·临床教学·

智能体赋能模拟导尿在临床实习教学中的应用

汪成合[1]　何威[1]　顾倩[2]　李璎霖[3]　黄海[1]　方晨[1]　徐丹枫[1]

[1]上海交通大学医学院附属瑞金医院泌尿外科，上海 200025；[2]上海交通大学医学院附属瑞金医院医学教育处，上海 200025；[3]北京世纪超星信息技术发展有限责任公司，北京 100080

通信作者：顾倩，Email：gq30423@rjh.com.cn

【摘要】 目的 探讨智能体赋能的模拟导尿在临床医学专业本科实习实践教学中的应用效果。**方法** 采用试验对照方法，选取2024年7月至2025年6月在上海交通大学瑞金临床医学院泌尿外科实习的临床医学专业80名学生作为研究对象，试验组采用集中模拟导尿培训授课+智能体模拟导尿助教的教学方法，对照组采用传统教学方法（集中模拟导尿培训授课+课下自学）。培训后进行考核评分。并通过问卷调查了解学生对教学效果的主观反馈。采用独立样本 t 检验、Mann-Whitney U 检验等方法分析数据。**结果** 试验组学生模拟导尿技能总得分为92.35±3.57，高于对照组的87.33±4.23，差异有统计学意义（P<0.01）。其中素质要求得分，2组差异无统计学意义。在导尿相关知识考核方面，试验组学生的总得分为20（20，20）分，高于对照组的19（18，19）分，差异有统计学意义（P<0.01）。试验组学生的主观教学满意度[5（4，5）分]高于对照组[3（3，4）分]，差异具有统计学意义（P<0.01）。**结论** 集中模拟导尿培训结合智能体模拟导尿助教的教学方法能显著提高临床医学本科实习生的实践能力和理论知识的考核成绩，该方式有利于激发学生的主动性和积极性，值得推广。

【关键词】 人工智能；　导尿；　模拟教学；　临床医学；　实习

【中图分类号】 R4

基金项目：上海交通大学医学院临床技能国家级实验教学示范中心课题（沪交医教〔2024〕16号）

DOI：10.3760/cma.j.cn116021-20251010-02248

Application of agent-enabled simulation catheterization in clinical internship practice teaching

Wang Chenghe[1], He Wei[1], Gu Qian[2], Li Yinglin[3], Huang Hai[1], Fang Chen[1], Xu Danfeng[1]

[1]Department of Urology, Ruijin Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200025, China; [2]Department of Medical Education, Ruijin Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200025, China; [3]Beijing Century Superstar Information Technology Development Co., Ltd., Beijing 100080, China

Corresponding author: Gu Qian, Email: gq30423@rjh.com.cn

【Abstract】 Objective To explore the application effectiveness of agent-enabled simulation catheterization in the practice teaching of clinical medicine undergraduate internships. **Methods** Using a controlled experimental design, 80 clinical medicine students who interned in the Department of Urology at Ruijin Clinical Medical College, Shanghai Jiao Tong University from July 2024 to June 2025 were selected as the research subjects. The experimental group received a teaching method combining centralized simulation catheterization training with an agent-enabled simulation catheterization teaching assistant, while the control group received traditional centralized simulation catheterization training followed by self-learning after class. Assessments were conducted after the training. The subjective feedback of students on the teaching

effectiveness was collected through a questionnaire survey. Data were analyzed using independent samples *t*-tests and Mann-Whitney *U* tests. **Results** The total simulation catheterization skill score of the experimental group was significantly higher than that of the control group (92.35 ± 3.57 vs. 87.33 ± 4.23, *P*< 0.01). There was no significant difference in quality requirements score between the two groups. In the assessment of catheterization-related knowledge, the total score of the experimental group was significantly higher than that of the control group [20 (20, 20) vs. 19 (18, 19), *P*<0.01]. The subjective teaching satisfaction score of the experimental group was significantly higher than that of the control group [5 (4, 5) vs. 3 (3, 4), *P*< 0.01]. **Conclusions** The combination of centralized simulation catheterization training and an agent-enabled simulation catheterization teaching assistant significantly improved the practical skills and theoretical knowledge assessment scores of clinical medicine undergraduate interns. This method stimulated student initiative and engagement, and is worthy of promotion.

