

# 虚拟仿真技术在海洋科学实验教学中的应用

乔静<sup>1</sup>, 晏茂军<sup>1</sup>, 赵云<sup>1</sup>, 陈文强<sup>1</sup>, 鲍红艳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学海洋学院, 上海

<sup>2</sup>厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 海洋与地球学院, 福建 厦门

收稿日期: 2023年6月12日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月31日

## 摘要

海洋科学实验实践课程在海洋人才培养过程中发挥重要作用, 其在教学中存在的问题也十分突出。虚拟仿真技术作为一种新兴的教学手段, 不仅可以解决传统海洋实验教学中存在的问题, 还可以适应疫情等突发情况下实验实践课程的线上化。基于虚拟仿真在海洋科学实验教学中的必要性, 综述了国内涉海高校虚拟仿真平台的应用现状与特征, 对海洋科学领域虚拟仿真平台的不足与建设方向进行了总结与展望, 以期推动仿真技术在海洋科学领域的更为广泛的应用。

## 关键词

海洋科学, 实验实践课程, 虚拟仿真技术

# Application of Virtual Simulation Technology in Marine Science Experiment Teaching

Jing Qiao<sup>1</sup>, Maojun Yan<sup>1</sup>, Yun Zhao<sup>1</sup>, Wenqiang Chen<sup>1</sup>, Hongyan Bao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen Fujian

Received: Jun. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Jul. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Marine science experimental practice courses play an important role in the training of marine talents. However, there are prominent issues during teaching. Virtual simulation technology, as an emerging teaching tool, can not only solve the problems existing in traditional experimental

teaching, but also adapt to online experimental courses in emergency situations, such as epidemic situation. Based on the necessity of virtual simulation in marine science experimental teaching, the current situation and characteristics of virtual simulation teaching platforms in domestic sea-related universities are reviewed. Furthermore, the shortage and construction direction of virtual simulation technology in marine science are summarized and prospected to promote the more extensive application of simulation technology in marine science.

## Keywords

Marine Science, Experimental and Practical Course, Virtual Simulation Technology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

虚拟仿真实验教学模式是高等教育信息化环境下的必然产物[1]。从2013年开始,教育部就开始推动全国高校探索虚拟仿真实验教学资源建设。2017年教育部推出《教育部办公厅关于2017~2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知》[2],旨在提高学生实践能力,培养符合我国经济社会发展的创新型专业人才。2018年教育部又颁布了《关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知》,旨在进一步深化和拓展示范性虚拟仿真实验教学项目的建设工作。

海洋科学是一门以实践为基础的交叉学科,建设完善海洋实验实践课程是实现“厚基础、宽口径、实践性强、学科交叉”这一学科建设目标的重要途径。虚拟仿真实验是指利用虚拟仿真技术线上完成预定的实验项目。对于海洋科学来讲,虚拟仿真实验项目不仅是传统实验教学方式的补充和训练,更是一种独立的、新型的实验教学手段,它可以完成传统线下实验课不能完成的实验教学项目,也可以替代一些高危险、高成本的线下实验课。虚拟仿真实验项目深度融合了专业内容和信息技术,以“不断提高学生实践能力和创新精神”为核心,以信息技术为依托,创建了一个更好的智能化、个性化的实验教学新模式,其在教学的高阶性、创新性、挑战度方面都优于传统实验教学方式。目前虚拟仿真实验项目已经应用到国内高校的理、工、医、农等各个学科,在虚拟仿真实验技术的支撑下,这种新型的实验教学模式将大大提高人才培养水平,更好地满足海洋学科实验实践教学的需求。

## 2. 传统海洋科学实验教学

### 2.1. 传统海洋科学实验教学的内容与特点

海洋科学是典型的交叉学科,海洋科学的实验实践课程要求学生可以掌握有关海洋学的基本知识和技能,为学生毕业后从事海洋专业相关工作提供必要的实验方法、技术和操作的必要训练,养成科学与严谨的实验态度和作风。国内大部分涉海高校按照物理海洋、海洋生物、海洋化学和海洋地质四个专业方向培养,不同方向的海洋科学实验实践教学内容分层次地在不同年级学生中展开,主要教学内容包括:

(1) 物理海洋方向:主要以流体力学、遥感、数值模拟和实地海洋水文气象调查实验课程为主。该方向实验特点是内容抽象,要以大量数学和程序语言为基础[3],同时涉及众多专业海洋仪器的操作,比如温盐深仪、多普勒流速剖面仪、多波束测量系统等观测、探测及采样类设备。

