

· 教学研究 ·

# C2C12细胞诱导分化与细胞学综合检测技术 在本科细胞生物学实验教学中的应用与探索

乌云达来 苏亚拉图 美荣\*

(内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 呼和浩特 010022)

**摘要** 为提升生物学专业本科生的科研思维与科研实践能力, 该研究依托细胞生物学实验前期课程基础, 设计以C2C12细胞诱导分化为核心的探究性实验。该实验综合运用细胞复苏、传代培养、诱导分化、免疫荧光染色、吉姆萨染色、倒置显微镜观察及激光共聚焦显微镜观察等多项技术, 诱导C2C12细胞分化为肌细胞, 通过细胞学综合检测技术明确分化特征。教学实践表明, 该实验有效串联了分散的实验知识点与技能, 帮助学生建立了系统性科研思维, 提升了学生实验操作的综合应用能力与科学探究能力, 为其后续学术探究、科研实践奠定了坚实基础。

**关键词** 细胞生物学实验; 细胞分化; 联合染色; 本科生培养; C2C12细胞

## Application and Exploration of C2C12 Cell Induced Differentiation and Comprehensive Cytological Detection Technology in Undergraduate Cell Biology Experiment Teaching

Wuyundalai, Soyolt, Meirong\*

(College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

**Abstract** To improve the scientific thinking and practical research abilities of undergraduate biology students, this study designed an inquiry-based experiment centered on the induced differentiation of C2C12 cells, based on the prior foundation of Cell Biology experimental courses. The experiment integrates multiple techniques, including cell recovery, subculture, induced differentiation, immunofluorescence staining, Giemsa staining, inverted microscopy, and confocal laser scanning microscopy. C2C12 cells were induced to differentiate into myocytes, and their differentiation characteristics were confirmed through combined staining approaches. Teaching practice demonstrated that this experimental module effectively integrates previously fragmented experimental knowledge and skills, helps students establish systematic scientific thinking, and improves their comprehensive experimental competence and scientific inquiry ability, thereby laying a solid foundation for subsequent academic exploration and research practice.

收稿日期: 2026-02-09 接受日期: 2026-03-11

内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划(批准号: NJYT23089)、教育部产学合作协同育人项目(批准号: 250201414181341)和内蒙古自治区人力资源和社会保障厅2023年度留学人员创新启动支持计划(批准号: 2023-31)资助的课题

\*通信作者。Tel: 0471-4392448, E-mail: meirong@imnu.edu.cn

Received: February 9, 2026 Accepted: March 11, 2026

This work was supported by the Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region (Grant No. NJYT23089), the Industry-Education Integration and Collaborative Education Project of the Ministry of Education (Grant No. 250201414181341), and the Inner Mongolia Autonomous Region Department of Human Resources and Social Security 2023 Innovation Launch Support Program for Overseas Students (Grant No. 2023-31)

\*Corresponding author. Tel: +86-471-4392448, E-mail: meirong@imnu.edu.cn

**Keywords** Cell Biology experiment; cell differentiation; combined staining; undergraduate training; C2C12 cells

细胞作为生命个体的最基本结构单位,它也有着自己的生命活动,而这些恰好与我们生命个体的生老病死是具有紧密相关。因此,伟大学者威尔森曾经说过:“每一个生物科学问题的答案都必须在细胞中寻找”<sup>[1]</sup>。细胞生物学实验是生命科学相关专业本科生的核心实践课程,对于巩固理论知识、培养实验技能与科研思维具有关键作用<sup>[2]</sup>。生物专业本科生,不仅需要扎实的专业知识与实验能力,更需具备将科研方法转化为实践应用、学术探究及后续深造所需的核心应用能力。但以往本科细胞生物学实验中普遍存在的问题是:实验内容多以单个、相互独立的形式设置,实验设计往往仅围绕某一单一知识点展开,不同实验之间缺乏有机衔接与内在关联,不利于学生系统串联各类实验技术方法,也难以帮助其全面、深入地理解生命活动的本质<sup>[3-5]</sup>。因此,寻找到一个合适的模型,设计一系列有机联系的实验项目,让学生能体会到生命活动的发展规律和实验方法的连贯性,对于培养学生的学习兴趣、科研思维及科研方法的转化能力具有重要的作用。

我院细胞生物学实验课共36学时,在面向生物科学专业大学三年级学生开设。在本实验课程的前期验证性独立实验课中,学生已系统掌握细胞复苏与培养、细胞传代、吉姆萨染色法及倒置显微镜使

用等基础技能(图1)。在此基础上,本教学团队首次将C2C12细胞分化模型引入本科细胞生物学实验课程教学,结合免疫荧光染色法与激光共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscopy, CLSM)等学生新接触的实验技术,设计了5个有机衔接、层层递进的实验项目。通过引导学生整合前期分散于各独立实验项目中的实验技能,以小组合作形式设计科学合理的实验流程,切实强化其实验技术的综合性应用能力与提高其科研训练水平(图2)。

C2C12细胞系由YAFFE与SAXEL<sup>[6]</sup>首次分离并鉴定,是一株源自小鼠骨骼肌的成肌细胞系。该细胞系兼具分化潜能高、培养条件简便、分化特征显著三大核心优势:在含2%马血清的诱导培养基中,C2C12细胞可快速发生细胞融合,并进一步分化形成多核肌管<sup>[7]</sup>,此过程伴随肌源性调节因子(myogenic regulatory factors, MRFs)家族成员成肌细胞决定蛋白MyoD的表达下调,以及肌细胞生成素MyoG等肌特异性标志物的显著高表达<sup>[8]</sup>;常规培养阶段仅需采用添加胎牛血清的基础培养基,无需额外添加特殊成分,兼具培养成本低廉与操作流程简便的特点;此外,该细胞系的分化进程具有高度同步性与稳定性,能够保障实验结果的良好重复性<sup>[9-10]</sup>。

