

以黏细菌为基础的微生物生理学教学内容革新及教学模式探索

李周坤, 纪燕玲, 叶现丰, 刘园园, 黄彦, 崔中利*

南京农业大学 生命科学学院 农业农村部农业环境微生物重点实验室, 江苏 南京 210095

李周坤, 纪燕玲, 叶现丰, 刘园园, 黄彦, 崔中利. 以黏细菌为基础的微生物生理学教学内容革新及教学模式探索[J]. 微生物学通报, 2024, 51(9): 3761-3771.

LI Zhoukun, JI Yanling, YE Xianfeng, LIU Yuanyuan, HUANG Yan, CUI Zhongli. Teaching content innovation and teaching mode exploration of Microbial Physiology based on myxobacteria[J]. Microbiology China, 2024, 51(9): 3761-3771.

摘要: 微生物生理学是重要的微生物学专业基础课程。随着科学技术的不断进步, 微生物生理学的研究领域不断拓展, “微生物生理学”课程教学内容与教学模式必须更新, 以体现学科前沿最新成果, 适应高等农业院校人才培养目标。作者通过 2 年的课程建设, 构建了以黏细菌为载体的“兴趣引导—理论传授—社会实践—综合考评”课程教学与评价体系; 组织开展了以“黏细菌与农业应用”为话题的实践调查与互动讨论会。本文将课程教学基础理论与农业实践相结合, 通过“微生物生理学”课程内容革新与教学模式探索, 提高本科生独立思考与学以致用能力, 为培养高质量农业科技人才提供支撑。
关键词: 微生物生理学; 教学模式; 黏细菌; 农业实践

Teaching content innovation and teaching mode exploration of Microbial Physiology based on myxobacteria

LI Zhoukun, JI Yanling, YE Xianfeng, LIU Yuanyuan, HUANG Yan, CUI Zhongli*

Key Laboratory of Agricultural Environmental Microbiology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China

Abstract: Microbial Physiology is a basic course for the undergraduates majoring in microbiology. With the advances of science and technology, the research field of Microbial Physiology is expanding. Accordingly, the teaching contents and mode of Microbial Physiology

资助项目: 教育部 2022 年度拔尖计划 2.0 研究课题(20222093); 2021 年南京农业大学教育教学改革研究项目(2021M001)
This work was supported by the Ministry of Education 2022 Annual Excellence Program 2.0 Research Project (20222093), and the Education and Teaching Reform Research Project of Nanjing Agricultural University in 2021 (2021M001).

*Corresponding author. E-mail: czl@njau.edu.cn

Received: 2023-12-13; Accepted: 2024-04-28; Published online: 2024-05-13

should be updated to reflect the state-of-the-art research achievements and adapt to the requirements of agricultural universities and colleges. Taking the teaching of myxobacteria as an example, we built the teaching and evaluation system composed of interest guidance, theory impartation, social practice, and comprehensive evaluation by two years of course development. Furthermore, we organized the field investigation and discussion on the topic of myxobacteria and agricultural applications. The teaching content innovation and teaching mode exploration of Microbial Physiology by combining the basic theory with agricultural practice improves the ability of undergraduates to think independently and apply what they have learned, providing support for training high-quality scientific and technological talents in agriculture.

Keywords: Microbial Physiology; teaching mode; myxobacteria; agricultural practice

随着科学技术的发展,微生物在农业领域中的应用及作用效果日益受到重视,发展农业微生物产业事关国家粮食生产安全和耕地质量保障^[1],我国农业微生物的发展依赖于农业科技人才的培养。农林院校是我国高等教育体系的重要组成部分,建设教育强国的根本任务是为强农兴农、推进农业农村现代化建设培养卓越农林人才^[2]。相关文件明确提出强化人才培养的基础要素,其中包括优化教学内容和课程体系、加快新兴涉农专业教材和新形态教材建设等。

