· 公共卫生论坛 ·

公共卫生学与生物信息学复合型人才知识结构及培养模式

范向超，季啸宇，熊邹惠，孙啸，肖可

东南大学生物科学与医学工程学院，南京 211189
通信作者：肖可，E-mail：kexiao@seu.edu.cn

【摘　要】在“健康中国”战略的大背景下，公共卫生体系的构建是国家发展的重要举措之一。生物信息学的方法和技术是公共卫生体系的重要组成部分，公共卫生学与生物信息学交叉融合发展为保障民生和人民健康发挥重要的作用，也对高校人才培养提出了新要求。本文分析了所检索的中美 70 所高校公共卫生学与生物信息学本科复合型人才培养的模式，包括在公共卫生与预防医学专业引入生物信息学选修课程、在公共卫生学院独立开设生物信息学专业或辅修专业，以及创设结合公共卫生学与生物信息学核心知识体系的新型交叉学科专业，同时就加强我国公共卫生学与生物信息学本科复合型人才培养提出了思路和建议，包括探索和尝试双学位培养模式、构建学科交叉融合的课程体系、设立前沿技术课程，以及因地制宜发挥院校自身优势和特色，以更好地促进生物信息学融入公共卫生学教育，从而推动交叉领域的本科人才培养。
【关键词】公共卫生学；生物信息学；学科交叉；本科人才培养；专业建设

A combined public health and bioinformatics talent training model and knowledge structure

FAN Xiangchao, JI Xiaoyu, XIONG Zouhui, SUN Xiao, XIAO Ke (*School of Biological Science & Medical Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing*, 211189, *China*)
Corresponding author: XIAO Ke, E-mail: kexiao@seu.edu.cn

【**Abstract**】 Under the "Healthy China" initiative, the development of a robust public health system is a national priority. Bioinformatics methods and technologies are integral to this system, and the integration of public health and bioinformatics plays a crucial role in safeguarding public health and well-being, presenting new demands for university education. This study analyzed undergraduate interdisciplinary training models in public health and bioinformatics across 70 universities in China and the United States. These models include incorporating bioinformatics courses into public health and preventive medicine programs, establishing independent bioinformatics majors or minors within public health schools, and creating new interdisciplinary majors that combine the core knowledge of public health and bioinformatics. This analysis revealed several approaches to enhance interdisciplinary undergraduate training in public health and bioinformatics in China. The study proposes strategies and recommendations for strengthening undergraduate interdisciplinary talent cultivation in public health and bioinformatics in China, including exploring dual-degree programs, developing integrated curricula, offering cutting-edge technology courses, and leveraging the unique strengths and characteristics of different institutions to better integrate bioinformatics into public health education, thereby promoting undergraduate talent cultivation in this interdisciplinary field.
【**Keywords**】 public health; bioinformatics; interdisciplinary; undergraduate education; major development

公共卫生学专注于从群体角度研究人类健康与内外环境、社会活动等之间的关系，致力于通过社会努力有效地预防疾病、促进健康、延长寿命[1−2]。习近平总书记提出“只有构建起强大的公共卫生体系，健全预警响应机制，全面提升防控和救治能力，织密防护网、筑牢筑实隔离墙，才能切实为维护人民健康提供有力保障”[3]。对于公共卫生体系而言，生物信息学的方法和技术是重要的组成部分，它是一个融合了生物学、计算机科学和数学的新型交叉学科，其目标是利用计算机及信息技术收集、存储、分析和解释生物学数据，以解决生物学和医学问题，进而提升人类健康水平[4−5]。在公共卫生的防控和救治过程中，生物信息技术的应用能够基于大数据分析揭示疫情起源、追踪传播途径、解析流行动态、识别病原体[6]，从而辅助决策者制定更有效的预防策略[7]。此外，生物信息学方法也在现代生命科学研究中扮演着重要角色，成为深入研究疾病发生发展机制以及探索治疗机理的有效工具。在此背景下，国内外众多医学院校以及非医学类院校的医学相