本研究设计的C2C12细胞诱导分化联合吉姆萨染色和免疫荧光染色实验,旨在串联前期分散的实

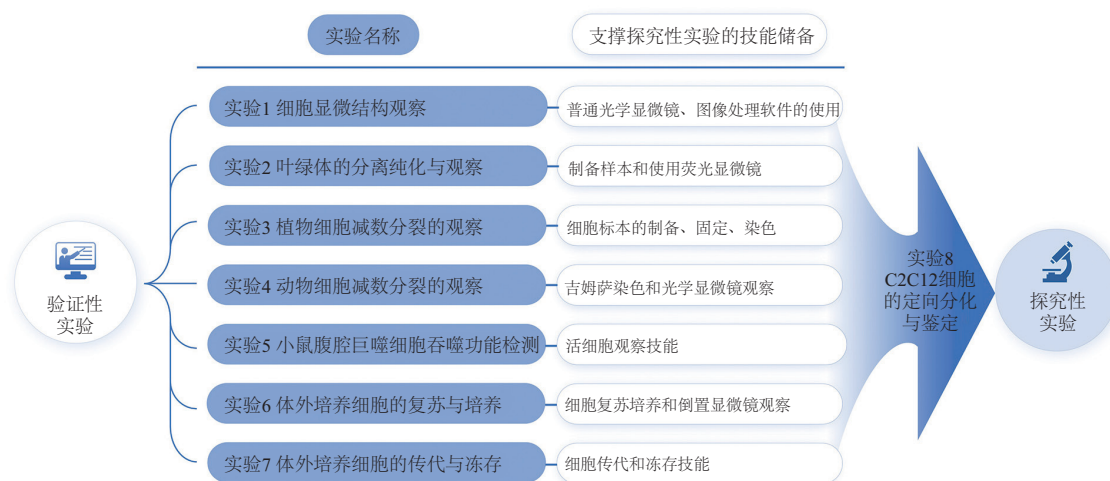


图1 多模块实验技能在细胞生物学探究性实验中的整合示意图

Fig.1 Integration of multi-module experimental skills in comprehensive Cell Biology experiments

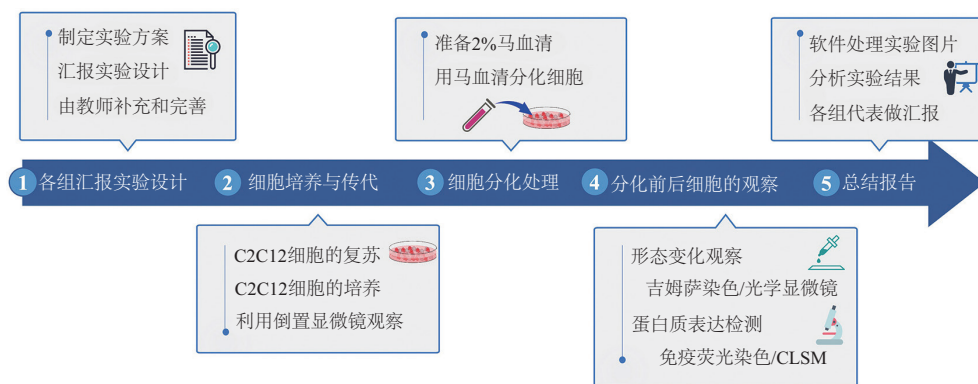


图2 C2C12细胞的诱导分化实验及递进关系

Fig.2 Induced differentiation experiment and progressive relationship of C2C12 cells

验技能,构建“实验设计-细胞培养-细胞分化-分化观察-总结汇报”的科研化教学流程,以助力生物学专业本科生提升综合科研能力、夯实专业知识与实验基础、强化科研方法应用能力,为其开展学术探究、提升科研素养提供实践参考。

## 1 实验设计与实施

### 1.1 实验目的

本实验旨在综合运用细胞复苏、培养、传代等核心技术,熟练掌握C2C12细胞的体外培养与稳定维持方法;通过建立C2C12细胞向肌细胞分化的体外诱导体系,动态观察并记录分化进程中细胞形态的特征性变化;可熟练运用吉姆萨染色技术,结合光学显微镜观察,从细胞形态变化层面验证细胞分化特征;能够运用免疫荧光染色技术,结合激光共聚焦显微镜观察,从分子水平变化验证细胞分化特征;同时掌握实验结果的科学分析与合理解读方法;最终在实操过程中培养学生严谨的科研思维、高效的团队协作能力及规范的实验汇报能力,夯实其科研实操与学术表达基础,助力综合科研素养的全面提升。

### 1.2 实验原理

细胞分化的本质是基因选择性表达,该过程受内因(基因组表达模式)与外因(环境信号分子)的协同调控。C2C12细胞作为典型的小鼠成肌细胞系,在特定血清诱导下,可启动肌细胞特异性基因的表达程序,逐步从梭形单核成肌细胞融合为多核肌管,形成肌细胞的特征性结构<sup>[9]</sup>。