微生物生理学是一门重要的微生物学基础课程,以阐明微生物生命活动机理作为主要教学内容^[3]。作为一门聚焦微生物细胞基本生命活动的综合性学科^[4],微生物生理学的教学改革与内容革新对于农业微生物学的发展和农业科研人才培养具有重要意义。南京农业大学“微生物生理学”课程面向国家一流专业(生物科学、生物技术)的理科、生命基地班和生科实验班等 8 个班级开设,已成为农业本科人才培养的一门重要专业基础课。经过数次教学改革,微生物生理学课程经历从选修课到必修课的调整,理论 36 学时、实验 18 学时。在一流本科人才培养实践过程中,组建了微生物生理学教学团队,团队骨干教师均来自农业农村部农业环境微生物重点实验室,团队成员在教学过程

中关注前沿动态,优化教学方案,积极培养学生自主思考和解决问题的能力,为培养高素质新型农业科技人才提供重要支撑。

微生物生理学教学团队在开展基础科学研究过程中发现,黏细菌(myxobacteria)作为一类具有重要应用潜力的新型农业微生物资源,近年来受到研究者的广泛关注。黏细菌是革兰氏阴性菌中唯一具有发育行为的微生物类群^[5],能够捕食其他活体微生物^[6-8]。教学团队核心成员崔中利教授领导的研究团队经过多年的基础理论研究,系统解析了黏细菌与土壤微生物及植物病原菌相互作用的生理生态机制^[9-10],创新性地将黏细菌应用于农业病害的生物控制^[11-12],为我国农业微生物发展提供了具有自主知识产权的新型优良微生物资源。在此背景下,教学团队结合黏细菌研究特色,通过连续 2 年的课程建设与改革,构建了以黏细菌为基础的微生物生理学课程教学与评价体系,旨在为高阶型农业科技人才培养提供重要支撑。

1 将黏细菌的发现历程作为“微生物生理学”课程思政的案例

黏细菌的发现历程充满曲折(图 1),德国植物学家 Link 最早于 1809 年对黏细菌进行描述并命名了黏细菌的一个种 *Polyangium vitellinum*^[13]。



图1 黏细菌的发现历程及研究黏细菌的代表性科学家^[13-16]

Figure 1 Discovery process of myxobacteria and representative scientists^[13-16].

英国生物学家 Berkeley 于 1857 年发现了黏细菌另外 2 个属,即软骨霉菌属(*Chondromyces*)和标桩菌属(*Stigmatella*),描述并命名了 2 个种,即番红花软骨菌(*Chondromyces crocatus*)和橙色标桩菌(*Stigmatella aurantiaca*)^[14]。这些黏细菌均被错误地认作丝状真菌,直到美国植物学家 Roland Thaxter 在 1892 年以标桩菌属的黏细菌

为研究对象,详细阐述了黏细菌独特的生活史,首次将黏细菌正式鉴定为细菌^[15]。该研究成果发表在 *Botanical Gazette* 并引起了广泛的关注,但由于这一观点与此前认为该菌的分类地位是真菌的结论差别较大,导致该成果直到 20 年后才被广泛接受。

自 20 世纪初以来,对黏细菌的研究开始规

范和深入,其中比较重要的认知主要来自文献[17-20]。随着研究者获取黏细菌纯培养物并建立了菌株培养体系,Dworkin 与 Gibson^[21]、Kaiser 与合作者^[16,22]分别将发育生物学和分子遗传学引入到黏细菌的研究体系中,显著拓展了研究者对黏细菌的认知。黏细菌的发现历程在反映微生物学进步和发展的同时,也说明了开拓型创新性研究虽然在一定时期内难以被广泛接受,但真理总是能够经受住历史的考验,如同孟德尔定律在沉睡了 34 年之久后才被重新审视。黏细菌的发现历程融入课程思政建设有助于培养学生的科学探索精神。