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1146202
第一作者：范向超(2001—)，硕士在读，研究方向：生物信息学、生物医学工程。
收稿日期：2024-10-18　修回日期：2024-12-16　录用日期：2025-04-17
利益冲突：不存在　伦理审查：不需要　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

关学院日益重视生物信息学教育，并逐步将计算机科学与生物学的交叉课程纳入医学教育体系，以探索医学、信息科学和工程科学交叉领域的人才培养模式。其中不乏将生物信息学融入公共卫生教育体系的尝试，但这些尝试主要集中在研究生教育阶段，在本科生层面尚未形成被广泛认可的统一模式。鉴于此，本文检索了美国 48 所高校和中国 22 所高校公共卫生相关专业的本科教育培养方案，特别聚焦于公共卫生学与生物信息学复合型人才的培养问题。研究首先分析生物信息学在公共卫生领域的重要作用、明确公共卫生学与生物信息学复合型人才应该具备的知识结构，继而归纳总结公共卫生学与生物信息学复合型本科人才的培养模式，最后就公共卫生学与生物信息学本科复合型人才的培养提出建议。本研究将为促进生物信息学在公共卫生学教育中的融合，推动相关领域的本科人才培养，以满足社会对此类跨学科专业人才日益增长的需求提供参考。

1 生物信息学在公共卫生领域中发挥的作用

生物信息学在公共卫生领域的应用日益显著，从病原体基因组研究到流行病学分析，再到健康风险预警以及新药研发，生物信息学为疾病防控提供了全面的技术支持。

1.1 *病原体基因组研究*　近年来，病原体基因组序列数据已经发展成为支持疫情监测和流行病学调查的重要数据资源，而生物信息学技术在这些数据的获取和分析过程中发挥了不可或缺的作用。一方面，高通量测序技术为研究人员提供了丰富的遗传数据，在疾病检测和病原体分析中展现出重要的应用价值。例如，通过高分辨率分型和深度测序，可以更精确地识别病原体、检测混合感染、监测病毒变异，从而提高病原体检测灵敏度和准确性，推动“精准公共卫生”的发展[8]。另一方面，诸如宏基因组分析的基因组学技术突破了传统传染病检测方法的局限，不再依赖对已知病原体的识别，能够在不预设目标微生物属种信息的前提下，检测出罕见和新型的病原体，甚至推断其抗生素耐药性等特征[9]。此外，依托基因组分析等生物信息学手段，研究者可以整合病原体的基因组数据，全面掌握疾病的致病机制，进而制定出更为精准的防控策略。因此，掌握生物信息学方法与技术对公共卫生人员研究病原体具有重要意义。

1.2 *流行病学分析*　流行病学作为一门研究疾病在人群中发生、发展和传播规律的科学，可以帮助政府和卫生部门掌握疾病的时空分布规律，及时发现疾病的风险因素和传播途径，从而采取相应的防控措施，遏制疫情的蔓延。在流行病学研究中，生物信息学能够利用先进的计算技术、算法和数据库，深入分析大量的生物数据，以揭示疾病的传播规律、预测疫情发展趋势，进而制定有效的防控策略。通过基因组测序和比较，研究人员可以快速确定疫情类型，推断其来源。同时，进化分析可以帮助研究人员了解病原体的进化关系，追踪疾病的传播途径，如，病原体系统发育树的构建可以揭示各种病毒株的演化关系，从而帮助研究人员更好地把握疫情发展趋势。此外，生物信息学还可以用于构建数学模型、模拟疾病的传播过程、预测疫情的未来发展趋势，并评估不同干预措施的效果[10]。