培养基成分是调控C2C12细胞增殖与分化的关键外因:含10%胎牛血清的DMEM生长培养基,可维持细胞的活跃增殖能力,保障细胞群体稳定扩增;而

含2%马血清的高糖DMEM分化培养基,能有效抑制细胞增殖并启动分化程序,为多核肌管的形成提供适宜微环境<sup>[10]</sup>。

分化效果可通过多维度染色技术验证:吉姆萨染色可清晰显示成功分化细胞内的多核特征,直观反映分化进程;MyoD与MyoG分别作为肌肉细胞分化早、晚期的特异性标志蛋白,可通过免疫荧光染色特异性识别分化细胞;结合DAPI染色对细胞核的标记,经激光共聚焦显微镜观察,能清晰观察多核肌管的形态特征,为细胞分化效果验证提供直接且可靠的实验依据<sup>[11]</sup>。

### 1.3 实验材料与仪器

1.3.1 实验材料 C2C12细胞系购自海星生物科技有限公司;DMEM高糖培养基、1%青霉素-链霉素双抗、0.25%胰蛋白酶购自美国Gibco公司;胎牛血清(fetal bovine serum, FBS)购自内蒙古大溪生物科技有限公司;马血清购自上海生工生物工程有限公司;牛血清白蛋白(BSA)、PBS缓冲液购自索莱宝科技有限公司;吉姆萨染色液购自北京酷来搏科技有限公司;兔抗小鼠MyoD多克隆抗体、兔抗小鼠MyoG多克隆抗体购自睿瀛生物技术有限公司;山羊抗兔IgG二抗(Alexa Fluor 488或568)购自英国Abcam公司;4,6-二脒基-2-苯基吡啶(DAPI)溶液购自美国ThermoFisher Scientific公司。

1.3.2 实验仪器与用具 实验仪器和工具包括:超净工作台(青岛海尔股份有限公司,货号HCB-1300V)、CO<sub>2</sub>恒温培养箱(ThermoFisher Scientific公司,货号3131)、离心机(上海天美科学仪器有限公司,货号V18R Pro)、倒置相差显微镜(Olympus公司,货号CKX53SF)、激光共聚焦显微镜(Olympus公司,货号

FV4000)、电动移液器(ThermoFisher Scientific公司,货号9501S1)、细胞培养瓶/皿、离心管、载玻片、盖玻片等。

#### 1.4 实验教学安排

本实验为8学时探究性综合实验,由每组4名学生协作完成,分5个阶段开展:第一阶段(2学时),各组结合前期实验方法设计实验流程及详细实验步骤,在学生提交并汇报实验方案的基础上,由老师对方案进行完善;第二阶段(1学时),进行C2C12细胞复苏与扩增,学生开展细胞冻存管快速解冻、培养基配制、细胞离心重悬、接种培养等操作,运用锥虫蓝染色法进行细胞计数与存活率检测,并通过倒置显微镜观察细胞初始生长状态;第三阶段(1学时),进行细胞传代与诱导分化,待细胞汇合度达80%~90%时进行传代,调整细胞密度后更换分化培养基启动诱导,每48 h换液并通过倒置显微镜观察细胞形态变化,记录细胞从梭形到多核肌管的转化过程;第四阶段(3学时),开展细胞学综合检测与结果分析,诱导6天后设置两组实验,一组进行吉姆萨染色,通过倒置显微镜观察并采集图像,另一组进行细胞固定、免疫荧光染色(包括MyoD或MyoG一抗孵育、荧光二抗孵育)与DAPI核染色,通过激光共聚焦显微镜观察并采集图像;第五阶段(1学时),各组分析肌管形成率与染色特异性,撰写实验报告并进行小组汇报,汇报结束后由老师或其他小组对汇报内容进行评价。

## 2 实验步骤

### 2.1 C2C12细胞的复苏与培养

各组按照最终修订的实验方案启动实验。将冻存于液氮的C2C12细胞置于37 °C水浴锅中快速解冻,随后将解冻后的细胞悬液移入离心机,在室温条件下,以1 000 r/min转速离心5 min。离心结束后将样品转移至超净台,小心弃去上清液;加入适量含10%胎牛血清(FBS)和1%青霉素-链霉素双抗的DMEM高糖培养基,用移液枪轻柔吹打,使沉淀细胞充分重悬。将细胞悬液接种至2个6 cm细胞培养皿:一组设为对照组(CK),进行常规培养;另一组设为诱导分化组(T),采用马血清进行诱导分化。两组均置于37 °C、5% CO<sub>2</sub>恒温培养箱中培养。次日,学生通过倒置显微镜观察细胞贴壁生长状态,并采集图像记录。

### 2.2 C2C12细胞的诱导分化

对照组(CK)细胞培养至融合度达90%时收集细胞;诱导分化组(T)细胞以生长培养基维持培养,待细胞融合度达到60%~70%时,更换为含2%马血清、1%双抗的DMEM诱导分化培养基,启动成肌分化程序。分化完成后收集两组细胞,分别进行吉姆萨染色与免疫荧光染色,通过吉姆萨染色观察分化细胞的形态变化,借助免疫荧光染色分析特异性蛋白质的表达差异。

### 2.3 吉姆萨染色

吉姆萨染色用于观察C2C12成肌细胞的成肌分化状态,具体操作如下:取对照组(CK)细胞及诱导分化6天后的T组细胞,弃去培养基,加入4%多聚甲醛溶液室温固定15 min;细胞固定完成后,加入吉姆萨染色液,室温条件下染色2 min,随后用去离子水漂洗3次,最后在倒置显微镜下观察细胞形态并采集图像。