2 以黏细菌为载体的微生物生理学教学内容革新

黏细菌的群体行为表现出超出原核生物所应有的“智慧”,因此我们把它列入微生物生理学教学内容。黏细菌的社会性行为体现在:(1) 捕食策略。黏细菌在捕食细菌的过程中,面对抵抗力弱的猎物,采取直接攻击模式;而面对抵抗力强的猎物,则采取“狼群”围捕的模式^[9]。(2) 发育行为。黏细菌是革兰氏阴性细菌中唯一具有发育行为的微生物类群,其发育过程中细胞表现典型的合作行为。(3) 亲缘识别。自然环境中,相同类群细胞之间可以产生大量有利于自身存活的合作行为。为了确保这些合作行为发生在同类细胞之间,黏细菌细胞需要对邻近细胞进行亲缘辨别^[23]。黏细菌因其典型的社会性多细胞行为特征,被认为是研究发育的重要原核生物模型。黏细菌还具有环境适应性、分解生物质以及捕食活体微生物的能力,具有良好的生物安全性^[24],在农业病害防控和废弃物生物转化等方面具有巨大的应用潜力^[25]。作者教学团队研究发现,黏细菌通过产生不同类型的新型

糖苷水解酶分解真菌和卵菌细胞壁,以实现病原菌的捕食^[7,26],拓展了研究者对于捕食性黏细菌如何进行“以菌克菌”的认知。捕食性黏细菌通过分解猎物细胞中的蛋白进行氨基酸代谢,从而获取生长所需的营养。与之不同的是,纤维堆囊菌通过分解纤维素进行糖代谢获取能量。此外,与细菌常规的糖合成途径不同,黏细菌丰富的胞外多糖的合成主要通过糖异生途径^[27]。

微生物生理学课程涉及微生物细胞的外部结构外膜囊泡、物质的跨膜运输、分解与合成代谢、次级代谢物、微生物的生长、微生物的分化、微生物与植物互作等知识是微生物生理学的重要教学内容,将黏细菌这一特殊的新型农业微生物引入微生物生理学课程,革新教学内容(图 2),紧跟学科前沿开展知识传授,使理论落地且与农业实际情况相结合,将极大地拓展农业院校学生对于新型农业微生物资源的认知,激发学生主动探索农业微生物未知世界的动力。

3 以黏细菌为基础建设微生物生理学特色课程体系

目前开设本科微生物生理学课程的高等院校所使用的主要参考教材包括:李颖等主编,科学出版社,2013;沈标主编,中国农业出版社,2009;杨生玉等主编,化学工业出版社,2008;沈萍主编,高等教育出版社,2000;周德庆主编,高等教育出版社,2002;以及 Madigan 等主编, *Brock Biology of Microorganism*, 14th edition 等^[4,28-29],其中黏细菌的介绍与微生物生理学核心内容联系不够紧密,并且缺乏对该菌最新的研究进展与应用内容的详细描述。此外,不同院校“微生物生理学”课程讲授的方法和核心授课内容也存在较大的差异。以中国农业大学、南开

