

全球医疗创新研究

GLOBAL MEDICAL INNOVATION RESEARCH

第10卷 第1期 总第50期

2025.02



全球医疗创新研究

GLOBAL MEDICAL INNOVATION RESEARCH

第10卷 第1期 总第50期

2025.02

出版社信息

主办单位：香港星源出版社

主编：周敬文

执行主编：梁思婕

社内编辑：

刘 源 唐睿衡

冯 意 晴

杨 天 翱

白 梓 郭 云 溪

赵 思 涵

叶 柏 松

网址：<https://hksspub.com/>

钟 芮 希 方 奕 晨

周 桐

沈 浩 铭

电话：+852 6855 8145

任 泽 凯 沈 岚

魏 心 妍

高 哲 远

邮箱：hksspub2022@163.com

罗 清 晗 蒋 眇 晖

刊期：双月刊



目 录

CONTENTS

微流控技术驱动的胚胎培养系统优化研究	林瀚宇	001
培养液中氧浓度梯度对胚胎代谢与分化的影响	陈雨柔	008
纳米温控薄膜在胚胎培养体系中的应用探索	吴梓恒	013
AI 算法在胚胎发育质量实时评估中的建模研究	叶文涛	018
低应激培养环境对胚胎细胞表观遗传稳定性的促进作用	高芷芸	023
生物传感芯片在胚胎培养液代谢监测中的创新应用	韩柏辰 罗雪宁	030
多参数智能调控系统对胚胎培养精度的提升作用	李恬予	036
培养基中氨基酸比例调控的系统优化策略	谢俊熙	042
无血清培养体系下胚胎能量代谢的调节模式	苏以恺	049
基于代谢组学的胚胎培养液微环境调控策略构建研究	张清予	055
动态温湿度微调控技术在胚胎培养室中的实践评估	王子骞 林思玥	060
干细胞外泌体对胚胎培养液中信号传导的影响机制	周映岚	065
生物材料表面改性对胚胎黏附与发育潜能的影响	杜子烨	073
培养环境 pH 自动平衡算法的设计与实验验证	赵沐然	078
胚胎培养液中微生态平衡的构建与维持策略	吕思航	083
胚胎培养装置的多维参数数据融合与反馈系统研究	李珂语	091
基于单细胞测序的胚胎发育微环境应答机制研究	陈可昕	096
基于系统生物学的胚胎培养环境全参数优化模型	程安晟	102
微流控芯片平台在胚胎同步培养与筛选中的应用	何子祺	110
温度、氧压与渗透压协同调控下的胚胎发育动态研究	潘若曦	115

基于代谢组学的胚胎培养液微环境调控策略构建研究

张清予
(浙江省 浙江大学医学院 310058)

摘要：

胚胎培养液的微环境组成直接影响体外发育过程，其代谢状态能够反映胚胎与外部环境之间的相互作用。通过代谢组学方法，对不同发育阶段胚胎培养液的代谢谱进行了系统分析，以揭示代谢变化规律并探索培养体系的可调控途径。采用液相色谱-质谱联用技术获取代谢特征，结合多变量统计与通路富集分析，识别出与胚胎发育潜能相关的关键代谢物。

结果表明，能量代谢、氨基酸循环及脂质代谢在胚胎早期发育中呈阶段性动态变化，不同代谢通路间存在协同调节关系。基于代谢特征的差异，构建了培养液微环境调控模型，并通过梯度浓度实验验证代谢物调整对胚胎发育率和代谢稳态的影响。研究建立了一套以代谢反馈为核心的培养液优化策略，为改进体外培养体系、提升胚胎发育质量提供了实验依据和理论支持。