【**Key words**】 Artificial intelligence; Catheterization; Simulation teaching; Clinical medicine; Internship

Fund program: Shanghai Jiao Tong University School of Medicine National Experimental Teaching Center for Clinical Skills Project (SJTUMED [2024] 16)

DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20251010-02248

导尿术是临床医学专业学生必须熟练掌握的基础操作技能之一，其操作的规范性与安全性直接影响患者的诊疗体验和医疗质量[1]。然而，导尿操作步骤较为复杂，看似简单，实际上难度较大。传统导尿技能教学多依赖教师示范和学生机械练习，存在教学资源有限、反馈不及时、个性化指导不足等问题，导致部分学生学习效率低、操作规范性欠缺，技能考核结果不佳[2]。近年来，人工智能（artificial intelligence，AI）技术在医学教育中的应用为临床技能培训等实践教学提供了新的解决方案，通过虚拟训练、智能评估和实时反馈等功能，有望弥补传统教学方式的不足[3-4]。

目前，国内外已有研究探索AI辅助临床技能教学的应用效果，例如AI辅助系统在临床医师疾病决策和操作能力提升中的应用[5-6]，但针对导尿术这一基础操作的AI辅助教学研究仍较为缺乏。本研究基于教学团队与超星平台联合开发的智能体模拟导尿助教系统，通过构建结构化的导尿临床知识库，可实现智能引导与实时交互，支持学生的自主探索式学习。该系统核心功能模块包括“知识学习”“虚拟训练”和“课后复习”，覆盖课前预习、课中模拟训练、课后巩固等不同阶段，通过问答互动、情境模拟、个性化反馈等方式赋能传统集中模拟导尿培训。本研究旨在探讨智能体在模拟导尿技能教学中的应用价值，为优化临床实践教学方法提供循证依据。

1　对象与方法

1.1　研究对象

将2024年7月至2025年6月在上海交通大学瑞金临床医学院泌尿外科实习的80名临床医学专业学生作为研究对象，所有学生对本研究内容均已知情同意，且所有入组学生均无导尿模拟训练及实际操作经历。

1.2　研究方法

本研究试验组采用集中模拟导尿培训授课+智能体模拟导尿助教的教学方法，对照组采用传统教学方法（集中模拟导尿培训授课+课下自学）。采用随机对照研究设计，以培训后模拟导尿技能总分为主要观察指标并计算样本量。对照组总分根据以往传统教学评估结果取值为85分，估计试验组在辅以智能体助教后技能总分预计可增加10分，取值为95分，同时根据标准差可取均数值的1/10~1/5，故标准差取15，检验水准为0.05，检验效能为80%，2组比较为1∶1，采用PASS11软件计算，并考虑10%的脱落率，共需要纳入80人，其中试验组和对照组各40人。采用随机数字表法将学生进行分组。本研究符合《赫尔辛基宣言》中的医学研究伦理原则。对于终结性考核后未达到教学目标的学生，进行补偿教学。

1.3　教学实施

本研究的2组学生的学制、既往课程安排、实习时段、教材等均相同。授课教师均具有主治医师专业技术职称，且具有3年以上教学经验，并经导尿教学专项培训合格后才能参加教学工作。

1.3.1　试验组教学实施

试验组采用集中模拟导尿培训授课+智能体模拟导尿助教的教学方式。①教学目标设置。教学前设置明确的教学目标：熟悉导尿的适应证和禁忌证，学会操作前医患沟通；利用导尿模拟训练器，熟练完成导尿操作过程。②理论学习：学习《医师考核培训规范教程》（泌尿外科分册）关于导尿的操作步骤和注意事项[7]，观看模拟导尿视频，教师对照操作步骤，逐项解释。学习时长为1学时。③技能培训：指导教师演示导尿前医患沟通，并利用模拟导尿训练器，采用Peyton四步法进行模拟导尿技能培训。培训时长为2学时。④智能体模拟导尿助教：教师要求学生登录超星平台导尿操作智能体界面，进行课下学习，建议每天学习30 min。学生须完成“知识学习”“虚拟训练（男）”和“课后复习”3个模块的内容，教师通过后台监控3项核心学习数据（学习时长、示教视频观看时长和互动答题次数）。对于平台自动标识出的参与度持续偏低的学生，教师进行一对一的针对性提醒。