(2) 海洋生物方向:主要以海洋生物学、生态学、遗传学、细胞和微生物实验课程为主。该方向实验

特点是过程繁琐,实验成本高,部分试剂有安全隐患,且实验成功率较低。

(3) 海洋化学方向:主要以基础有机化学、基础分析化学和海洋化学实验课程为主。该方向实验特点是耗时长,涉及到众多大型仪器的原理理解和操作,实验过程中接触各类气体钢瓶和危险、管控化学品(包括各种酸和有机试剂)。

(4) 海洋地质方向:主要以岩矿晶体学、地质地貌构造、沉积动力学、古生物学和探测技术实验课程为主。该方向实验特点是概念性强,时空尺度跨越大,野外地质实习实践较多,海上地质实践平台搭建要求高。

## 2.2. 传统海洋科学实验实践课存在的问题

海洋科学实验实践课是海洋学科教学体系的重要组成部分,它除了会面临实验室安全隐患大、大型仪器设备繁多、实验周期长等传统生化实验课固有的问题外,还需直面一些海洋科学实践课特有的难题,例如出海成本高、出海危险性大、海洋平台难以搭建等问题。综合来说,传统的海洋科学类实验实践课均存在以下特点:

(1) 海上实践课程覆盖面不足,部分涉海院校由于师资力量、科考船等客观因素没有条件进行海上实践调查和学习。截止 2020 年,国内开设海洋科学本科的院校有 33 所,但是在硬件上,全国仅有 7 艘实习科考船和“东方红”、“嘉庚号”等高校自用综合科考船[4],仍有部分涉海专业的学生没有机会参加海上实践课程。即使有条件进行出海科考的高校,也面临出海成本高、危险性大、部分课程实践学时短、内容多的问题。出海实践不同于普通实验室操作和陆地野外实践,船时昂贵,实验环境恶劣,容易出现安全事故。很多同学要在克服身体不适的同时学习海上仪器的使用或者样品的采集,这就要求同学必须在上船前就已经对相关知识和实验流程有一个粗略的掌握,否则无法到达理论结合实践的教学效果,实践效率低下。

(2) 海洋环境复杂,很多实验平台难以搭建,例如深海、极地和冷泉热液等极端环境。目前开展极端环境实验有三种方法,搭载水下机器进行原位观察、样品采集后返回实验室进行实验、实验室使用低温高压设备还原深海或极地环境。然而原位观察成本过高、返回实验室后观察实验现象不显著、高压设备危险系数太大,以上三种方法均不适用于实验教学。

(3) 海洋生化实验室安全隐患大,各类实验动物、试剂、气瓶等实验用品复杂,学生安全意识不足,操作不当容易引起实验室安全事故;近些年来实验教学模式逐渐由老师主导的验证性实验不断向由学生主导的综合性、设计性实验转变,学生实验的自主性不断增强,同时自由度也更高,与此同时带来的实验室安全隐患也更大。

(4) 海洋实验课涉及到各类大型仪器设备,这类大型仪器设备理论内容抽象,仪器原理、各模块器件运转复杂,仅通过实验课听和看,无法真正掌握仪器操作技能,且由于仪器价格昂贵、设备数量不足、空间场地不够和实践学时有限等问题[5],无法满足学生和仪器一一配套、上手实操、从头学起的需求。

(5) 部分海洋科学实验周期太长,不适应于传统实验教学。尤其是生物、化学类实验,涉及到高温灼烧、器具清洗浸泡、有机物浸泡提取等耗时的前处理步骤或者是细胞培养和化学物质降解等不同类型的培养实验,由于后续等待时间过长,影响实验教学进度。

## 3. 虚拟仿真技术在海洋实验教学中的必要性

传统实验室建设的投入力度非常之大,只用于传统实验大型仪器的购置与维护成本就不容小觑,然而由于成本高、危险性大、内容抽象等各种问题,传统实验教学始终无法摆脱其固有限制,尤其对于海洋实验教学来讲,要完成在海洋环境中的实验教学,培养真正动手能力、创新能力、解决问题能力优质

的学生绝非易事。自 2018 年以来,虚拟仿真实验教学模式已慢慢开始融入国内各涉海高校的海洋实验教学中。尤其在过去的三年疫情形势下,教育部呼吁“停课不停学”,国内各大高校的实验实践课面临重大挑战,在这一背景下,实验教学模式的改革已经成为了一种趋势。