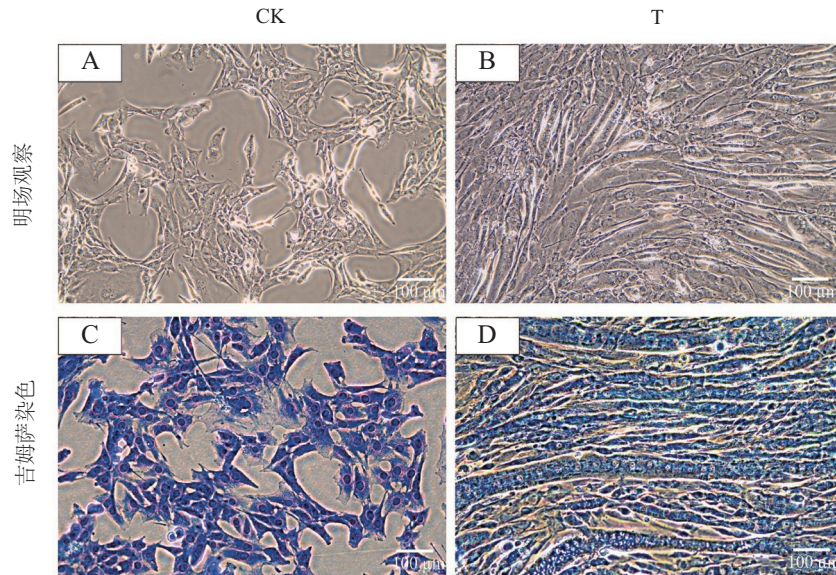
### 2.4 免疫荧光染色

免疫荧光染色操作流程如下:取对照组(CK)与诱导分化组(T)的细胞爬片,先用PBS漂洗3次,再加入4%多聚甲醛溶液室温固定细胞30 min;固定完成后经PBS漂洗3次,采用0.2% Triton X-100溶液通透细胞,随后加入5% BSA溶液封闭细胞30 min;封闭结束后,加入兔抗小鼠多克隆MyoD或MyoG抗体作为一抗(1:5 000),于4 °C条件下孵育过夜。次日弃去一抗,加入对应荧光二抗(1:500),室温避光孵育2 h;孵育完成后用DAPI溶液室温染细胞核10 min。免疫荧光染色结束后,在教师的带领下将C2C12细胞爬片置于激光共聚焦显微镜下观察,并采集图像。

## 3 实验结果

### 3.1 细胞生长与分化形态变化

复苏后的C2C12细胞呈典型梭形贴壁生长,增殖能力旺盛;更换含2%马血清的分化培养基后,细胞增殖速率显著减小,形态逐渐伸长并相互融合,培养至5~6天可形成特征性多核肌管结构。本实验以未诱导的C2C12细胞为对照组(CK),经诱导分化的细胞为实验组(T)。形态观察结果显示,对照组细胞维持单核梭形的固有生长形态,而实验组细胞成功融合为多核肌管,且肌管呈现出清晰的明暗横纹(图3A和图3B)。吉姆萨染色结果进一步验证,分化前细胞为单核纺锤形,分化成熟后的细胞则表现为细



C2C12细胞诱导分化6天后明场观察结果(A和B); 吉姆萨染色结果(C和D)。

Photos taken before and after 6 days of C2C12 cell differentiation (A and B); Giemsa staining results (C and D).

图3 C2C12细胞明场与吉姆萨染色结果图

Fig.3 Bright-field and Giemsa staining results of C2C12 cells

胞核沿肌管长轴呈串珠样排列, 形成狭长的多核肌管(图3C和图3D), 该形态特征与骨骼肌细胞终末分化的典型标志一致。

通过对上述实验结果的观察与分析, 学生可直观认识到细胞分化进程对细胞形态的调控作用。由此可见, 以C2C12细胞成肌分化作为本科生细胞生物学实验教学材料, 不仅能够帮助学生深化对细胞分化理论的理解, 还可以有效锻炼其科学思维能力, 显著提升他们对实验课程的学习兴趣。

### 3.2 分化细胞蛋白质表达差异

免疫荧光染色结果显示, 增殖期C2C12细胞中MyoD呈高表达水平(图4A, 绿色荧光), 而经6天诱导分化后, 其表达量显著下调(图4D, 绿色荧光)。MyoD作为调控成肌细胞增殖及早期分化的核心因子, 其表达水平的动态下调, 提示细胞已脱离增殖周期并逐步进入终末分化阶段。与之相对应, 分化成熟的细胞可特异性表达成肌分化关键标记蛋白MyoG(图4G和图4J, 红色荧光); 结合DAPI核染色结果可见, 细胞核在肌管内呈规则链状排列, 激光共聚焦显微镜可清晰呈现分化细胞的亚细胞结构特征, 从分子层面进一步验证细胞成肌分化成功。同时, DAPI染色结果可清晰显示, 细胞分化前后的细胞核大小存在明显差异, 其中分化前细胞核体积较大(图4B和图4E), 分化后细胞核体积则明显变小(图4H和