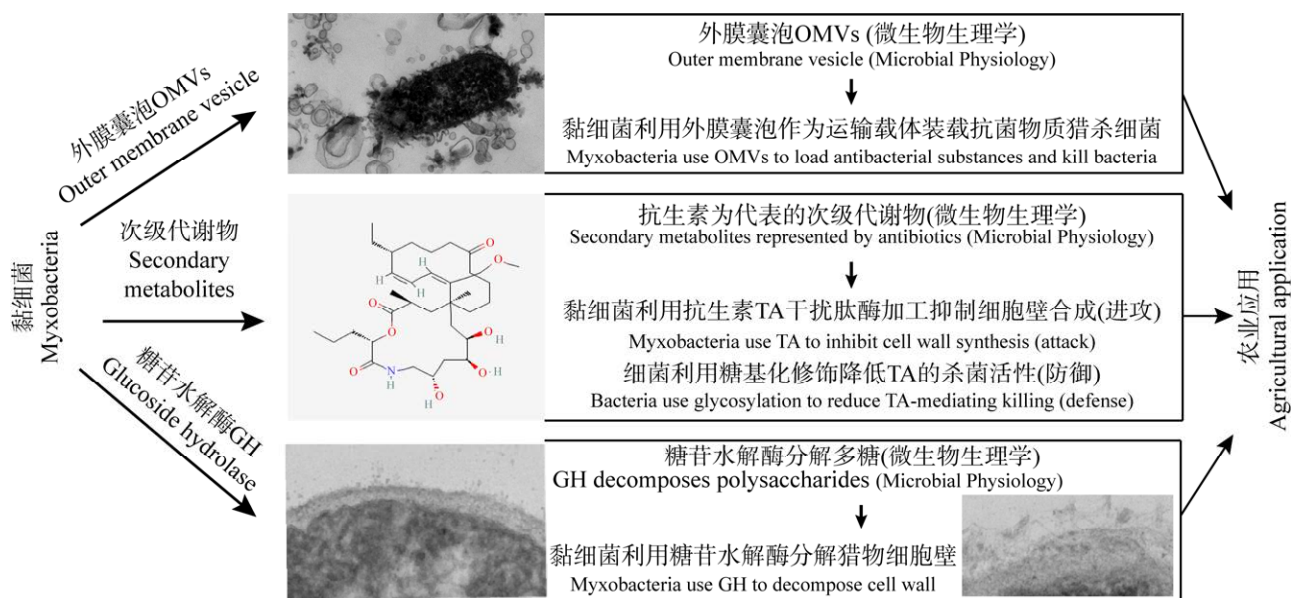


图2 以黏细菌为载体的代表性微生物生理学教学内容革新^[9]

Figure 2 Content innovation of representative points of Microbial Physiology with myxobacteria as the carrier^[9].

大学、哈尔滨工业大学的课程体系为例(表1)进行对比分析, 中国农业大学基于科学研究特色, 在微生物生理学基础理论知识的基础上, 补充了微生物与植物互作前沿内容; 哈尔滨工业大学在环境科学与工程一级学科背景下, 侧重微生物与环境关系的内容介绍; 南开大学以中国大学 MOOC 为平台, 结合微生物生理学理论讲授与专题报告, 增设了微生物与生理功能等内容。显然, 各院校均结合自身的科学研究成果建立了各具特色的“微生物生理学”课程体系。

作者教学团队在前期课程建设的基础上, 通过课程实践与教学反馈, 结合本团队科研特色, 在本科生“微生物生理学”课程中增设了黏细菌认知与研究新进展的教学内容, 并以此为基础开设了黏细菌与农业应用实践课程, 建立了各具特色的课程体系(表 1, 南京农业大学), 构建了以“黏细菌”为载体的“兴趣引导(新资源发现)—理论传授(新知识革新)—社会实践(新

模式探索)—综合考评(新方式考核)”的微生物生理学教学与评价体系(图 3)。首先, 以黏细菌这一类特殊的原核微生物为切入点, 通过介绍黏细菌的发现史以及过程的曲折性, 引导学生关注黏细菌生物资源的新颖性和特殊性, 激发学生的科学兴趣和探索精神; 其次, 以黏细菌在子实体形成、运动, 以及捕食其他细菌、真菌和卵菌过程中表现出类似动物的群体合作行为作为出发点, 激发学生的学习兴趣, 继而通过课程教学引导学生自主架构微生物生理学新知识网络, 达到教学内容革新的效果; 再次, 以理论为实践服务的理念, 基于黏细菌次级代谢物合成、捕食植物病原微生物、群体协作等特性, 将黏细菌与我国农业生产的实际问题相结合, 以问题为导向讲述黏细菌的农业应用, 探索以黏细菌为载体的农业微生物理论讲授与应用实践结合的教学模式; 最后, 以我国农业生产过程中作物病害和农业废弃物生物转化为代表性

表 1 部分高等院校微生物生理学教材及教学内容

Table 1 The teaching materials and contents of Microbial Physiology from representative universities