### 3.1. 虚拟仿真技术的定义与发展

虚拟仿真技术是指通过信息技术的手段,将真实世界进行模拟、再现,是一种用计算机合成的人工世界。虚拟仿真技术在高校中主要应用于虚拟仿真实验室,该实验室是指通过虚拟仿真技术进行实验室环境的模拟,使学生在该虚拟仿真环境中开展并完成预定实验项目[6]。国内虚拟仿真技术早期主要应用于计算机类课程,由于计算机硬件动作的不可见性、抽象性和工作过程的复杂性,急需一个交互性强的可视化实验平台以供学生更好理解计算机原理[7]。现如今,随着教学方式的不断创新和课程改革的不断深化,虚拟仿真技术已经广泛应用到了包括物理、化学、生物、地质、海洋、土木、自动化、解剖、机械、农业等多种类型专业的高校实验教学中[8]。

### 3.2. 虚拟仿真实验教学的实现方式

虚拟仿真实验系统的开发建立主要依赖三个素材库,分别是虚拟现实应用开发平台、数据采集和建模设施以及人机交互设备,目前海洋科学虚拟仿真实验主流的开发平台为 Unity3D 开发引擎,可结合多种插件形成沉浸式虚拟仿真实验教学[2] [9]。根据虚拟仿真实验系统的操作自由度和科学模型复杂度由低到高,海洋科学类虚拟仿真实验方式可分为以下四种类型[10]:

(1) 观摩演示型:该类型虚拟仿真实验操作者无法进行相关参数的更改与操控,主要用于复杂器件、抽象知识点及原理的展示,例如大型仪器设备内部结构拆解展示、分子原子层面的化学反应原理演示、微生物显微信息观察、晶体结构三维展示等虚拟仿真实验。

(2) 基础练习型:该类虚拟仿真实验操作者可以进行局部状态参数的更改,但实验只能按照预设方向、规定步骤进行,得出确定的实验结果,实验步骤跟预设步骤不匹配时实验无法继续进行,主要用于传统验证性实验。例如流体力学实验、基础化学实验、基础生物实验等一些传统线下实验和其他耗时长、成本高、危险性大的实验的提前训练。

(3) 综合设计型:该类虚拟仿真实验操作者可以灵活调整大部分参数,同时实验结果也会随参数改变而正确推演结果,结果主要通过系统预置数据查询得到[10],是已有知识、经验和问题的反映和展示,主要用于成体系的对比型或优化型综合实验和野外探索类实验。例如高层次化学和生物培养实验,大型仪器上机实验和海底探测、地质实习等虚拟仿真实验。

(4) 研究探索型:该类虚拟仿真实验操作者可以根据自己设计自由搭建实验对象,系统通过预置数据的计算或者迭代进行模型的自我优化[10],从而推演出正确实验结果,是灵活度、操作自由度、模型复杂度最高的一种虚拟仿真实验类型,可用于虚拟数值模拟、海洋污染模拟等复杂的探索型实验和大型仪器维护讲解。

### 3.3. 虚拟仿真技术在海洋实验教学中的优势

虚拟仿真技术以其特有的三维可视化特点在各个学科领域都展现了其强大的优势,在海洋科学实验教学中主要体现为:

(1) 沉浸交互。海洋科学虚拟仿真实验平台通过三维模型场景构建、知识点融入交互操作等游戏式特点创造一个逼真、动态的海洋实验环境,使学生沉浸如置身于真实海洋中完成整个实验流程。一方面节省了出海成本,降低了出海风险,给与部分没有条件设立海上实践课程高校的学生以出海体验;另一方

面一些极端环境、痕量、高难度实验平台也得以搭建,提高了学生实验兴趣,拓展了教学内容。

(2) 高效安全。鉴于传统实验教学学时少、内容多、教学效果不太理想的问题,虚拟仿真实验可以进行重复操作且练习时间灵活,起到预习作用,提高课堂效率,强化学生实验操作技能。对于一些实验周期长、实验现象不明显的实验过程,通过虚拟仿真实验平台可以跳过某些等待步骤,高效完成实验。同时虚拟仿真实验项目也可以通过模拟设置各种实验室事故场景,培养学生进行逃生技能训练,提高特情应急处置能力。