导尿操作智能体充分汲取《医师考核培训规范教程》（泌尿外科分册）中导尿部分的内容，构建AI知识库，并贯穿引导式教学的设计理念，实现全流程伴学。其学习流程分为课前知识学习、课中虚拟训练、课后知识复习3部分，学生可按需自由选择。在课前知识学习环节，智能体严格依据教学目标与教学内容，针对术前、术中、术后3个阶段，分别智能生成问答集，与学生互动交流，并根据每个学生的具体回答，给予个性化引导与启发，做到因材施教。在课中虚拟训练环节，智能体遵循预先设定的操作流程，在每一步操作中，严格按照教学重难点和操作注意事项设置问题，营造沉浸式的剧本闯关氛围。当学生理解出现偏差时，智能体会针对性地纠正并提出更深入的问题，直至学生完全掌握相关知识。在课后复习环节，智能体以教学团队预设的试题考查学生，并依据答案解析和引导要点，针对每个学生的具体回答，给予个性化讲解。

1.3.2　对照组教学实施

对照组采用传统教学方式。①理论学习：学习《医师考核培训规范教程》（泌尿外科分册）关于导尿的操作步骤和注意事项，并观看导尿模拟操作视频。教师对照操作步骤，逐项解释。学习时长为1学时。②技能培训：指导教师演示导尿前医患沟通，并利用模拟导尿训练器，采用Peyton四步法进行模拟导尿技能培训。培训时长为2学时。③课下自学：学生利用零散时间学习理论知识，并借助复习题及其答案解析进行巩固，建议每天学习30 min。学生每天须提交学习日志，包括学习时间、学习内容和学习成果。

1.4　教学效果评估

1.4.1　导尿技能操作评价

教学1周后进行评价。研究团队根据《临床技能基本操作（评分标准）》中男性导尿（一次性、留置）评分标准进行考核打分[8]，主要评价素质要求（服装、口罩、帽子整洁），操作前准备（包括医生、物品和环境、医患沟通），操作过程（包括初步消毒、开导尿包再次消毒和插导尿管），操作后（包括协助患者整理衣物、询问感受和清理用物等）和评价（动作熟练程度、无菌原则和团队配合等）。2组学生在培训1周后进行测试。考核方法为在指导教师不作提示的情况下，完成导尿前医患沟通（由考核教师担任标准化患者），并采用模拟导尿训练器（男性）完成技能操作考核。技能评价由本科室3名主治医师进行打分，取平均值为操作得分，满分为100分（注：考核时评价医师并不知晓被测试学生具体组别）。考核时间为8 min。

1.4.2　导尿相关知识点考核

依据《医师考核培训规范教程》（泌尿外科分册）自编试题，组卷时选取导尿适应证、禁忌证和注意事项相关知识的试题10道，以及操作方法与程序相关试题10道，每题1分。在2组培训前后，分别进行闭卷理论测试，考核时间为15 min。

1.4.3　学习效果主观评分和满意度调查

考核结束后，采用匿名问卷调查法，收集2组学生对教学方式的学习效果、满意度以及课下学习时间的相关反馈。学习效果评分涵盖提高学习兴趣、

提高学习效率、增强主动参与度、增强团队协作能力和总体评价几个方面，评分从“非常不同意”到“非常同意”分为5个等级。满意度评价从“非常不满意”到“非常满意”也分为5个等级，分别赋值1~5分，得分越高，表明教学满意度越高。

1.5　统计学方法

采用SPSS 25.0软件对数据进行统计分析。符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差表示，组间比较采用独立样本 t 检验，组内培训前后比较采用配对 t 检验。不符合正态分布的计量资料以中位数和四分位数表示，采用Mann-Whitney U 检验比较。相关性检验采用Pearson相关性分析。检验水准 α=0.05。