图4K)。

形态学特征观察与分子标记物检测的结果相互佐证, 明确证实C2C12细胞已成功分化为成熟肌肉细胞。

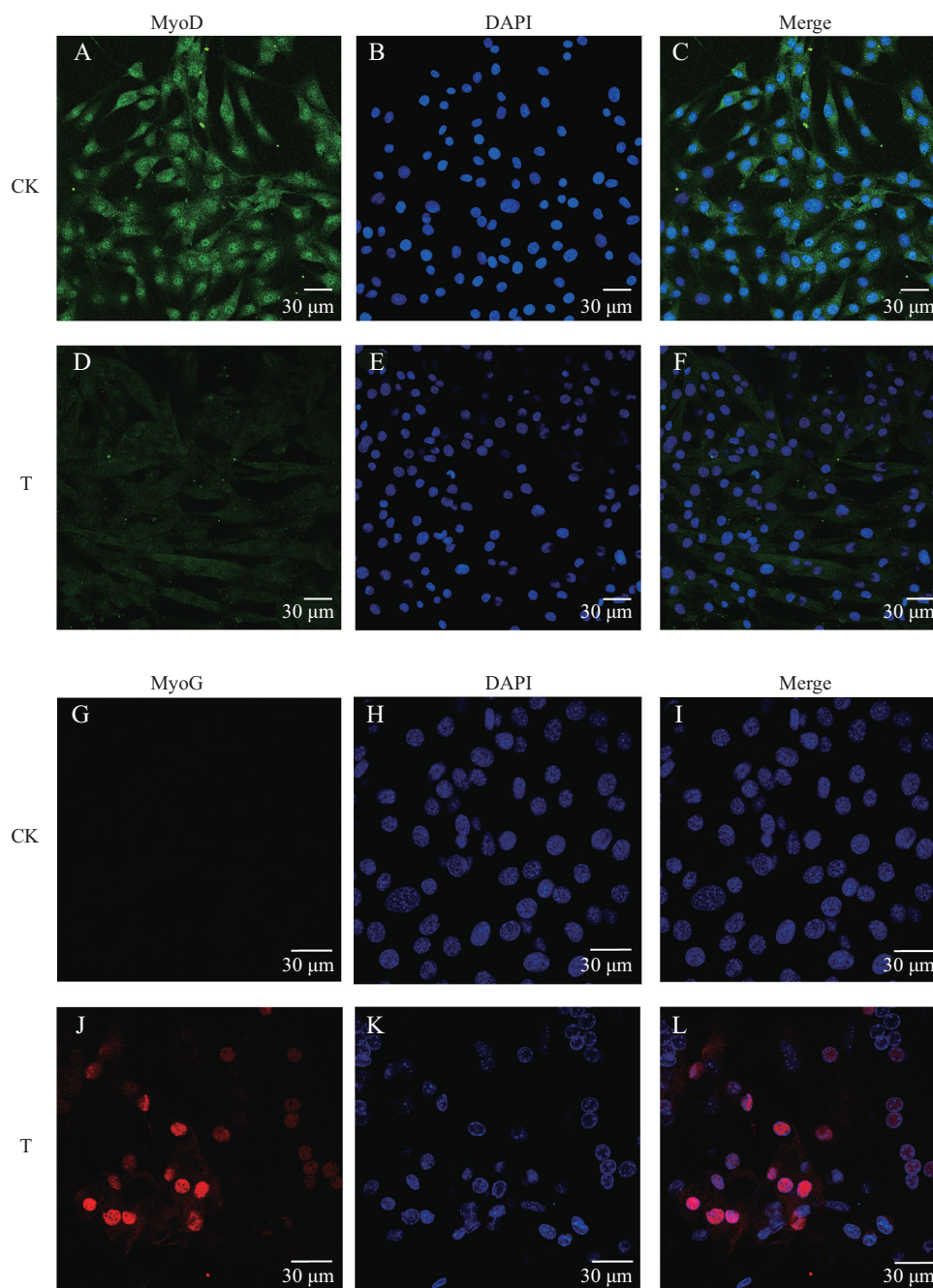
通过对上述实验结果的观察、分析和总结汇报, 学生可熟练掌握细胞形态观察、染色鉴定及结果解读的核心方法, 深化对细胞分化调控机制的理解; 同时在实验操作与团队协作中, 逐步养成严谨的科研思维与规范的实验习惯, 为后续开展相关学术探究、科研实践及技能提升奠定坚实基础。

## 4 讨论

### 4.1 实验设计的优势

本实验作为前期1至7项验证性独立实验的综合性延伸, 以学生已掌握的分散实验方法为基础设计开展, 既实现了技术的整合复用, 又贯穿分组设计、汇报优化、实操验证及总结评价的完整流程, 精准契合实验目的中技术应用、能力培养的核心诉求, 兼具科学性与实操性, 优势显著, 具体体现在以下几方面。

其一, 衔接前期实验, 实现技术整合复用。实验并非孤立开展, 而是以学生在前期1至7项实验中掌握的细胞复苏、离心、培养、染色等分散方法为基础, 构建“基础操作-进阶诱导-多维度验证”的完整技术



采用MyoD抗体(A和D, 绿色)与MyoG抗体(G和J, 红色), 分别对未分化对照组(CK)及诱导分化组(T)细胞进行免疫荧光染色, 激光共聚焦显微镜下采集图像。其中, A、D为MyoD特异性染色, G、J为MyoG特异性染色; B、E、H、K为DAPI细胞核染色(蓝色); C、F、I、L分别为对应视野下MyoD/MyoG染色与DAPI染色的共定位叠加图, 可直观显示目的蛋白的亚细胞定位。

Immunofluorescence staining was performed on undifferentiated control group (CK) cells and induced differentiation group (T) cells using MyoD antibody (A and D, green) and MyoG antibody (G and J, red), respectively. Images were acquired under a laser scanning confocal microscope. A and D show MyoD-specific staining, G and J show MyoG-specific staining; B, E, H and K show DAPI nuclear staining (blue); C, F, I and L are the merged (co-localization) images of MyoD/MyoG staining and DAPI staining in the corresponding visual fields, respectively, which can intuitively display the subcellular localization of the target proteins.