1.3 *健康风险预警*　随着近些年传染性疾病的大规模暴发，在公共卫生领域中针对各种疾病的健康风险预警变得愈发重要。我国在《“健康中国 2030”规划纲要》中明确提出了“落实预防为主，减少疾病发生，实现全民健康”的要求。研究疾病的发病机制，从源头遏制疾病的暴发对公共卫生人员具有重要意义。然而，受限于对人类基因组认识的不足以及基因—环境的异质性，传统的公共卫生技术难以有效地对健康风险进行预警[11]。生物信息学作为重要的工具，通过融合多组学数据与环境数据，分析正常和疾病状态下生命活动的差异，能够帮助研究者更好地理解疾病发生的生物学过程[12]，为公共卫生决策提供科学依据，进而为健康风险预警奠定基础。

1.4 *新药研发*　药物和疫苗是治疗和预防疾病的关键手段，从药物靶点发现、药物分子数据的收集与筛选，到新药分子的生成，生物信息学贯穿了药物研发的整个生产流程。作为一个数据驱动的研究领域，生物信息学通过结合人工智能技术分析和挖掘多组学数据，将疾病表型与基因组序列变异和基因转录调控失常联系起来，确定治疗靶标，进而预测或筛选与靶标相互作用并产生预期治疗效果且不良反应最小化的化合物，最终通过实验与生物信息学分析联动，科学评估候选药物的疗效[13]。

2 公共卫生学与生物信息学本科复合型人才培养（表 1、图 1）

为探究公共卫生学与生物信息学的本科复合型人才培养模式，本文分析了所检索的国内外 70 所高校的公共卫生学和生物信息学人才培养方案（表 1）。在检索的 48 所美国高校中，以乔治华盛顿大学和密歇根大学为代表的综合类大学占大多数，麻省理工学院和伦斯勒理工学院等为代表的理工科院校占少部分。检索的 22 所中国院校大致可分为两类：以郑州大学、武汉大学为

代表的综合类大学和以哈尔滨医科大学、天津医科大学为代表的医学类院校。分析检索结果，美国的公共卫生学与生物信息学复合型本科人才培养模式主要分为 3 种（图 1）：（1）公共卫生与预防医学专业引入生物信息学课程；（2）公共卫生学院独立开设生物信息学专业或辅修专业；（3）创设结合公共卫生学与生物信息学核心知识体系的新型交叉学科专业。

表 1 公共卫生学与生物信息学的本科人才培养方案检索高校

Table 1 Colleges and universities investigated for undergraduate training programs in public health and bioinformatics

院校类型	院校列表
中国院校（22所）	郑州大学、武汉大学、厦门大学、吉林大学、北京大学、华中科技大学、四川大学、兰州大学、苏州大学、中山大学、浙江大学、中南大学、东南大学、南昌大学、哈尔滨医科大学、天津医科大学、海南医学院、中国医科大学、济宁医学院、南京医科大学、广州医科大学、南方医科大学
美国院校（48所）	乔治华盛顿大学、密歇根大学、加州大学伯克利分校、杜兰大学、布朗大学、加州大学欧文分校、北卡罗来纳大学教堂山分校、匹兹堡大学、德雷赛尔大学、阿拉巴马伯明翰、德克萨斯大学奥斯汀分校、马里兰大学帕克分校、佐治亚大学、肯塔基大学、波士顿大学、科罗拉多大学博尔德分校、康奈尔大学、普渡大学、罗格斯大学、密苏里大学、伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校、约翰·霍普金斯大学、加州大学洛杉矶分校、纽约州立大学、华盛顿大学、哥伦比亚大学、纽约州立大学布法罗分校、加州大学圣地亚哥分校、伦斯勒理工学院、明尼苏达大学双城分校、匹兹堡大学、斯坦福大学、加州大学圣克鲁兹分校、贝勒大学、卡内基梅隆大学、南加州大学、弗罗里达州立大学、特拉华大学、宾夕法尼亚大学、马凯特大学、麻省理工学院大学、埃默里大学、佛罗里达大学、亚利桑那大学、俄亥俄州立大学、印第安纳大学伯明顿分校、普林斯顿大学、爱荷华大学