关键词：代谢组学、胚胎培养液、微环境调控、胚胎发育、代谢通路分析、辅助生殖技术

一、引言：从胚胎培养到代谢组学的科学融合

1.1 胚胎培养液微环境的生理意义与研究背景

胚胎体外发育依赖于高度精细的培养液微环境，其化学组成、渗透压、pH值及代谢物浓度等因素均可影响胚胎细胞分化与代谢活动的稳定性。胚胎培养液不仅是营养供给的载体，也是胚胎与外部环境代谢信息交流的重要介质。研究表明，培养液中氨基酸、糖类及脂质等代谢组分的比例变化与胚胎发育潜能密切相关，而轻微的代谢失衡即可导致发育迟滞或植入失败。

在辅助生殖技术 (Assisted Reproductive Technology, ART) 快速发展的背景下，胚胎培养体系的标准化与个体化调控成为提升胚胎质量与着床率的重要方向。传统的培养液优化多基于经验或单一成分调整，缺乏对胚胎发育过程中代谢动态的系统性理解。这一局限促使研究者将代谢组学引入胚胎发育研究中，以探索代谢变化与胚胎发育状态之间的内在联系。

1.2 代谢组学技术在胚胎发育研究中的应用进展

代谢组学通过对小分子代谢物的系统检测与定量分析，揭示生理状态和环境刺激下的代谢变化特征，为研究胚胎发育过程中的代谢调控机制提供了新手段。近年来，液相色谱-质谱 (LC-MS) 和气相色谱-质谱 (GC-MS) 技术在胚胎培养液分析中的应用日益成熟，可实现微量样本中代谢物的精准识别。

研究发现，哺乳动物胚胎在不同发育阶段具有显

著的代谢重编程特征，例如糖酵解与氧化磷酸化的比例变化、氨基酸循环的动态调节及脂质合成的阶段性启动，这些代谢事件共同维持着早期发育的能量与信号平衡。通过对胚胎培养液的代谢谱进行无创检测，可在不干扰胚胎的情况下评估其发育潜能，从而为胚胎选择与培养液优化提供依据。

最新研究还将代谢组学与蛋白质组学、转录组学相结合，形成多组学融合分析策略，用以揭示培养微环境变化对胚胎发育的多层级影响。

1.3 研究目标、科学假设与创新点

本研究以体外胚胎培养体系为研究对象，依托代谢组学分析技术，系统解析不同发育阶段胚胎培养液的代谢特征与通路变化，识别与发育潜能密切相关的关键代谢物，并构建可实现动态调控的培养液优化模型。研究目标在于通过代谢信号与发育状态的关联分析，揭示胚胎发育的代谢规律及其对培养液微环境的反馈作用，从而建立基于代谢稳态调节的培养液优化策略，为辅助生殖领域提供理论支持与应用方向。

研究的创新性主要体现在两方面。其一，在方法上，将代谢组学系统引入胚胎培养液研究，建立了涵盖能量代谢、氨基酸循环与抗氧化反应的综合分析框架，实现胚胎代谢与培养液理化特征的同步解析。其二，在理论上，提出“代谢特征—微环境—发育结果”的耦合模型，并基于代谢反馈机制构建培养液调控策略，为实现个体化与智能化的胚胎培养体系提供了新的科学思路与验证路径。

二、胚胎发育代谢机制与培养体系原理

2.1 胚胎早期代谢特征与能量动态模型

哺乳动物胚胎在体外发育过程中表现出明显的阶段性代谢特征，其能量供应与物质代谢通路在不同发育阶段呈动态重构。研究表明，受精卵到囊胚阶段的代谢变化主要体现在能量代谢路径的转换，包括糖酵解与氧化磷酸化比例的调节、乳酸代谢的增强以及三羧酸循环的阶段性激活 [1]。

在胚胎发育早期，代谢模式由以氧化磷酸化为主逐步过渡为混合型能量代谢结构，随后在囊胚形成阶段重新强化线粒体活性。这一代谢动力学过程体现出发育进程中的“代谢重编程”现象，其核心在于细胞能量来源、代谢底物及代谢通路的协调变化。胚胎发育潜能与其代谢灵活性密切相关，当培养条件或代谢底物供给失衡时，代谢应答机制会受到干扰，进而影响胚胎的分化与植入能力。