高等院校 University	教材 Teaching material	教材章节及教学内容 Course chapters and teaching content	总学时 Credit hours	参考文献 Reference
中国农业大学 China Agricultural University	科学出版社; 主编: 李颖; Science Press; Editor: LI Ying; 高等教育出版社; 主编: Albert G. Moat; Higher Education Press; Editor: Albert G. Moat	第一章: 绪论 Chapter 1: Introduction to microbial physiology 第二章: 细菌的细胞壁和生物被膜 Chapter 2: Bacterial cell walls and biofilms 第三章: 细菌的鞭毛 Chapter 3: Bacterial flagella 第四章: C1 代谢 Chapter 4: C1 metabolism 第五章: 氮代谢 Chapter 5: Nitrogen metabolism 第六章: 能量代谢 Chapter 6: Energy yielding metabolism 第七章: 代谢的调控 Chapter 7: The regulation of metabolism 第八章: 微生物与植物互作 Chapter 8: Interactions between microorganisms and plants	48	[28]
哈尔滨工业 大学 Harbin Institute of Technology	科学出版社; 主编: 李颖; Science Press; Editor: LI Ying; 高等教育出版社; 主编: Madigan Higher Education Press; Editor: Madigan	第一节: 微生物的结构与功能 Section 1: Structure and function of microorganisms 第二节: 微生物的结构与功能 Section 2: Structure and function of microorganisms 第三节: 微生物的营养 Section 3: Microbial nutrition 第四节: 微生物的代谢及研究方法 Section 4: Microbial metabolism and research methods 第五节: 自养微生物的代谢 Section 5: Metabolism of autotrophic microorganisms 第六节: 微生物的产能代谢 Section 6: Productivity metabolism of microorganisms 第七节: 微生物的合成代谢 Section 7: Microbial anabolism 第八节: 微生物的次级代谢 Section 8: Secondary metabolism of microorganisms 第九节: 微生物的代谢调节 Section 9: Metabolic regulation of microorganisms 第十节: 微生物的生长与环境条件 Section 10: Microbial growth and environmental conditions 第十一节: 微生物对环境胁迫的反应 Section 11: Microbial responses to environmental stress	16	[29]

(待续)

(续表 1)

高等院校 University	教材 Teaching material	教材章节及教学内容 Course chapters and teaching content	总学时 Credit hours	参考文献 Reference
南开大学 Nankai University	高等教育出版社, Albert G. Moat 等著, 李颖等译, 2009 Editor, Albert G. Moat et al., Trans., LI Ying et al., 2009 科学出版社, 李明春、杨文博等译, 2009 Trans., LI Mingchun, YANG Wenbo et al., 2009 科学出版社; 李颖、关国华主编, 李季伦主审, 2013 Science Press; Editor: LI Ying and GUAN Guohua, reviewed by Jilun LEE, 2013	第一讲: 绪论 Lecture 1: Introduction 第二讲: 微生物的细胞结构与功能 Lecture 2: The cell structure of microorganisms and function 第三讲: 微生物的营养 Lecture 3: The nutrition of microorganisms 第四讲: 微生物代谢概论及研究方法 Lecture 4: Introduction to microbial metabolism and research methods 第五讲: 微生物的产能代谢 Lecture 5: Productivity metabolism of microorganisms 第六讲: 微生物合成代谢 Lecture 6: Microbial anabolism 第七讲: 微生物的次级代谢 Lecture 7: Secondary metabolism of microorganisms 第八讲: 微生物的代谢调节 Lecture 8: Metabolic regulation of microorganisms 第九讲: 微生物生理学系列专题报告 Lecture 9: A series of special reports on microbial physiology	40	中国大学 MOOC 平台 Chinese university MOOC platform [4]
南京农业大学 Nanjing Agricultural University	中国农业出版社; 沈标主编, 2009 China Agricultural Press; Editor: Shen Biao, 2009	第一节: 绪论 Section 1: Introduction 第二节: 微生物细胞的结构与功能 Section 2: Structure and function of microbial cells 第三节: 微生物的营养 Section 3: Microbial nutrition 第四节: 异养微生物的分解代谢 Section 4: Catabolism of heterotrophic microorganisms 第五节: 自养微生物能量代谢 Section 5: Energy metabolism of autotrophic microorganisms 第六节: 微生物的合成代谢 Section 6: Microbial anabolism 第七节: 微生物的次级代谢 Section 7: Secondary metabolism of microorganisms 第八节: 微生物的代谢调节 Section 8: Metabolic regulation of microorganisms 第九节: 微生物的生长 Section 9: The growth of microorganisms 第十节: 微生物的分化与发育(黏细菌认知与新进展) Section 10: Differentiation and Development of Microorganisms (New Advances in Myxobacteria Cognition) 第十一节: 黏细菌与农业应用实践 Section 11: Myxobacteria and agricultural application practice	36	本文 This article