图 1 公共卫生学与生物信息学复合型本科人才培养模式

Fig. 1 Training model for undergraduate talents majoring in public health and bioinformatics

2.1 公共卫生与预防医学专业引入生物信息学课程 如今，生物信息学课程纳入公共卫生与预防医学专业（以下简称“公卫专业”）的培养方案已成为公共卫生学与生物信息学复合型人才培养的主要模式。以密歇根大学、乔治华盛顿大学和加州大学伯克利分校 3 所美国院校为例，密歇根大学以公共卫生学院为依托，开设了多门生物信息学选修课程，包括生物信息学、基因组科学、表观基因组信息分析等，向学生系统传授生物信息学方法与工具、基因组及表观基因组关联分析方法、基因组修饰分析以及表观遗传时钟估计等知识与技术，引导学生从信息科学及临床的角度深入探索公共卫生问题；乔治华盛顿大学公共卫生学院设置了包括生物信息学导论、生物信息学算法、数据结构在内的多门生物信息学方向选修课，强调在公共卫生学课程中培养学生的理论分析及综合应用能力，特别是利用生物信息学手段开展公共卫生研究的能力；加州大学伯克利分校也在公卫专业设置了生物信息学相关课程，帮助学生熟悉相关领域的公共资源，并使用分析工具开展组学数据分析，其中的代表课程——人类基因组、环境和公共卫生涵盖了人类群体遗传学和分子生物学领域的基本原理和最新技术，以及全基因组关联分析等关键生物信息学方法，引导学生探讨如何在流行病学研究中通过生物信息分析识别遗传变异和环境风险因素。

所检索的中国院校大半也在公共卫生学院的教学内容中引入了生物信息学相关课程。其中，综合型大学和医学类院校在课程建设中倾向于采用不同的策略。一些综合型大学借助自身学科多样性的优势，为学生提供跨学科选课的学习机会。如武汉大学、厦门大学、苏州大学等院校的公共卫生学院为学生提供了诸如“跨学院课程”“交叉整合课程”“学校公共选修课程”的选修课模块，并在模块中设置了生物信息学、数据挖掘、分子遗传学等生物信息学相关课程。一些医学类院校出于自身的专业优势，在公共卫生方向有着更细分的专业设置，往往在该方向对应的理学专业中开设生物信息相关课程，如南京医科大学和南方医科大学，分别在公共卫生学院开设了应用统计学和生物统计学专业，并在其中引入生物信息学、遗传统计学、数据管理与分析等课程。

2.2 公共卫生学院开设生物信息学专业或辅修专业 除了在公卫专业引入生物信息学课程外，美国个别高校也尝试在公共卫生学院开设生物信息学相关专业或辅修专业，为学生提供更系统的生物信息学知识架构和更深入的实践技能培

养。其中的典型代表高校是乔治华盛顿大学，在开设生物信息学方向选修课程之外，其公共卫生学院还进一步开设了生物信息学辅修专业，专业的课程内容大致可以分为两部分：(1)由生物信息学导论和基因组学导论等课程组成的理论板块，通过课程学习，学生能够全面地掌握分子生物学、基因组和进化相关的生物学概念和基本理论；(2)由生物信息学算法与数据结构、计算生物学等课程组成的实践模块，通过该模块，学生将了解领域内的重要算法及常见分析流程，并能够熟练使用诸如 Unix 和 Python 的工作环境和编程工具。完整的培养方案结合了理论学习与实践训练，将更有效地培养学生在公共卫生环境中处理、分析复杂的生物数据和健康数据的能力。