2.2 培养液成分构成与微环境稳态调控机理

胚胎培养液通过提供能量底物、渗透调节因子及信号分子，维持胚胎体外发育的代谢平衡与微环境稳态。典型培养液中含有葡萄糖、乳酸、丙酮酸、氨基酸、无机盐、蛋白质及微量维生素等多种成分，这些物质共同构成了胚胎发育所需的代谢基质。研究指出，培养液的化学组成与浓度比例应与胚胎不同发育阶段的代谢需求相匹配，否则会导致细胞内能量代谢紊乱或氧化应激水平上升，从而降低囊胚形成率。

在动态培养体系中，胚胎会持续向培养液中释放代谢产物，如乳酸、氨基酸降解产物及脂质中间体。培养液中这些代谢物浓度的变化可作为反映胚胎代谢状态的“外部读出”信号。代谢稳态的维持不仅依赖培养液成分的合理配比，也与氧分压、pH、渗透压等理化条件密切相关。

2.3 代谢组学在微环境研究中的系统生物学框架

代谢组学的引入为胚胎培养液微环境研究提供了系统化、定量化的分析路径。该方法通过对培养液中数百种小分子代谢物的高通量检测，揭示不同发育阶段胚胎与培养体系间的代谢互作规律。

当前研究趋势正从单一代谢物分析向多组学整合转变，将代谢组学与蛋白质组学、转录组学相结合，形成系统生物学研究框架。这一方法可同时捕捉胚胎内外环境变化的分子级特征，从而实现培养液成分、胚胎代谢活动及发育潜能之间的定量关联 [3]。

三、研究设计与技术路线：代谢组学驱动的策略构建思路

3.1 实验总体设计与研究流程规划

本研究以胚胎培养液的代谢组学特征为研究核心，围绕“代谢表征—通路识别—策略构建—验证反馈”的主线构建整体研究框架，形成由数据采集、代谢解析到策略验证的闭环路径。

在样本采集阶段，选取健康来源的哺乳动物胚胎（参考小鼠或牛源模型），于受精后不同发育时期（2细胞期、4细胞期、桑椹胚期及囊胚期）收集培养液样品。所有样本在恒温条件下即时冷冻保存，以最大限度减少代谢物降解并保持生化稳定性。样本经预处理后，采用液相色谱—质谱联用系统（LC-MS）进行非靶向代谢组分析，捕获全谱代谢物信号并生成高维特征数据。数据经主成分分析（PCA）和偏最小二乘判别分析（PLS-DA）处理，用于识别不同发育阶段间的代谢差异，并结合通路富集分析确定关键代谢网络。

基于通路识别结果，调控培养液中关键代谢物的浓度比例，建立优化后的微环境体系。通过实验组与对照组的比较，评估胚胎发育率、代谢稳态及形态学差异，以验证代谢反馈驱动的培养液调控策略。研究整体以代谢组学数据为驱动，实现从代谢特征识别到培养液优化反馈的系统化研究流程，确保结果的可重复性与科学有效性。

3.2 代谢组学检测体系与数据分析方法

本研究采用高分辨液相色谱—质谱联用技术（UHPLC-QTOF-MS），在正负离子模式下同步检测培养液样本中的极性与非极性代谢物。样品经甲醇沉淀除蛋白处理后上机检测，质谱参数通过外标法校正，以消除批次间仪器响应差异并保持检测信号的一致性。

原始质谱数据在 XCMS 与 Compound Discoverer 平台上进行峰提取、保留时间校准、信号归一化和特征识别，生成代谢物相对丰度矩阵。多维统计分析包括主成分分析（PCA）和偏最小二乘判别分析（PLS-DA），用于评估样本间的分布特征、区分不同发育阶段的代谢模式，并揭示整体代谢趋势。差异代谢物的筛选基于变量重要性投影（VIP）值大于 1.0 及 Fold Change 大于 1.5 的标准，并通过方差分析（ANOVA, $p < 0.05$ ）确认其统计显著性。