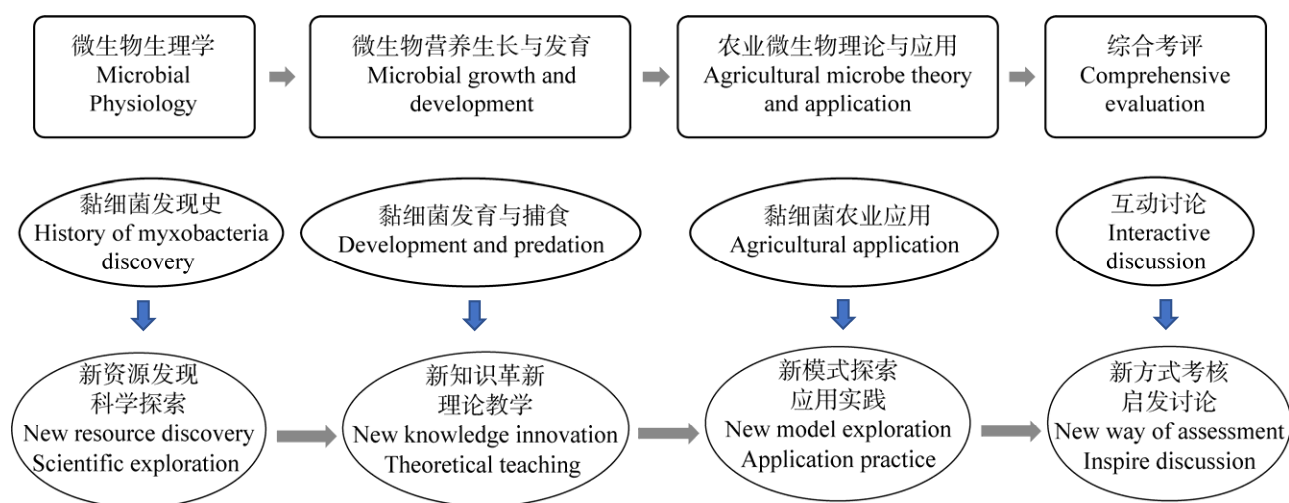


图3 以黏细菌为基础的“微生物生理学”课程体系建设与组织形式

Figure 3 Construction and organizational form of the Microbial Physiology course system based on myxobacteria.

话题,通过田间实践调查,组织开展以“黏细菌与农业应用”为内容的互动讨论会,提出问题引导学生思考黏细菌的应用领域,提出可能的解决方案,突出课程特色,鼓励学生利用所学知识解决农业实际问题。

4 微生物生理学新课程教学改革评价

在微生物生理学特色课程体系建设的基础上,教学团队进一步设置了多元化的综合考评方式。中国农业大学微生物生理学教学团队基于教师科研背景优势和专业特色,采用大班教学、教师分章节授课的方式,并通过课程反馈确定了“随堂小测+课程思维导图,成绩 30%;课程报告,成绩 20%;期末考试,成绩 50%”的考核方案^[28];南开大学微生物生理学教学团队的考核指标主要为平时成绩(40%)和期末考试(60%),其中平时成绩包括学生线上学习成绩(20%)、小组专题汇报(10%)和综述成绩(10%),期末成绩主要以思考题和科研实验设计