2　结果

2.1　2组学生的模拟导尿操作能力得分比较

培训前，2组学生的模拟导尿操作能力差异无统计学意义（表1）。2组学生经过模拟导尿培训和课下学习[试验组和对照组学生课下复习时间为(200.50 ± 22.18)和(205.50 ± 21.24) min，t=−1.03，P>0.05]后进行技能考核。结果显示，试验组学生在操作前准备、操作过程、操作后、评价，以及总得分方面均优于对照组，差异有显著统计学意义（P<0.01），2组组内培训后均高于培训前，差异均有统计学意义（均P<0.01）（表1）。其中，2组学生在培训前素质要求得分为3(3, 3)分和3(3, 3)分（Z=−0.90，P>0.05），在培训后2组学生在素质要求方面均为满分3分，差异无统计学意义（P>0.05）。

后台学习数据还显示，试验组学生利用导尿操作智能体观看示教视频时长为(12.75 ± 3.70) min，互动回答问题次数为(51.95 ± 7.28)次。并且学习时长、示教视频观看时长和互动回答问题次数与模拟导尿操作总得分呈正相关（Pearson相关系数分别为0.80、0.85和0.64，均P<0.05）。

2.2　2组学生导尿相关知识点考核比较

2组学生在培训前，进行导尿相关知识点考核，不论是总得分还是基本知识和操作流程等各亚项得分，差异均无统计学意义（P>0.05）。在接受培训和课下自学后，试验组学生在总得分及2亚项得分均高于对照组，差异有统计学意义（P<0.05），2组组内培训后均高于培训前，差异均有统计学意义（均P<0.01）（表2）。

2.3　2组学生学习能力的主观评价和满意度比较

调查结果显示试验组学生普遍认为集中模拟导尿培训授课+智能体模拟导尿助教的教学方式在提高学习兴趣、提高学习效率、增加主动参与、增加团队协作等多方面，以及综合评价均优于传统教学方式（均P<0.01）（表3）。此外，试验组学生主观教学满意度[5(4, 5)分]高于对照组[3(3, 4)分]，其差异具有统计学意义（Z=−7.30，P<0.001）。

表1　2组学生模拟导尿操作技能比较（n=40，分，$\bar{x} \pm s$）

组别	操作前准备		操作过程		操作后		评价		总分	
	培训前	培训后	培训前	培训后	培训前	培训后	培训前	培训后	培训前	培训后
试验组	9.78 ± 1.71	15.81 ± 0.79[a]	39.99 ± 3.68	57.68 ± 2.90[a]	4.30 ± 0.84	7.08 ± 0.51[a]	6.09 ± 0.94	8.78 ± 0.74[a]	63.01 ± 4.03	92.35 ± 3.57[a]
对照组	9.97 ± 1.81	15.36 ± 0.88[a]	40.18 ± 3.45	55.14 ± 3.32[a]	4.45 ± 0.78	6.26 ± 0.82[a]	5.98 ± 0.83	7.75 ± 0.92[a]	63.51 ± 3.79	87.33 ± 4.23[a]
t值	−0.49	2.02	−0.38	3.65	−0.82	5.39	0.59	5.51	0.57	5.74
P值	0.629	0.002	0.708	<0.001	0.414	<0.001	0.560	<0.001	0.570	<0.001

注：a为组内培训后与培训前比较，均P<0.01。

表2　2组学生培训前后导尿相关知识点考核比较[n=40，分，$M(Q_1, Q_3)$]

组别	基本知识		操作流程		总分	
	培训前	培训后	培训前	培训后	培训前	培训后
试验组	6(6,7)	10(10,10)[a]	6(6,7)	10(10,10)[a]	12(12,13)	20(20,20)[a]
对照组	6(6,7)	9(9,10)[a]	6(6,7)	10(9,10)[a]	12(12,13)	19(18,19)[a]
Z值	−0.48	−4.32	−0.52	−3.93	−0.52	−5.57
P值	0.631	<0.001	0.603	<0.001	0.601	<0.001

注：a为组内培训后与培训前比较，均P<0.01。

表3　2组学生学习效果的主观评分比较[n=40,分,$M(Q_1,Q_3)$]

组别	提高学习兴趣	提高学习效率	增加主动参与	增加团队协作	总体评价
试验组	5(5,5)	5(4,5)	5(5,5)	4(4,5)	5(5,5)
对照组	4(3.25,4)	3(3,4)	3(3,3)	3(2.25,4)	4(4,4)
Z值	−8.32	−5.81	−8.17	−4.63	−5.00
P值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