筛选结果进一步利用 KEGG 数据库进行通路富集与代谢网络构建，以识别与胚胎发育密切相关的关键代谢节点和生物学通路。为降低实验偏差并提高结果的可重复性，实验设置三次生物学重复和一次技术重复，并引入质量控制样品（QC）监测系统漂移。所有数据经 Pareto 缩放处理，以平衡不同丰度代谢物在模型中的权重，确保分析结果的稳定性与可靠性。

3.3 差异代谢物筛选及关键代谢通路识别

代谢差异筛选基于 PLS-DA 模型的 VIP>1.0、Fold Change>1.5 及 p<0.05 的统计标准。通过对比不同发育阶段培养液的代谢谱，识别出与胚胎发育潜能高度相关的代谢物群。已有研究表明，这些代谢物主要集中在三大类通路：能量代谢、氨基酸代谢及脂质合成途径。

进一步通过 KEGG 数据库进行通路富集分析，发现三羧酸循环 (TCA cycle)、谷氨酸代谢、丙酮酸代谢及甘油磷脂代谢等通路在胚胎发育过程中呈显著变化。这些通路涉及能量供应、抗氧化平衡与细胞膜合成等关键生理过程。对比高发育潜能与低潜能胚胎组的培养液样本，发现特定代谢标志物（如乳酸、丙氨酸、谷氨酰胺）丰度变化与胚胎发育率存在显著正相关性。

3.4 培养液微环境调控实验方案与验证路径

在代谢通路识别结果的基础上，建立针对关键代谢物的培养液微环境调控实验体系。研究通过精确调整培养液中谷氨酸、乳酸和丙酮酸等核心代谢物的浓度，考察其对胚胎发育速率、囊胚形成率及代谢稳态的影响。首先，在单因子实验中分别改变各代谢物浓度，以评估其在不同水平下对胚胎能量代谢与发育潜能的调节作用。随后，结合多通路分析结果，构建多因素联合调控体系，进一步探讨代谢物间的协同效应及其对微环境稳定性的影响。

在验证阶段，通过代谢组学手段对优化后培养液的代谢谱进行复测，并与原体系进行比较，以评估代谢平衡是否趋近体内发育标准。实验结果通过发育率、形态学评分以及代谢谱相似度等指标进行综合评价。当优化组在代谢通路活性和发育表现方面均接近自然胚胎水平时，可认为代谢反馈驱动的培养液优化策略获得验证。

四、实验结果与代谢特征解析

4.1 胚胎发育阶段代谢谱的动态变化规律

利用非靶向代谢组学分析对不同发育阶段（2 细胞期、4 细胞期、桑椹胚期及囊胚期）的培养液进行检测，共检测到约 600 余种可识别代谢物，经多变量分析 (PCA 与 PLS-DA) 后，样本间呈现明显分群特征，表明各阶段胚胎代谢谱具有显著差异。

从代谢通路层面观察，早期阶段以葡萄糖 - 丙酮酸代谢及乳酸代谢为主，能量主要依赖糖酵解途径；中期阶段谷氨酸及天冬氨酸代谢活跃，为核酸与蛋白合成提供底物；囊胚阶段则表现出脂肪酸 β - 氧化和三羧酸循环活性增强，反映出线粒体能量代谢的恢复

与发育成熟趋势。

4.2 差异代谢物的生物学意义与功能推断

基于 PLS-DA 与 VIP 值筛选标准 (VIP>1.0, Fold Change>1.5, p<0.05)，共鉴定出 74 种差异代谢物。其中与发育潜能高度相关的主要包括乳酸、丙氨酸、谷氨酰胺、肌醇及甘油磷脂等物质。这些代谢物在能量转化、细胞信号调节及膜结构重塑中发挥关键作用。