(3) 具象匹配。原理讲解是海洋实验教学中的难点,包括实验原理、仪器原理等。虚拟仿真实验项目通过仪器结构的内部展示,使抽象的、看不见的仪器部件具象化,学生可以加深对仪器原理的理解和操作的掌握。对于一些抽象的、难以理解的实验原理,例如分子、原子层面的变化,也可以通过动画展示加深学生理解。针对人数与仪器台数不匹配的问题,也可以通过虚拟仿真实验平台使得每个学生都能进行仪器操作,提高学生课堂参与度。

#### 4. 虚拟仿真技术在海洋科学实验教学中的应用现状

在当今信息化建设成效显著的环境中,实验实践教学模式变革势不可挡,尤其是在海洋科学这样一个实践性强、实践难度大、实践成本高的学科领域,虚拟仿真实验教学模式的应用日益受到重视。国内海洋科学虚拟仿真课程建设主要从2010年后开始,2017~2022年期间在教育部推进下快速发展。综合目前国内已有的海洋科学虚拟仿真实验平台,各个学校都基于学院专业设置发展出了极具自身特色的海洋科学虚拟仿真实验内容,但是各个平台侧重点和功能性有所不同。

中国海洋大学的虚拟仿真平台总体上以建立虚拟实习基地(包括野外地质实习基地和海上科考船实习基地),达到对野外勘探调查的探究式体验。依托海洋地球科学学院成立海洋地球科学国家级虚拟仿真实验教学中心,主要方向为海洋地质和海洋地球物理,搭建了包括海洋调查技术、地球科学野外实习和特色课程三个虚拟仿真实验平台,主要以海底探测、地质实习和结晶矿物等地质抽象课程为主,共15个教学模块。通过该虚拟仿真实验平台,学生可以足不出户进行各种野外实践[5],在减少实习带来的地质破坏的同时极大提高了学生的实践能力,同时也可以完成一些常规实验环境中无法完成的教学内容,包括海底构造等虚拟仿真实验项目[6]。

中山大学的虚拟仿真实验项目主要以数据库资源和基础实验为主,通过课前在虚拟仿真平台进行实验原理的学习和实验操作的练习,达到预习实验的目的。中山大学依托海洋科学学院,建立中山大学海洋科学实验教学示范中心,主要包括海洋生物、海洋地质、物理海洋和海洋化学四个虚拟仿真实验平台,海洋生物虚拟仿真实验平台主要以海洋生物实验和生物电子资源为主,海洋地质虚拟仿真实验平台主要以地震模拟和地质岩矿电子资源为主,物理海洋虚拟仿真实验平台主要以流体力学实验和数值模拟为主,海洋化学虚拟仿真实验平台主要以基础化学实验为主[1]。通过该虚拟仿真实验平台,学生可以实验课前进行不断的实验操作训练,达到减少实验试错成本和规范实验操作的预习目的,养成科学严谨的实验态度和作风,树立和培养实验室安全意识,同时充实丰富的电子资源打破了时间空间限制,抽象化的知识通过三维数字化建设具象化,使学生更好理解。

上海海洋大学和广东海洋大学的虚拟仿真课程主要建设方向均为物理海洋方向,建设重点为海洋水文气象调查与观测实习[11][12]。通过该虚拟仿真实验课程,学生可以在上船实践之前进行相关的仪器操作训练,从而对海洋水文要素相关的仪器操作有一个宏观的认识,可以在不断变化的海洋环境下熟练操作海洋仪器,加深对理论课程的理解,不仅可以节省船时及费用,而且可以提高学生动手实践能力,有利于扩展学生的就业[2]。除了物理海洋方向,上海海洋大学虚拟仿真综合管理平台还开发了部分解剖、组织胚胎学等部分海洋生物方向的虚拟仿真实验。广东海洋大学则依托航海技能训练中心侧重于生态灾

害虚拟仿真实验。通过这些虚拟仿真课程，学生可以体验这些操作要求高、平台难以搭建的实验项目。

除此之外，还有较多高校设立了海洋地质相关的虚拟仿真实验平台，其发展应用已经较为成熟。例如南京大学、中国地质大学和河海大学均开发了以海洋地质及地质资源勘探为主的虚拟仿真平台，包括海底地形地貌勘探、海底地质采样、地震勘测和油气资源相关[9] [13] [14] [15]。通过该虚拟仿真实验平台，学生极大地提高了对实验课的兴趣和热情，打破了传统地质教学中实验空间、大型设备的制约，了解了海洋环境与地质的基础研究方法，掌握了野外探测最前沿的技术手段，培养了丰富的空间想象能力。