图4 C2C12细胞免疫荧光染色结果图

Fig.4 Immunofluorescence staining results of C2C12 cells

链条。从冻存细胞 37 °C 水浴快速解冻、1 000 r/min 离心 5 min 的标准化操作, 到培养基配制、细胞重悬接种等步骤, 均是对前期实验技能的综合运用与强

化, 既帮助学生巩固已有知识, 又实现从单一操作到系统实验的能力跨越, 精准落实“综合运用核心技术、掌握 C2C12 细胞体外培养与维持方法”的实验

目的。

其二,对照设计严谨,适配自主设计场景。实验明确设置对照组(CK)与诱导分化组(T),以单一变量控制排除无关因素干扰,为学生自主分析实验结果提供清晰框架。结合“分组设计方案-汇报-老师优化-启动实验”的流程,学生可基于前期掌握的实验方法自主设计分化实验,严谨的对照体系既能保障学生设计方案的可落地性与结果可靠性,又为动态观察分化形态变化、多维度验证分化特征提供可靠基线,契合“动态观察分化进程、多维度验证分化特征”的核心需求。

其三,流程闭环完整,适配科研训练需求。实验构建“分组设计-方案汇报-优化完善-实操实施-结果总结-组间评价”的完整闭环,既以标准化操作参数(如试剂品牌、离心与培养条件)为学生自主设计提供参考依据,降低操作误差,又通过方案优化、结果评价环节,强化学生的问题意识与创新思维。这种设计既适配从前期分散实验到综合实验的科研训练进阶,又为相关科研实践提供可复制的闭环模板,助力学生科研素养提升。

其四,多维度验证衔接顺畅,强化结果分析与汇报能力。实验以倒置显微镜观察为基础,衔接学生已掌握的吉姆萨染色方法,同时引入免疫荧光染色及激光共聚焦显微镜观察这两种本实验项目中新接触的实验技术,形成“形态-分子”双维度验证体系。该体系既是对前期染色、显微观察方法的复用巩固,又引导学生快速掌握新实验技术及系统的结果分析逻辑。结合后期结果总结汇报与评价环节,学生可在实操中深化对“形态与分子特征协同佐证”的认知,逐步提升结果解读、科学分析及规范汇报能力,呼应实验目的核心要求。

其五,凸显团队协作与评价导向,锤炼综合科研素养。实验全程以4人小组为单位推进,从方案共同设计、分工完成实操,到联合总结汇报、参与组间评价,高效锻炼学生的团队协作与沟通能力。同时,“老师优化方案、师生与组间评价结果”的环节,既帮助学生修正实验漏洞,又培养严谨的科研思维与批判性思维,实现“技术应用、团队协作、规范汇报”多维度能力的协同提升,落实实验目的中综合素质培养的诉求。

## 4.2 教学效果

本实验项目已在本校连续开设3年,每年学生

均能顺利完成实验任务。为系统评价教学效果,我们对415名授课学生开展“细胞生物学实验课教学效果评价”问卷调查,结果如下。

在动手能力提升方面,探究性实验8“C2C12细胞的定向分化与鉴定”的选择比例最高,达49.5%,显著高于其他验证性实验;验证性实验中,实验6“体外培养细胞的复苏与培养”(43%)和实验7“体外培养细胞的传代与冻存”(42%)分列第二、三位,而实验1“细胞显微结构观察”选择比例最低,仅为21%,表明涉及复杂操作的探究性实验更受学生认可(图5A)。