2.3　融合公共卫生与生物信息学教育的新兴专业　公共卫生学与生物信息学复合型人才培养模式尚处于探索阶段，除了上述两种模式外，也有一些高校尝试开设全新的交叉学科专业。约翰·霍普金斯大学、乔治华盛顿大学和加州大学欧文分校均进行了相关探索。约翰·霍普金斯大学计算医学研究所通过整合医学与工程学院等多部门资源，创立了计算医学辅修专业。该专业重视生物信息学相关课程的教学，开设了计算医学导论、计算生物学和生物信息学基础、计算干细胞生物学、转录组计算、公共卫生数据科学等一系列的生物信息学课程。该专业培养的学生能够开发和应用生物信息相关计算方法，研究人类疾病的定量模型，同时利用患者个体数据对这些模型实现个性化设置，进而将其应用于健康预警、疾病诊断及个性化治疗。乔治华盛顿大学公共卫生学院也进行了相关尝试，设立了健康数据科学专业。专业课程紧密围绕生物信息学展开，课程内容融合了生物信息学算法与数据结构、计算生物学、健康信息学、流行病学、生物医学计算、数据伦理等多个模块，重点训练学生运用生物信息学方法管理、分析和解读复杂的组学数据及健康数据的能力。加州大学欧文分校公共卫生学院开设了健康信息学辅修专业，设置了健康信息学导论、消费者健康信息学、健康数据分析等课程，旨在为具有不同背景的学生提供生物医学信息学的全面教育。同时，设置了人工智能导论、机器学习和数据挖掘、并行和分布式计算等信息学与数据科学等选修课程，培养学生的信息技术运用能力与实践技能。

3　公共卫生与生物信息学复合型人才培养的思考

作为健康中国战略的关键一环，公共卫生体系的构建是实现全民健康、保障国家公共卫生安全的重要基石，而生物信息学的融入对于这一体系的建设至关重要。在此背景下，培养兼备两个专业之知识体系，能够熟练使用生物信息技术手段解决公共卫生领域问题的复合型人才，显得尤为迫切。探索并尝试合适的培养模式、构建合理的学科交叉课程体系、建设紧扣前沿并强调实践的专业课程，是培养此类复合型人才的关键。

3.1　推进公共卫生学与生物信息学的交叉学科教育，探索双学位培养模式　结合生物信息学在公共卫生领域中的实际应用，以及国内外不同高校公共卫生学与生物信息学复合型本科人才培养模式的检索结果，不难看出，以公卫专业教育为依托、融合生物信息学专业课程内容，是业内普遍认可且可行的路径。因此，在国内高校的公共卫生相关专业尝试双学位模式，将生物信息学教育作为第二学位，是值得探索的。(1)教育部鼓励高校开展第二学士学位教育，并重点支持在公共卫生与预防医学等领域增设第二学士学位专业，为高校探索、推进公共卫生与生物信息的双学位培养模式提供了政策支持和保障[14]。(2)多学科办学、多学科交叉已成为高水平大学的主流发展趋势。随着生物信息人才的需求增大，越来越多的国内高校开设了生物信息学及相关专业，为众多公卫专业增设生物信息学第二专业提供了便利条件。(3)经过近一个世纪的探索，以及现有相关政策法规的支持，我国高校的学分管理制度已较为完善，多学科型院校在课程设置、学分规定、计分、考核等方面的改革，使多专业课程体系的设置和实施成为可能，从而为双学位教育提供了制度保障。(4)随着信息化技术的不断发展，高校教学管理信息化建设得到了全面普及，日益完善的教学管理信息化系统，将大大减轻双学位模式探索在教学管理过程中增加的工作量，为双学位教育的实施提供了技术支撑[15]。

公共卫生学与生物信息学双学位培养模式的建设也对院校提出了新的要求。例如，接受双学位教育的学生要在有限的时间内完成两个专业的学习并通过相应的考核，这意味着相关院校必须优化办学机制[16]，设置合理的报名、选拔、奖励甚至退出机制。同时，双学位模式需要有效的质量监控机制，这也是双学位教育过程中经常存在问题且在具体实施中需要额外注意的问题[17-18]。此外，此类双学位项目依托公卫专业所在院系建设，往往涉及跨学院甚至跨学校的合作与协调，有利于不同学院或者高校间的优势互补，但是也为课程体系的构建和协调带来了挑战。