结果显示，差异代谢物主要集中于三羧酸循环 (TCA cycle)、丙酮酸代谢、谷氨酸代谢及甘油磷脂代谢等通路 [1]。在发育早期，乳酸和丙酮酸水平升高表明糖酵解为主要能量来源；至囊胚阶段，谷氨酰胺及脂质代谢通路活跃，提示胚胎进入高能耗状态并启动膜结构重塑。部分代谢物如肌醇与胚胎细胞信号传递及胞间通讯密切相关，对维持细胞内稳态和发育同步具有调节作用 [2]。

对比高发育潜能与低潜能胚胎样本，发现高潜能组中丙酮酸与谷氨酰胺水平显著高于对照组，而脂质氧化相关代谢物含量降低，表明能量代谢向更高效、低氧适应方向转变。

4.3 微环境调控实验结果与培养液优化评估

根据关键代谢通路识别结果，对培养液中部分代谢物进行定向调节，建立微环境优化实验体系。分别通过单因素和多因素组合实验，对谷氨酸、丙酮酸及乳酸浓度进行梯度调整，以评估其对胚胎发育率及代谢稳态的影响。

实验结果显示，当谷氨酰胺浓度维持在基础培养液水平的 1.5 倍时，囊胚形成率显著提高 (p<0.05)；而丙酮酸与乳酸浓度过高均导致发育速率减缓，提示能量代谢需保持动态平衡 [5]。多因素优化实验进一步表明，谷氨酸与乳酸的协同调节可改善代谢稳态，使培养液中代谢谱分布更接近体内标准。

经 LC-MS 复测验证，优化组培养液代谢谱中 TCA 循环及氨基酸代谢相关通路活性显著增强，而氧化应激相关代谢物含量降低。从生理指标看，优化培养液可提高胚胎发育率与囊胚质量评分，并减少代谢异化产物积累。

五、策略构建与模型建立：代谢反馈驱动的培养体系优化

5.1 胚胎代谢网络建模与关键调控节点识别

基于前期代谢组学分析结果，构建了胚胎发育过程中培养液代谢网络模型。通过整合差异代谢物数据与 KEGG 通路注释信息，建立胚胎 - 培养液代谢互作图谱，涵盖能量代谢、氨基酸代谢、脂质代谢三大模块。模型采用代谢通量分析 (Metabolic Flux Analysis,

MFA) 与网络拓扑参数计算方法, 对各通路节点的代谢流速与调控强度进行量化, 识别出在胚胎发育中具有高敏感度的关键节点, 包括丙酮酸脱氢酶复合体 (PDH)、谷氨酸脱氢酶 (GLUD1) 及柠檬酸合成酶 (CS) 等酶调控位点。

网络拓扑分析表明, TCA 循环与谷氨酸代谢通路处于代谢网络的中心位置, 对能量供给和氨基酸平衡具有显著控制效应。谷氨酸及丙酮酸浓度的微小变化可通过代谢通量传导影响下游脂质代谢速率, 进而改变胚胎发育的代谢平衡状态 [4]。

5.2 基于代谢反馈的培养液优化方案设计

在代谢网络分析的基础上, 建立以代谢反馈为核心驱动的培养液优化策略。该策略的基本思路是, 将胚胎发育过程中的代谢信号视为动态调控输入, 通过实时监测培养液中关键代谢物的变化, 实现对微环境成分的自适应调整 [2]。

培养液优化设计综合考虑能量供给、氨基酸循环与脂质代谢三方面的调控需求。在能量调控层面, 通过调节丙酮酸与乳酸的比例, 平衡糖酵解与氧化磷酸化之间的能量转换效率, 确保细胞能量供应稳定。在氨基酸代谢方面, 根据谷氨酸和天冬氨酸代谢活动的变化, 适度调整氨基酸浓度, 以维持氮代谢与细胞还原态稳态。同时, 在脂质代谢层面, 通过补充脂肪酸合成底物促进囊胚阶段的膜结构形成, 提升细胞膜完整性与发育适应性。