3　讨论

3.1　智能体赋能模拟导尿有助于提升学生的操作能力

本研究结果表明,试验组学生在模拟导尿考核的各亚项(除素质要求外)及总体评分上均显著优于对照组,这表明传统的集中模拟导尿培训后辅以智能体助教的教学模式,能有效提升学生的医患沟通与操作能力,并且未增加其学习负担。分析其原因,首先,该导尿操作智能体的设计吸收了建构主义的引导式学习理念。通过虚拟场景下的互动问答与操作引导,智能体扮演“智能学伴”角色,帮助学生在主动探索中逐步构建导尿操作的完整认知框架。这种情境化、低压力的互动模式,不仅促进了导尿相关知识的意义建构,也通过即时反馈为学生搭建了动态认知支架,使学习路径更符合每个学生的学习节奏[9]。其次,导尿智能体提供的全天候、泛在化学习支持,使学生能够利用碎片时间进行灵活、重复的练习,显著增加了操作训练的可及性与频次[10]。再次,导尿操作智能体对学习动机与认知过程的优化是其成效的关键[11]。它通过个性化互动增强了学习自主性,同时借助结构化视频与即时反馈,有效管理了内在认知负荷,并减少了外在负荷,使学生认知资源更集中于导尿知识整合与技能迁移[12]。此外,后台数据显示试验组学生的学习时长、视频观看时长与互动答题次数均与操作总得分显著正相关,表明学习投入度与学习效果密切相关,这进一步印证了主动学习与及时反馈在技能掌握中的核心作用。

2组学生在“素质要求”这一基础维度上无差异,可能因该维度本身认知要求较低,易于达到技能习得的“天花板效应”,也从侧面反映了AI助教在复杂技能层面的教学优势。因此,导尿智能体并非只是技术工具,更是一种融合建构主义互动设计、认知负荷优化策略及泛在学习理念的教学干预,其核心机制在于通过技术支持下的情境化互动、负荷精细化管理和学习路径个性化,推动临床技能从知识理解向实践能力深层转化。

3.2　智能体赋能模拟导尿有助于提高学生的导尿相关理论知识

本研究在导尿相关理论知识考核中发现,试验组得分显著高于对照组,表明智能体赋能的教学模式有效促进了学生对理论知识的掌握。在传统的模拟导尿培训中,教学重点往往集中于教师对操作步骤的演示与讲解,而与之相关的基础理论及延伸性知识,则多依赖学生在课后通过自学完成。本研究开发的导尿操作智能体设有“知识学习”模块,涵盖导尿相关的基础与程序性知识,并通过引导式提问,促进学生主动联想与思考,逐步构建知识体系。智能体能根据学生的实时回答,自适应地生成不同难度的诱导性问题,并提供即时反馈与纠错,实现个性化教学,有助于学生在差异化起点上达成同质的教学目标[13]。此外,试验组学生表现出更高的学习积极性,说明智能体赋能的教学模式能有效激发学生对导尿技能的学习兴趣。

问卷调查结果显示,试验组学生在学习兴趣、效率、主动参与度、团队协作及总体评价等方面的主观评分均显著高于对照组,教学满意度也明显提升。这表明智能体赋能的教学模式不仅能有效激发学习动机,也获得了学生的高度认可。这一结果反映了学生在临床实践中对导尿技能学习的强烈需求。由于患者常因实习生经验不足而拒绝其操作,加之实习时间有限,实践机会稀缺[14],智能体提供了一种可反复进行、无风险、自主可控的替代性学习途径,从而缓解了临床教学资源与学习需求之间的矛盾。

4　结语

本研究发现，在临床医学本科生模拟导尿教学中，采用集中培训与智能体助教相结合的教学模式，能显著提升学生的操作技能考核成绩、理论知识掌握水平及学习满意度，实现了教学效果的全面优化。这一“师—生—机”三元协同的教学方式，既严格遵循教学目标，又为教师减负，同时为学生提供个性化学习支持。

然而，本研究也存在一定局限：其一，学习效果依赖学生对数字化学习方式的接受程度，技术适应能力差异可能影响部分学生的学习体验；其二，教学过程中以学生课后自主学习为主，其参与度与持续性仍缺乏有效监督机制；其三，智能体目前主要支持认知与流程训练，对操作技能的评估仍需依托线下模拟考核，尚未形成贯穿“理论—模拟—实践”的闭环评价体系。