3.2　构建多学科交叉融合的课程体系，凸显生物信息学在公共卫生领域的应用价值　公共卫生学与生物信息学复合型人才培养，需要构建学科交叉融合的课程体系，并优化、丰富相应的课程资源。建议课程体系以公卫专业要求为核心，突出生物信息学特色的培养目标和核心能力要求。在公共卫生与预防医学的核心课程的基础上，可以尝试将生物信息学专业课程作为一类重

要的跨学科选修课，集中于培养学生对生物组学、健康信息大数据的分析和挖掘能力。一方面，引入生物信息学专业核心课程，如生物信息学基础、基因组科学与技术、系统生物学导论等，帮助学生理解掌握各类组学数据的基本概念、相关技术的核心原理以及数据生成的基本流程；另一方面，培养学生数据分析的实践能力，设置计算生物学、生物数据分析与实践等课程，以帮助学生理解常见的生物医学数据分析流程和不同类型数据处理、分析的核心算法，并通过实验课时掌握 Unix、R 和 Python 等生物信息领域常用的工作环境和编程工具。此外，也可以在公卫专业的集中实践环节，如专业综合设计、毕业设计等课程中，设置诸如病原体基因组研究、流行病学分析、健康风险预警等针对具体应用场景的课题，培养学生利用生物信息手段解决复杂公共卫生问题的能力。

3.3 设立前沿技术课程，培养创新能力 在人工智能与大数据技术快速发展的时代背景下，除了必须掌握的基础性课程以及综合专业课程之外，公共卫生学与生物信息学复合型人才需要学习和了解前沿技术，尤其是人工智能和大数据技术。为了适时地将领域内前沿进展引入教学内容、培养学生的综合创新能力，可以有针对性地设立一些前沿技术课程，如公共卫生大数据与人工智能技术，引导学生使用人工智能方法挖掘分析公共卫生数据、解决公共卫生领域中的信息学问题。此外，也可以设置诸如计算医学导论、健康信息学导论的课程，开阔学生的专业视野。

3.4 因地制宜，结合院校自身优势和特色 在建设公共卫生与生物信息学复合型人才的培养体系时，应借助院校自身优势和资源，选择合适的策略。如综合型院校可以基于自身学科多样性的特点，充分借助本校的理学和工学相关学科资源，统筹协作建设兼备深度和广度的生物信息学选修课体系；医学类院校则可以借助自身的专业专注度和临床优势，构建更细分的专业体系，同时，也可以开展区域内合作，借助兄弟院校的强势理工科专业的优势，合作办学，构建完备的课程体系。

在“健康中国”国家发展战略持续稳步推进的大背景下，公共卫生体系的构建已然成为全社会共同关注的焦点。生物信息学作为一门新兴的交叉学科，通过深入挖掘和分析大规模生物及医学数据，能够揭示流行病的发生机制、传播趋势，为疫情的监控和健康维护提供科学依据。为此，培养兼具公共卫生学与生物信息学领域专业知识和技能的复合型人才，是保障人民健康、推动社会进步的国家发展需求。本文分析了所收集的国内外共计 70 所高校公共卫生与生物信息学本科专业的培养方案，聚焦公共卫生学与生物信息学复合型人才培养。结果表明，目前国际上主要有 3 种培养模式：在公卫专业开设生物信息学选修课程、设立辅修专业以及建立新型专业。这些人才培养模式推动了公共卫生学与生物信息学的融合。面对公共卫生领域对高水平复合型人才的需求，结合检索结果，不难得出需要进一步推动公共卫生学与生物信息学教育体系的深度融合、创新人才培养模式的结论。因此，本文提出了开展我国公共卫生学与生物信息学复合型人才培养的思路，建议国内院校的公共卫生相关专业可以探索和尝试双学位培养模式、构建和优化学科交叉融合的课程体系、设立前沿技术课程，并因地制宜发挥院校自身优势和特色。随着生物信息学方法和技术在公共卫生领域的应用更加广泛和深入，推动公共卫生学与生物信息学的交叉融合，培养具有跨学科知识结构和专业应用技能的复合型人才，对于践行“健康中国”、提升公共卫生整体水平、提高疾病防控能力具有深远意义。

