者的辅助检测指标，尤为重要的是，精子MMP和精子DNA碎片指数联合，预测女性配偶自然受孕的能力优于精液常规参数，是临床评估特发性男性不育的重要指标[20]。

AID是辅助生殖技术常用助孕方式之一，目前的临床妊娠率也仅20%左右。通过传统的精液常规参数分析来评价捐精志愿者的精液质量是远远不够的，无法对供精妊娠结局进行精准的把握和预测，精子内在的功能缺陷也会对男性生育力产生不良影响。精子MMP直接反映了精子线粒体功能的完整性和能量状态，精子DFI则反映了精子细胞内遗传物质的完整性。本研究通过精子MMP、精子DFI与AID临床妊娠率相关性的探究，进一步证实了精子DFI与供精妊娠结局的相关性，但精子MMP与供精妊娠结局的相关性尚不明确。男性精液发

生发展过程较多环节目前仍不清楚，精子线粒体的生成过程和精子MMP对男性精子成熟、获能以及受精过程中扮演的角色尚需要进一步探讨，精子MMP与妊娠结局的相关性尚存在争议，且其在正常妊娠过程中的机制及意义尚不明确。故精子MMP与辅助生殖技术应用结局的关系有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] Goldstein M, Rosenwaks Z. Male infertility in the era of ART: why treat; how to treat[J]. Semin Reprod Med, 2009, 27(2): 107-108.

[2] Bonde JP, Ernst E, Jensen TK, et al. Relation between semen quality and fertility: a population-based study of 430 first-pregnancy planners[J]. Lancet, 1998, 352(9135): 1172-1177.

[3] Curi SM, Ariagno JI, Chenlo PH, et al. Asthenozoospermia: analysis of a large population[J]. Arch Androl, 2003, 49(5): 343-349.

[4] Xu HM, Li HG, Xu LG, et al. The decline of fertility in male uremic patients is correlated with low expression of the cystic fibrosis transmembrane conductance regulator protein (CFTR) in human sperm[J]. Hum Reprod, 2012, 27(2): 340-348.

[5] Hikim AP, Lue YH, Yamamoto CM, et al. Key apoptotic pathways for heat-induced programmed germ cell death in the testis[J]. Endocrinology, 2003, 144(7): 3167-3175.

[6] 刘 宇, 刘凯峰. 精子线粒体功能障碍在弱精子症中的研究进展[J]. 生殖医学杂志, 2021, 30(3): 415-418.

Liu Y, Liu KF. Advances of sperm mitochondrial dysfunction in asthenozoospermia[J]. J Reprod Med, 2021, 30(3): 415-418.

[7] 钱路杰, 徐惠明. 精子线粒体膜电位评估男性生育力的作用研究进展[J]. 中国男科学杂志, 2021, 35(1): 64-66, 72.

Qian LJ, Xu HM. Research progress on the role of sperm mitochondrial membrane potential in evaluating male fertility[J]. Chin J Androl, 2021, 35(1): 64-66, 72.

[8] Agnihotri SK, Agrawal AK, Hakim BA, et al. Mitochondrial membrane potential (MMP) regulates sperm motility[J]. In Vitro Cell Dev Biol Anim, 2016, 52(9): 953-960.

[9] Malić Vončina S, Golob B, Ihan A, et al. Sperm DNA fragmentation and mitochondrial membrane potential combined are better for predicting natural conception than standard sperm parameters[J]. Fertil Steril, 2016, 105(3): 637-644.

[10] 王英祥, 古 健, 王 佳. 炎症标志物在区分子宫内膜病变中的预测价值[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2024, 45(6): 923-929.

Wang YX, Gu J, Wang J .Predictive Value of Inflammatory Markers to Differentiate Endometrial Lesions[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Medical Sciences), 2024, 45(6): 923-929.

[11] 戎春浩, 李 洁, 史海跃, 等. 精子线粒体膜电位与精液参数和IVF妊娠结局的相关性分析[J]. 中华男科学杂志, 2022, 28(7): 612-617.

Rong CH, Li J, Shi HY, et al. Correlation of sperm mitochondrial membrane potential with semen parameters and outcomes of in vitro fertilization[J]. Natl J Androl, 2022, 28(7): 612-617.

[12] 杨 颖, 凡 永, 匡延平, 等. 精子线粒体膜电位与男性精液参数和体质量指数的相关性研究[J]. 中华生殖与避孕杂志, 2017, 3(4): 268-271.

Yang Y, Fan Y, Kuang YP, et al. Correlation between mitochondrial membrane potential of sperm and semen paremeters and male obesity[J]. Chin J Reprod Contracept, 2017, 3(4): 268-271.

[13] 白双勇, 王剑松, 赵庆华. 肥胖男性不育患者精子线粒体膜电位、游离脂肪酸、活性氧的关系[J]. 中国医科大学学报, 2015, 44(7): 653-656.

Bai SY, Wang JS, Zhao QH. Relationship of free fatty acid, reactive oxygen species and sperm mitochondrial membrane potential in obese male infertility patients[J]. J China Med Univ, 2015, 44(7): 653-656.

[14] Wang X, Sharma RK, Gupta A, et al. Alterations in mitochondria membrane potential and oxidative stress in infertile men: a prospective observational study[J]. Fertil Steril, 2003, 80(Suppl 2): 844-850.

[15] Marchetti C, Obert G, Deffosez A, et al. Study of mitochondrial membrane potential, reactive oxygen species, DNA fragmentation and cell viability by flow cytometry in human sperm[J]. Hum Reprod, 2002, 17(5): 1257-1265.

[16] Kasai T, Ogawa K, Mizuno K, et al. Relationship between sperm mitochondrial membrane potential, sperm motility, and fertility potential [J]. Asian J Androl, 2002, 4(2): 97-103.

[17] Meseguer M, Garrido N, Martínez-Conejero JA, et al. Relationship between standard semen parameters, calcium, cholesterol contents, and mitochondrial activity in ejaculated spermatozoa from fertile and infertile males[J]. J Assist Reprod Genet, 2004, 21(12): 445-451.

[18] 潘 静, 王叶庭, 白海栋, 等. 密度梯度离心法对辅助生殖患者精子DFI的改善作用及精子DFI与AIH妊娠率的相关性研究[J]. 中国性科学, 2023, 9(6): 16-19.

Pan J, Wang YT, Bai HD, et al. Improvement effect of density gradient centrifugation on sperm DNA fragmentation index in assisted reproduction patients and the correlation between sperm DNA fragmentation index and artificial insemination by husband pregnancy rate[J]. Chin J Hum Sex, 2023, 9(6): 16-19.

[19] Barbagallo F, La Vignera S, Cannarella R, et al. Evaluation of sperm mitochondrial function: a key organelle for sperm motility[J]. J Clin Med, 2020, 9(2): 363.

[20] 庞霁芸, 侯 苇, 农玉翔, 等. 人工智能在精子质量分析与精子优选中的应用[J]. 四川大学学报(医学版), 2024, 55(5): 1322-1328.

Pang JY, Hou W, Nong YX, et al. Application of Artificial Intelligence in Sperm Quality Analysis and Sperm Screening[J]. Journal of Sichuan University (Medical Sciences), 2024, 55(5): 1322-1328.

（责任编辑：周一青）