题为代表的开放式考核模式^[4]。作者所在的微生物生理学教学团队在参考已有的高效测评方式的基础上,优化了前期仅以课堂表现和期末考试成绩作为考核的单一方式,确定了新的课程考核方案:期末闭卷考试成绩占比 60%,主要涉及基础知识点考核、理论知识的综合运用等;平时成绩占比 40%,主要包括以黏细菌等为话题的互动讨论(20%)和启发式思考的课程报告(20%)。课程考核方式的优化能够鼓励学生提高学习兴趣和效率。

教学团队通过 2 年的课程实践,评价了新课程教学改革成效。在农业微生物资源认知方面,显著提高了本科生对黏细菌等重要农业微生物资源的认知。以主动提问和课后讨论为评价指标,学生与授课老师互动率由 2022 年的 40%上升到 2023 年的 100%。近 2 年的学生成绩结果分析显示(图 4),2023 年 27%的学生成绩分布于 90–100 分,与 2022 年基本一致;2023 年 55%的学生成绩分布于 80–89 分,高于 2022 年。此外,相较于 2022 年,2023 年无成绩

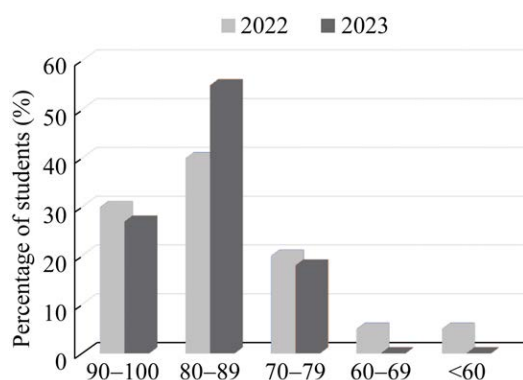


图 4 微生物生理学课堂成绩分布

Figure 4 Distribution of the students' grades from Microbial Physiology.

不及格的学生。新的教学改革与评价方式使得低分段和不及格率下降,学生能够较好地掌握课程知识点。此外,以黏细菌为核心,融合微生物生理学基础理论,获批国家级大学生创新创业训练计划 3 项。以“微生物生理学”课程体系为基础,面向全校生命科学专业的开放课程“黏细菌与农业”已成为本科生选修的热门课程,总选课人数已达到 210 人。目前,微生物生理学课程在培养学生自主创新思维、提升学以致用能力方面起到了积极的作用,引导学生投身农业科技创新实践的作用日益突显。

5 结语

黏细菌是一类具有重要应用价值的新型农业微生物。目前,黏细菌的基础研究主要是以黏细菌为模式生物,开展发育生物学、种群识别、进化生物学及生态学等研究,包括子实体的形成、运动性、亲缘识别以及生物多样性等^[30-32],显著拓展我们对原核生物的认知。此外,以黏细菌作为细胞合成工厂,已发现并鉴定了一系列具有生物活性的次级代谢物,如抗肿瘤药物埃博菌素、抗真菌化合物安布替星和黏噻唑等^[33]。黏细菌早在 1914 年被报道具有捕

食细菌的能力,但如何利用黏细菌的捕食能力助力农业绿色发展并未引起太多的关注。南京农业大学微生物生理学教学团队一直关注黏细菌捕食生物学及其农业应用这一重要问题,致力于将黏细菌应用于农业生产过程中作物的病害防控和废弃物的生物转化,助力我国绿色农业可持续发展。

加大高等农林教育人才培养改革力度,培养面向未来的“新农人”已成为农林高校面临的重要任务。在开展微生物生理学教学过程中,作者团队将黏细菌特性及最新科研进展与微生物生理学理论知识相结合,开展教学改革。以黏细菌新资源发现激发学生的学习兴趣,以黏细菌研究新进展提升学生的学习动力,以黏细菌农业应用加强学生对农业微生物自主创新与实际应用的意识,以农业实践调查与互动讨论增强学生利用微生物生理学知识解决农业生产问题的能力。在革新教学内容的同时,以新型农业微生物“黏细菌”作为载体,将微生物生理学课程知识点与农业应用相结合,突出课程教学对于农业科技创新人才培养的重要性。微生物生理学作为专业基础核心课程,在经典基础知识的基础上,需要注入创新科研成果,与学科前沿保持同步。同时更需要结合本校特色、厚植兴农育人的使命和我国农业绿色发展的实际情况,将理论与实践相结合,引导大学生投身乡村振兴一线,成为知农爱农的“新农人”。