参考文献

[1] 王昊. 近代中国公共卫生学科的创立与发展 [J]. 医学与哲学, 2024, 45(5): 69-73.
[2] 邸鹏. 高校公共卫生教育是推进健康战略的有力支撑——评《健康战略下高等公共卫生教育模式探索与实践》[J]. 中国卫生事业管理, 2023, 40(8): 7-8.
[3] 习近平. 构建起强大的公共卫生体系 为维护人民健康提供有力保障 [J]. 求是, 2020(18): 4-11.
[4] Mitra D, Mitra D, Bensaad M S, et al. Evolution of bioinformatics and its impact on modern bio-science in the twenty-first century: special attention to pharmacology, plant science and drug discovery[J]. Computational Toxicology, 2022, 24: 100248.
[5] Wani M Y, Ganie N A, Rani S, et al. Advances and applications of bioinformatics in various fields of life[J]. International Journal of Fauna and Biological Studies, 2018, 5(2): 3-10.
[6] Maljkovic Berry I, Melendrez M C, Bishop-Lilly K A, et al. Next generation sequencing and bioinformatics methodologies for infectious disease research and public health: approaches, applications, and considerations for development of laboratory capacity[J]. The Journal of Infectious Diseases, 2020, 221(S3): S292-S307.
[7] 马天有, 胡曦, 王丽娜, 等. 公共卫生大数据研究进展——生物信息的新领域 [J]. 生物信息学, 2017, 15(4): 255-262.
[8] Armstrong G L, Maccannell D R, Taylor J, et al. Pathogen genomics in public health[J]. New England Journal of Medicine, 2019, 381(26): 2569-2580.
[9] Miller R R, Montoya V, Gardy J L, et al. Metagenomics for pathogen detection in public health[J]. Genome Medicine, 2013, 5(9): 81.
[10] Tran L T, Thi H V, Chu D T. Bioinformatics in preventive medicine and epidemiology[M]//Singh V, Kumar A. Advances in Bioinformatics. Singapore: Springer, 2024: 347-358.
[11] Ramos R G, Olden K. Gene-environment interactions in the development of complex disease phenotypes[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2008, 5(1): 4-11.
[12] Herrera-Luis E, Benke K, Volk H, et al. Gene-environment interactions in human health[J]. Nature Reviews Genetics, 2024, 25(11): 768-784.
[13] Patel P H, Jha A, Chakraborthy G S. Role of bioinformatics in drug design and discovery[M]// Rudrapal M, Khan J. CADD and Informatics in Drug Discovery. Singapore: Springer, 2023: 1-33.
[14] 教育部办公厅. 教育部办公厅关于在普通高校继续开展第二学士学位教育的通知 [EB/OL]. (2020-05-22) [2024-12-01]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_1034/s3883/202005/t20200529_460339.html.
[15] 刘秀娥, 张涛. 实施双学位教育, 培养复合型人才 [J]. 教育探索, 2008(9): 83-84.
[16] 李冰. 我国双学位教育的发展与改革探讨 [J]. 教育教学论坛, 2023(37): 9-12.
[17] 边士洪. 完善辅修、双学位教育教学管理工作的思考 [J]. 教育探索, 2010(2): 95-96.
[18] 赵安明, 郭坤, 余超, 等. “英语+信息工程”双学位本科专业改革与实践 [J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(6): 5-9.