整个优化体系引入代谢反馈控制逻辑。培养液代谢谱的实时监测结果作为调控依据, 当检测到能量代谢产物偏离自然发育范围时, 系统通过微流控模块自动调节代谢物浓度, 实现成分比例的动态修正与稳态维持。该反馈机制使培养液由静态供养体系转变为动态响应体系, 为构建精准化、个体化的胚胎培养环境提供了可行路径。

5.3 动态调控模型与自适应培养体系构建

在上述优化方案基础上, 构建了代谢反馈驱动的动态调控模型。模型包括三个核心子系统: 感知模块、反馈模块与执行模块。感知模块基于在线质谱或电化学检测单元实时捕获培养液中关键代谢物浓度变化; 反馈模块利用代谢网络模型预测胚胎代谢趋势, 识别异常通路信号; 执行模块根据反馈结果, 通过微量泵系统调节培养液组分, 实现对胚胎微环境的精确控制 [3]。

通过模拟分析与小规模实验验证, 模型能够在胚胎发育早期自动调整培养液能量底物比例, 使培养液中代谢谱逐步趋近体内发育标准。与传统静态培养相比, 该系统在维持代谢稳态、提高囊胚形成率及减少

氧化应激水平方面表现出更高的稳定性与效率。

六、代谢组学视角下的胚胎发育调控机制与创新思路

6.1 胚胎代谢动态的机制解析与生物学启示

代谢组学分析揭示了胚胎发育过程中的显著代谢动态特征, 不同发育阶段呈现出特定的代谢模式转换。结果显示, 早期胚胎以糖酵解为主要能量来源, 而随着细胞分化与线粒体功能增强, 氧化磷酸化逐渐成为主导能量供应途径 [3]。能量通路的重塑不仅影响细胞增殖速率, 还可能通过调节表观遗传修饰 (如乙酰化与甲基化) 间接调控基因表达 [4]。

谷氨酰胺、丙酮酸及乳酸等关键代谢物在不同发育阶段发挥协同作用。谷氨酰胺既作为氮源参与氨基酸合成, 又维持细胞还原状态, 丙酮酸与乳酸则参与能量平衡与 pH 稳态调控。

从生物学层面看, 胚胎代谢并非静态供能过程, 而是一个动态自调节系统。代谢变化不仅服务于能量需求, 更作为发育信号参与细胞间通讯与发育决策。

6.2 培养液调控策略的科学价值与临床潜力

本研究提出的“代谢反馈驱动”培养液调控策略在理论与实践层面均具有潜在价值。通过代谢组学手段实时监测培养液中关键代谢物变化, 并基于反馈信号动态调整培养液配比, 可实现对胚胎发育微环境的精准控制。与传统静态培养体系相比, 该策略能够根据胚胎的代谢状态自适应调节底物供应, 使培养体系更接近体内发育条件。

从科学意义上讲, 该策略实现了代谢组学结果的功能化转化, 使代谢信号从“诊断指标”上升为“调控变量”, 建立了从代谢识别到策略干预的闭环路径 [1]。

在临床辅助生殖 (ART) 领域, 该方法为无创胚胎评价与个体化培养提供了新方向。通过代谢谱分析结合微环境优化, 可在不接触胚胎的情况下预测其发育潜能, 从而提高胚胎选择准确性与移植成功率 [5]。同时, 培养液优化策略有望减少代谢应激与氧化损伤风险, 提升囊胚形成率与整体培养效率。

6.3 局限性分析与未来研究方向

本研究验证了代谢组学在胚胎培养液调控中的可行性, 但仍存在一定局限。样本量及胚胎来源差异可能影响代谢谱的普适性, 不同物种在能量代谢时序上的差异限制了模型的外推性。