未来研究团队将构建基于学习分析技术的参与度监测与适应性激励模型，促进学生持续投入；推动导尿操作智能体与模拟器、传感设备的深度融合，逐步实现操作技能的实时评估与反馈，最终形成覆盖医学技能培养全过程的智能化教学支持体系。

利益冲突　所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明　汪成合：研究实施、数据收集、论文撰写；何威：指导教师的师资培训、数据处理、统计分析；顾倩：研究设计、研究指导、论文构思、撰写论文；李璎霖：智能体设计与开发、数据收集；黄海：研究实施、数据收集；方晨：研究实施、数据收集；徐丹枫：行政支持

参考文献

[1] Aguilera-Manrique G, Gutiérrez-Puertas L, Gutiérrez-Puertas V, et al. Evaluation of urinary catheterization competency and self-efficacy in nursing students using the flipped classroom approach [J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(22): 15144. DOI: 10.3390/ijerph192215144.

[2] 陈新宇，熊永江，赵涛，等. 多种信息化技术结合师生点评教学模式在导尿术培训中的应用[J]. 中国继续医学教育，2025，17(10)：154-158. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9308.2025.10.032.

[3] Nagi F, Salih R, Alzubaidi M, et al. Applications of artificial intelligence (AI) in medical education: a scoping review [J]. Stud Health Technol Inform, 2023, 305: 648-651. DOI: 10.3233/SHTI230581.

[4] 武宗渊，刘振，张宗明. 人工智能在医学教育领域的现状、未来治理研究[J]. 中国医学伦理学，2024，37(9)：1093-1100. DOI: 10.12026/j.issn.1001-8565.2024.09.12.

[5] 胡燕飞，王艾，张亚平，等. 基于mT5大语言模型建立用于住院医师培训的胸部CT报告结论生成系统[J]. 中华医学教育探索杂志，2025，24(8)：1016-1021. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240710-02089.

[6] 韩丁培，王心怡，徐艳丽，等. 导航支气管镜技术与人工智能辅助在支气管镜基础技能培训中的实践与思考[J]. 中华医学教育探索杂志，2024，23(10)：1326-1330. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240318-01831.

[7] 孙颖浩. 医师考核培训规范教程. 泌尿外科分册[M]. 上海：上海科学技术出版社，2016：189-191.

[8] 黄钢. 临床技能基本操作评分标准[M]. 上海：上海教育音像出版社，2013: 73-75.

[9] Hasanein AM, Sobaih AEE. Drivers and consequences of ChatGPT use in higher education: key stakeholder perspectives [J]. Eur J Investig Health Psychol Educ, 2023, 13(11): 2599-2614. DOI: 10.3390/ejihpe13110181.

[10] 李伟军，包家鹏，熊炎. 基于“互联网+”的运动医学临床教学探究[J]. 中国继续医学教育，2023，15(22)：9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9308.2023.22.003.

[11] 王雪，乔玉飞，王崟羽，等. 教育智能体如何影响学习者情绪与学习效果?[J]. 现代教育技术，2022，32(8)：59-66. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8097.2022.08.007.

[12] Gkintoni E, Antonopoulou H, Sortwell A, et al. Challenging cognitive load theory: the role of educational neuroscience and artificial intelligence in redefining learning efficacy [J]. Brain Sci, 2025, 15(2): 203. DOI: 10.3390/brainsci15020203.

[13] Kochmar E, Vu DD, Belfer R, et al. Automated data-driven generation of personalized pedagogical interventions in intelligent tutoring systems [J]. Int J Artif Intell Educ, 2022, 32(2): 323-349. DOI: 10.1007/s40593-021-00267-x.

[14] 王晓晶，严嘉琪，黄静怡，等. 利用手机虚拟病例行教学查房在泌尿外科实习带教中的疗效评价[J]. 当代教育实践与教学研究(电子刊)，2021(6)：40-42. DOI: 10.12223/j.2095-6711.2021.06.017.

（收稿日期：2025-10-10）

（本文编辑：兰明娟）