除了成体系的海洋科学虚拟仿真实验实践教学系统，还有部分涉海高校依托课题组开发出海洋科学领域前沿热点问题相关的虚拟仿真课程，例如天津大学的多波束测量系统海上安装标校，同济大学的海底观测网组网观测、厦门大学的大洋痕量金属洁净分析等多个虚拟仿真实验课程。其他一些涉海高校包括大连海洋大学、江苏海洋大学和上海海事大学等也都在逐步搭建海洋相关的虚拟仿真实验教学课程，这些都将进一步加快建设“虚实结合”的海洋科学实验教学体系，夯实学生科学研究基础，提高学生科研创新能力。

## 5. 海洋科学领域虚拟仿真实验教学的建设建议

目前虚拟仿真实验课程建设还在快速发展和探索阶段，国内各涉海高校也基于其院系专业设置建立了有自身特色的海洋科学虚拟仿真实验教学平台，但虚拟仿真实验教学本身的局限性也值得注意，比如人机交互不够灵活、共享程度不足、技术难度高等。如何最大限度发挥其优势，完善“虚实结合”的实验实践教学体系，建立更加完善的虚拟仿真实验教学平台是我们未来海洋科学虚拟仿真实验教学的重点建设方向。

(1) 重视实验教学队伍，优化教师队伍结构。实验教师是高校实验教学课程的主力军，是实验教学队伍结构中非常重要的一部分，然而由于实验教师的岗位性质为教学辅助，很多实验教师的发展不受重视[8]。要充分发挥虚拟仿真实验在海洋科学实验教学中的作用，就要加大对实验教师的培训力度，鼓励实验教师多参加各类实验培训、交流和学习，提高实验教师的实验能力和整体水平，培养懂技术、懂教学的复合型实验教学队伍。

(2) 健全仿真平台共享机制，建立合理收费运行模式。目前国内最大的免费虚拟仿真实验平台有两个，分别是国家虚拟仿真实验教学项目共享服务平台(简称实验空间)和国家高等教育智慧教育平台(简称智慧高教)，其中实验空间含有海洋科学虚拟仿真实验项目 12 个，而智慧高教平台仅有 1 个，这远远不及各大高校自主建立的虚拟仿真实验教学平台的实验数目。各大高校平台的海洋科学虚拟仿真实验教学项目中还有很大一部分并未做到真正的开放共享，建立健全虚拟仿真实验教学项目的开放共享机制，增强校校联合、校企联合，实现虚拟仿真实验项目的利用最大化，探求合理收费的可持续性运行模式是接下来建设虚拟仿真实验平台的必经之路[2]。

(3) 立足国家战略目标，建设专业精品实验课程。随着国内海洋专业不断成熟，已经发展出了包括近海生态、渔业资源监测、多圈层相互作用、气候变化、极端环境生命等较多与国际热点相关的海洋科学研究方向。建议各涉海院校结合自身专业设置和特色，立足学院已有师资力量，摸索出一套有利于学院发展和符合海洋科学人才培养标准的实验教学模式，建立有明显专业特色的虚拟仿真实验平台。

(4) 定期更新实测数据，完善仿真实验平台。野外模拟仿真实验平台是通过某一具有典型特征、能满足学生实习需要的野外实习基地进行复现，在无法线下实习时进行仿真实验，或者起到线下实习前预习，以达到更好实践效果的目的。所以对于该类虚拟仿真实验的教学应该做到不断更新迭代，根据实际观测数据不断完善并优化现有的实验。

(5) 提升人机交互体验，增强自主创新能力。虚拟仿真实验教学与传统实验室教学相比，一大优势就

是不需要进行机械化、流程化的实验操作模式，给予学生更高的自由度。但是目前的虚拟仿真系统还未达到这一程度，将来虚拟仿真系统应该朝着配置更加灵活、操作更加便捷、载入更加迅速的方向发展，让学生可以自主配置并设计实验，增强学生创新能力。在常规实验中由于破坏性大、成本较高的实验操作以及大型仪器容易出现的各种故障现象，在虚拟仿真实验教学平台中应该着重体现，引导学生在仿真实验过程中遇到各类问题，培养其解决问题的能力[12]。