当前构建的代谢反馈调控体系尚处于实验验证阶段, 距离自动化及临床转化仍有差距。未来研究可从多组学融合、实时监测与智能算法优化等方向深化,

通过结合代谢、转录及表观信息揭示代谢调控机制，发展在线检测与反馈系统以实现动态培养控制。同时，应在临床辅助生殖实践中验证该体系对胚胎质量和妊娠结局的改进效果 [5]。

七、代谢反馈视角下的胚胎培养液优化与未来方向

7.1 主要研究结论与理论创新总结

研究以代谢组学为核心方法，从胚胎发育代谢特征出发，系统构建了以代谢反馈为驱动的培养液微环境优化策略。实验结果表明，胚胎发育过程中存在明显的代谢阶段性变化。早期胚胎主要依赖糖酵解供能，而随着细胞分化与线粒体功能增强，能量代谢逐渐转向以氧化磷酸化为主的高效模式。这种代谢重编程反映了胚胎发育需求与能量平衡之间的动态调节关系。

代谢组学检测揭示了多种与发育潜能密切相关的关键代谢物，包括谷氨酰胺、丙酮酸、乳酸和甘油磷脂等，它们在能量供应、氧化还原平衡及膜结构合成中具有重要作用。基于这些代谢特征，研究构建了代谢反馈模型，实现了对培养液成分的动态调整，使胚胎培养体系能够在代谢信号的指导下维持稳态 [4]。

7.2 培养液微环境调控策略的应用前景

代谢反馈驱动的培养液调控体系在基础研究和临床应用中均显示出潜力。通过实时监测培养液代谢谱并据此调整底物供给，可实现培养条件的个体化与动态化，使培养体系更接近体内发育状态 [2]。

该策略同时为无创胚胎评价提供了新途径。培养液代谢谱的变化能够反映胚胎的生理状态与发育潜能，无需直接干预胚胎即可评估其质量与植入前活性。

此外，代谢反馈调控模型具备通用性，可应用于多种体外发育体系，如动物胚胎培养、干细胞诱导分化及类胚体系构建等 [1]。其思路为从被动供养向主动调控的体系转变提供了技术支撑，拓展了传统培养