在实验设计能力培养方面,探究性实验8的选择比例高达59.5%,明显优于其他验证性实验,凸显了探究性实验在培养学生实验设计能力中的突出作用(图5B)。

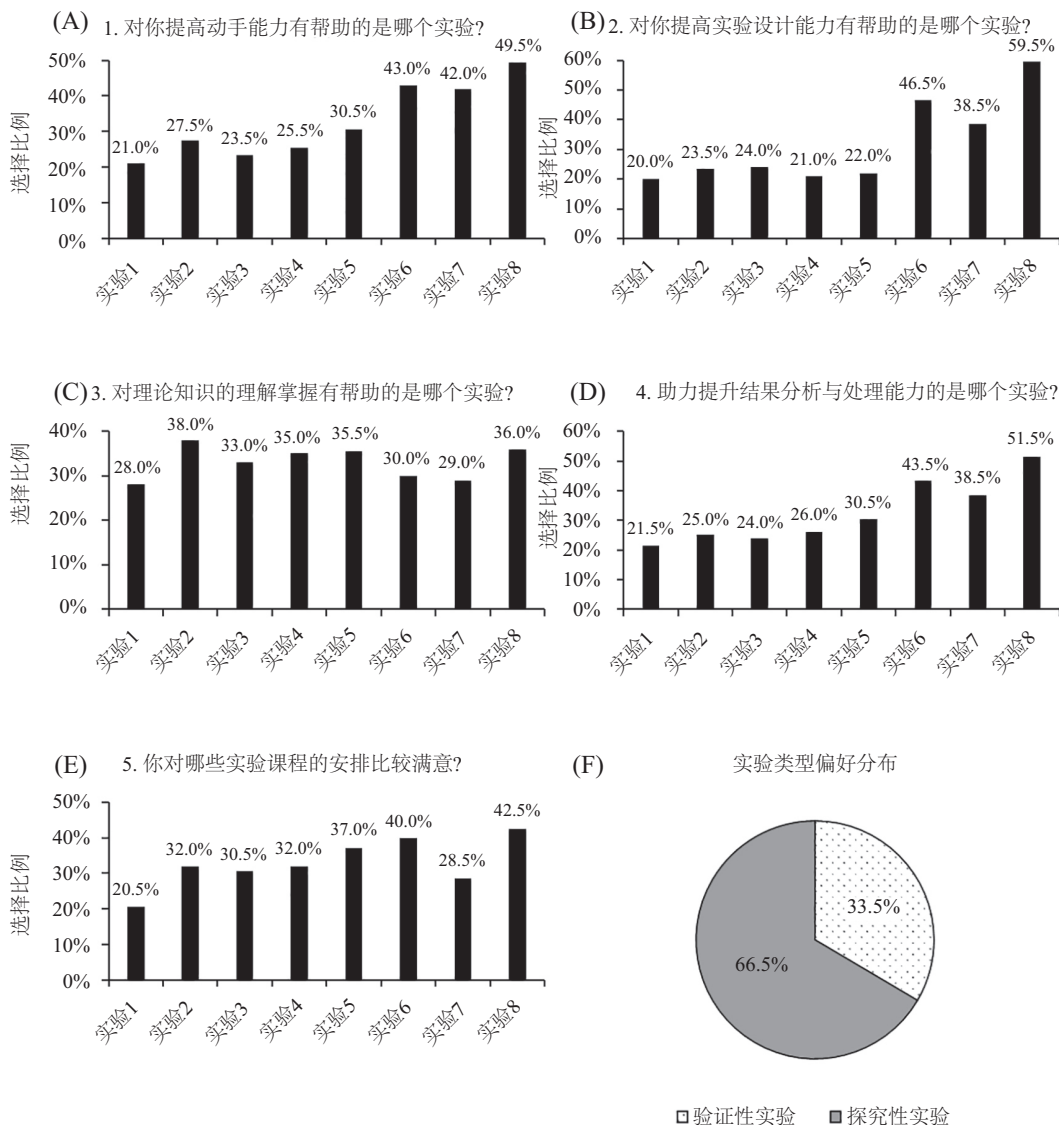
在理论知识理解掌握方面,验证性实验2“叶绿体的分离纯化与观察”选择比例最高(38%),探究性实验8(36%)、验证性实验5“小鼠腹腔巨噬细胞吞噬功能检测”(35.5%)、实验4“动物细胞减数分裂的观察”(35%)紧随其后,实验1选择比例最低(28%)(图5C)。

在结果分析与处理能力提升方面,探究性实验8选择比例最高(51.5%),显著高于验证性实验中比例最高的实验6(43.5%),两者相差8个百分点,说明探究性实验在培养学生分析处理实验结果能力上优势明显(图5D)。

在实验课程满意度方面,实验8满意度最高(42.5%);验证性实验中,实验6(40%)和实验7(28.5%)满意度相对突出,整体可见细胞培养相关验证性实验的满意度在同类实验中处于较高水平(图5E)。

在实验类型偏好上,学生选择探究性实验的比例(66.5%)显著高于验证性实验(33.5%),表明学生整体更倾向于具有探究性的实验类型(图5F)。

从以上调研结果可看出,探究性实验8“C2C12细胞的定向分化与鉴定”对培养学生多方面核心能力均具有重要作用:在动手能力提升上,该实验的选择比例位居各类实验首位,其能有效锻炼学生的复杂操作能力;在实验设计能力培养上,该实验的认可度远超其他验证性实验,其可充分激发学生的探究思维与设计能力;在结果分析与处理能力提升上,该实验的优势显著,其能有效强化学生对实验数据的分析、归纳与处理能力;同时,该实验在帮助学生理解掌握理论知识方面也表现突出,获得了较高的学



A~E: 不同实验项目对学生动手能力、实验设计能力、理论知识理解掌握、结果分析与处理能力的提升帮助度, 以及学生对各实验课程安排的满意度调查; F: 学生对实验类型的偏好分布。

A-E: survey on the improvement of students' hands-on ability, experimental design ability, theoretical knowledge understanding and mastery, and result analysis and processing ability by different experimental projects, as well as students' satisfaction with the arrangement of each experimental course; F: distribution of students' preference for experimental types.

图5 教学效果

Fig.5 Teaching effectiveness

生认可度。综上, 实验8的设计贴合学生能力培养需求, 能全面覆盖实验教学的核心目标, 充分说明我们设计的探究性实验8是合理且科学的。

4.3 实验教学的可行性和可调整性

本实验为涵盖五部分内容的综合性大实验, 采用每周1次实验课的教学模式, 整体教学周期为3周, 各环节可实现科学统筹、分段实施: 第一部分实验设计方案汇报与第二部分细胞复苏与培养可安排在第1周开展; 第三部分细胞分化处理与第四部分分化

前后细胞观察可在第2周进行; 第五部分实验总结与报告撰写则置于第3周完成。在高校能够集中开课的教学条件下, 学生可在3周内按进度完成全部实验内容, 且能及时与授课教师针对实验结果展开深度分析与探讨。若受客观因素限制无法开展集中授课, 实验教学亦可灵活调整, 依托每日开放的学生自主实验空间, 学生可根据个人时间灵活安排细胞传代培养等持续性操作, 待时间允许时再完成细胞分化处理等后续实验环节, 保障实验的完整性与连续性。

此外,本实验的教学实施具备扎实的基础与清晰的流程:相关实验方法均在前期验证性独立实验中完成教学铺垫,学生可通过组内讨论、任务分工的方式完成完整实验方案的制定;在方案汇报环节,教师针对各组方案进行针对性指导与完善后,学生再开展实验操作,教师全程从旁指导,确保实验操作的规范性与实验推进的有效性。本实验项目已在本校连续开设3年,每年参与学生均能顺利完成全部实验任务,充分印证了本实验教学设计的可行性。