(6) 优化平衡实验配置，着重建设弱势项目。就目前国内高校的海洋科学虚拟仿真实验教学平台的搭建情况来看，海洋地质和物理海洋的实验教学项目发展较为成熟，且存在不同高校平台建设重复的情况。而海洋生物和海洋化学类虚拟仿真实验项目较少，例如海洋生化类实验涉及到的大型仪器设备，除部分与基础生化类专业一致的通用设备外，还有很大一部分海洋特色的专业设备。急需建立相关的海洋特色生化设备虚拟仿真实验教学项目，例如总碱度测定仪、总无机碳分析仪、总有机碳分析仪等，以完成与理论课的配合，弥补传统海洋生化实验课教学中学生无法完整完成仪器从开机到关机整个流程的不足。

(7) 激发学生实验创新设计，推动新兴科研成果。虚拟仿真实验教学平台是学生进行创新设计性实验的重要载体，未来虚拟仿真实验平台应该拓展现有的海洋科学实验教学内容，注重学生基础实验操作的同时，着重引导其关注海洋科学最前沿的、新兴的热点课题，鼓励学生通过此平台进行前沿课题的设计型实验，提高其创新能力。

## 6. 结论

虚拟仿真实验教学作为一种新型的实验教学手段，它不仅弥补传统实验教学方式的不足，更可以完成传统线下实验室无法完成的实验项目。针对极端环境实验项目、危险性大、周期长、数量不足、场地有限的大型仪器设备上机以及不具备硬件出海条件的实践课程，虚拟仿真实验教学可以代替传统海洋科学实验实践教学。而针对那些常规传统实验，虚拟仿真实验教学则是作为一种很好的辅助手段，例如通过虚拟仿真上机实验来进行练习，防止真正上机操作时损坏精密设备。但是在条件允许的情况下，传统的现场实验教学依然是必不可少的一个学习环节。因此我们也应该正视虚拟仿真实验教学的局限，未来在不断完善虚拟仿真实验教学模式的基础上，做到“虚实结合”、“资源共享”，更好地发挥虚拟仿真实验实践课程的优势，完善现有实验教学体系。

## 参考文献

- [1] 宁曦, 陈省平, 谢晓倩, 等. 虚拟仿真实验在海洋科学实验教学中的应用[J]. 教育现代化, 2018, 5(14): 166-169.
- [2] 王淑青, 雷桂斌, 杨婧灵. 虚拟仿真实验在海洋仪器使用与维护课堂教学中的应用[J]. 大学教育, 2020(2): 84-86.
- [3] 陈省平, 宁曦, 韩墨香, 等. 分层次、多学科海洋科学实验教学体系的实践与探索[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(12): 185-188.
- [4] 晏茂军, 钟貽森, 乔静, 等. 高校海上实践课程建设现状与建议[J]. 教育进展, 2022, 12(10): 4094-4101.
- [5] 黎晨晨, 刘宁, 吴春, 等. 虚拟仿真技术在仪器分析实验教学中的应用研究[J]. 实验室科学, 2019, 22(5): 235-237.
- [6] 林霖, 刘明, 韩宗珠, 等. 海洋地球科学虚拟仿真实验教学系统建设及应用[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 245-248+274.
- [7] 王建新, 张丽媛, 盛羽, 等. 基于组件的计算机组成原理虚拟实验室的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2469-2474.
- [8] 文锦琼, 肖世维, 青思含. 虚拟仿真技术在高校不同学科中的应用[J]. 实验室科学, 2020, 23(2): 79-82+87.
- [9] 张旭, 张鹏辉, 茹亚磊, 等. 海洋油气勘探虚拟仿真实验教学实验平台的设计与实践[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(5): 54-59+64.
- [10] 张敏, 文福安, 刘俊波. 高质量虚拟仿真实验教学课程内涵和特征[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(3): 1-4.

- [11] 魏永亮, 胡松, 张瑜, 等. 基于在线教学和虚拟仿真的实习课程实施经验探讨[J]. 科教导刊, 2021(5): 28-29+34.
- [12] 魏永亮, 胡松, 于潭, 等. 海洋水文气象调查与观测虚拟仿真建设及思考[J]. 教育教学论坛, 2020(37): 87-88.
- [13] 陈振杰, 李满春, 程亮, 等. 地球系统科学虚拟仿真实验研发[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(3): 133-138.
- [14] 芦俊, 杨春. 地震波传播虚拟仿真教学系统建设与成效[J]. 中国地质教育, 2021, 30(4): 112-117.
- [15] 王睿, 李琦, 姜正龙, 等. 海洋地质专业虚拟仿真实验教学平台建设[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 250-252.