液优化的理论边界。

7.3 代谢组学引领的智能胚胎培养发展方向

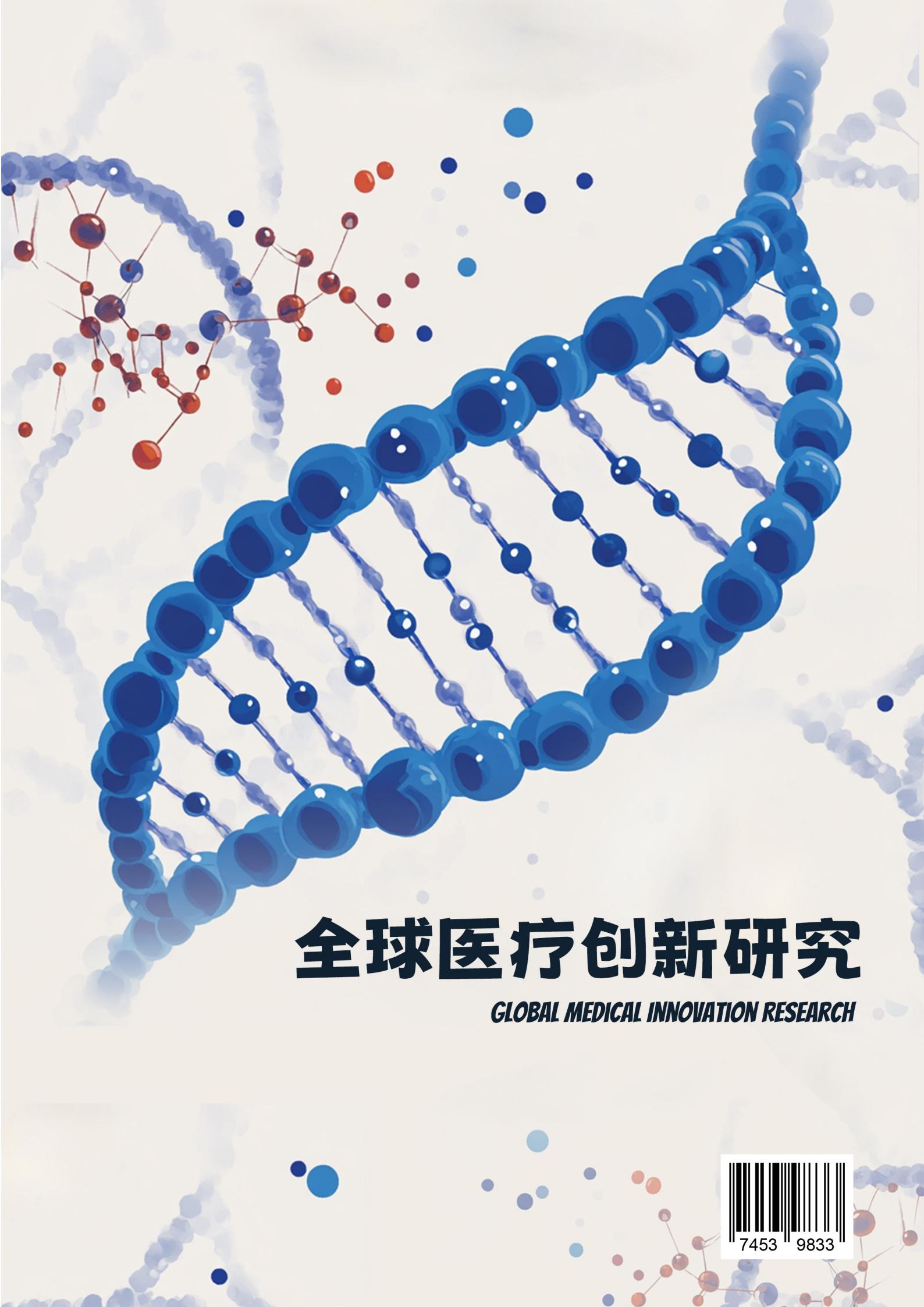
未来的胚胎培养研究将朝向数据驱动与智能化方向发展。代谢组学作为连接生物检测与动态调控的核心技术，能够实现从代谢识别到反馈干预的闭环管理。

未来的智能培养体系将依托实时监测与算法优化双重支撑。微流控与在线传感技术的结合将实现培养液中关键代谢物的连续检测，为培养环境调控提供即时反馈信号。

这种集检测、建模与控制于一体的自适应系统，将显著提升胚胎培养的精度与可重复性，使体外发育环境更加接近生理状态。随着代谢反馈机制与智能调控技术的不断融合，胚胎培养研究正迈向可感知、可学习、可优化的新时代。

参考文献：

- [1] Huang Xin. Dynamic metabolism during early mammalian embryogenesis [J]. Development, 2023.
- [2] Metabolomics Integration in Assisted Reproductive Technologies for embryo culture medium [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024.
- [3] Warden et al. Quantitative Proteomics and Metabolomics of Culture Medium from Single Human Embryos [J]. Analytical Chemistry, 2024.
- [4] Li et al. Metabolomic Biomarkers in Bovine Embryo Culture Media and Their Association with Hatching [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024.
- [5] 李永伟，李雪冰. 胚胎培养液代谢组学检测在无创胚胎筛选中的应用与思考 [J]. 中华检验医学杂志, 2023, 46(5): 437-438.



全球医疗创新研究

GLOBAL MEDICAL INNOVATION RESEARCH