#### 4.4 本实验的推广与应用

本实验采用C2C12成肌细胞系作为实验模型,该细胞系体外培养条件简便,可在短时间内获得足量实验材料,为其在本科实验教学中的普及应用提供了极大便利。实验所运用的技术手段涵盖细胞复苏、传代培养、诱导分化、免疫荧光染色法、吉姆萨染色法,以及倒置相差显微镜与激光共聚焦显微镜观察等,这些技术均为当前生命科学领域广泛应用的核心技术,绝大多数高校的生命科学实验平台均具备开展相关检测的条件,因此本实验在技术层面具备广泛推广的可行性与前景。

在实验实施过程中,学生需自主查阅相关文献、设计并提交实验方案,与教师共同探讨方案的科学性与可行性,完成实验试剂、材料的筹备工作,全程参与实验操作并进行汇报总结。这一系列完整流程,能够全面锻炼学生的科研思维、创新能力与主动探究意识,有效提升学生的学习兴趣。基于此,本文所介绍的细胞分化模型不仅适用于基础细胞生物学实验教学,具备良好的推广价值,还可作为高年级本科生综合性实验项目的核心材料进一步推广应用。此外,本实验的结果可直接延伸应用于同一学期后期由本人承担的分子生物学实验课程,作为探究性实验的基础素材,用于探究MyoD与MyoG基因及蛋白的表达差异。后续可借助荧光定量PCR、蛋白印迹(Western blot)等技术开展深入研究,此举不仅能充分利用实验材料、提高资源利用率,还可实现细胞生物学实验与分子生物学实验的有机衔接,构建更为完整的实践教学体系,保障跨课程实验教学的连贯性与系统性。

将C2C12细胞诱导分化与细胞学综合检测技术应用用于本科细胞生物学实验,能够有效串联以往分散的各类实验技能,构建起兼具科学性与实践性的科研化实践模式。该实验不仅能够帮助本科生扎实巩固细胞

生物学核心理论知识与实验操作技能,更能显著提升其科研思维与综合探究能力,既为高素质生物学专业本科生的培养提供了切实可行的实践方案,也为高校细胞生物学实验的改革与优化提供了重要参考依据。

#### 参考文献 (References)

- [1] 丁明孝,王喜忠,张传茂,等.细胞生物学,5版[M].北京:高等教育出版社,2020.
- [2] 赵颖岚,贾方兴,宋亚坤,等.细胞分化模型在细胞生物学实验教学中的应用与实践[J].中国细胞生物学学报(ZHAO Y L, JIA F X, SONY Y K, et al., The application and practice of cell differentiation model in cell biology experiment teaching [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2020, 42(2): 319-27.
- [3] 阎臻,杨军,彭锐,等.细胞生物学课程实验创新模式与实践探索:以“细胞骨架的标记与观察综合实验的设计”为例[J].中国细胞生物学学报(YAN Z, YANG J, PENG R, et al. Exploration on innovative mode and practice of cell biology experiments: taking the design of a comprehensive experiment on labelling and observation of the cytoskeleton as an example [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2023, 45(10): 1511-7.
- [4] 马云瀚,蒋璐,李月英,等.细胞生物学实验基于细胞凋亡检测的教学设计[J].基础医学教育(MA Y H, JIANG L, LI Y Y, et al. Instructional design for cell biology experiment based on apoptosis detection [J]. Basic Medical Education), 2025, 27(6): 528-32.
- [5] 可月双,巴雪青,曾宪录.细胞生物学实验教学改革实践探索:小鼠腹腔巨噬细胞的提取及NF- $\kappa$ B信号通路活化水平检测[J].中国细胞生物学学报(KE S Y, BA X Q, ZENG X L. The exploring reform of cell biology experiment teaching: extraction of murine peritoneal macrophages and detection of NF- $\kappa$ B signaling pathway activation [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2024, 46(6): 1235-44.
- [6] YAFFE D, SAXEL O. Serial passaging and differentiation of myogenic cells isolated from dystrophic mouse muscle [J]. Nature, 1977, 270(5639): 725-7.
- [7] MEN X, HAN X G, LA I J, et al. Ameliorative effects of fermented red ginseng extract on muscle atrophy in dexamethasone-induced C2C12 cell and hind limb-immobilized C57BL/6J mice [J]. J Med Food, 2024, 27(10): 951-60.
- [8] HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ J M, GARCÍA-GONZÁLEZ E G, BRUN C E, et al. The myogenic regulatory factors, determinants of muscle development, cell identity and regeneration [J]. Sem Cell Dev Biol, 2017, 72: 10-8.
- [9] ELKALAF M, ANDĚL M, TRNKA J. Low glucose but not galactose enhances oxidative mitochondrial metabolism in C2C12 myoblasts and myotubes [J]. PLoS One, 2013, 8(8): e70772.
- [10] SIAN V, JONSON P H, VAINIO A, et al. Optimizing 2D *in vitro* differentiation conditions for C2C12 murine myoblasts on gelatin hydrogel [J]. J Muscle Res Cell Motil, 2025, 46(4): 389-405.
- [11] 乌应嘎,美荣,阿娜尔,等.基于转录组测序筛选C2C12细胞诱导分化肌肉细胞的关键基因[J].中国畜牧兽医(Wuyingga, Meirong, Anaer, et al. Screening of key genes for inducing differentiation of C2C12 cells into myocytes based on RNA-Seq [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine), 2026, 53(3): 1237-49.