REFERENCES

- [1] 周杨, 邓名荣, 杜娟, 宋仲骞, 吴清平, 朱红惠. 我国农业微生物产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 197-206.
ZHOU Y, DENG MR, DU J, SONG ZJ, WU QP, ZHU HH. Development of agricultural microbial industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 197-206 (in Chinese).
- [2] 吴普特. 培养堪当民族复兴重任的卓越农林人才[J].

- 中国高等教育, 2022(18): 4-6.
- WU PT. Cultivate outstanding agricultural and forestry talents who can shoulder the heavy responsibility of national rejuvenation[J]. China Higher Education, 2022(18): 4-6 (in Chinese).
- [3] 关国华, 王瑜, 陈文峰, 李颖. 微生物生理学教学探索: 以细菌鞭毛结构与功能的教学为例[J]. 微生物学通报, 2016, 43(4): 756-761.
- GUAN GH, WANG Y, CHEN WF, LI Y. Microbial Physiology teaching exploration: taking the teaching of the structure and function of bacterial flagella as an example[J]. Microbiology China, 2016, 43(4): 756-761 (in Chinese).
- [4] 潘皎, 刘方, 吴卫辉, 马挺, 魏东盛, 靳永新, 徐海津, 李霞, 陈凌懿. 微生物生理学课程建设与教学改革体会[J]. 微生物学通报, 2020, 47(4): 1068-1073.
- PAN J, LIU F, WU WH, MA T, WEI DS, JIN YX, XU HJ, LI X, CHEN LY. Construction of Microbial Physiology course and experience in teaching reform[J]. Microbiology China, 2020, 47(4): 1068-1073 (in Chinese).
- [5] ZUSMAN DR, SCOTT AE, YANG ZM, KIRBY JR. Chemosensory pathways, motility and development in *Myxococcus xanthus*[J]. Nature Reviews Microbiology, 2007, 5: 862-872.
- [6] ZHANG L, HUANG XY, ZHOU JZ, JU F. Active predation, phylogenetic diversity, and global prevalence of myxobacteria in wastewater treatment plants[J]. The ISME Journal, 2023, 17(5): 671-681.
- [7] LI ZK, YE XF, LIU MX, XIA CY, ZHANG L, LUO X, WANG T, CHEN Y, ZHAO YQ, QIAO Y, HUANG Y, CAO H, GU XY, FAN JQ, CUI ZL, ZHANG ZG. A novel outer membrane β -1,6-glucanase is deployed in the predation of fungi by myxobacteria[J]. The ISME Journal, 2019, 13: 2223-2235.
- [8] LI ZK, WANG T, LUO X, LI XM, XIA CY, ZHAO YQ, YE XF, HUANG Y, GU XY, CAO H, CUI ZL, FAN JQ. Biocontrol potential of *Myxococcus* sp. strain BS against bacterial soft rot of calla lily caused by *Pectobacterium carotovorum*[J]. Biological Control, 2018, 126: 36-44.
- [9] 李周坤, 叶现丰, 杨凡, 黄彦, 范加勤, 王辉, 崔中利. 黏细菌捕食生物学研究进展及其在农业领域的应用潜力[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 208-216.
- LI ZK, YE XF, YANG F, HUANG Y, FAN JQ, WANG H, CUI ZL. The predation biology of myxobacteria and its application in agricultural field[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(2): 208-216 (in Chinese).
- (in Chinese).
- [10] XIA CY, ZHAO YQ, ZHANG L, LI X, CHENG Y, WANG DM, XU CS, QI MY, WANG JH, GUO XR, YE XF, HUANG Y, SHEN DY, DOU DL, CAO H, LI ZK, CUI ZL. Myxobacteria restrain *Phytophthora* invasion by scavenging thiamine in soybean rhizosphere via outer membrane vesicle-secreted thiaminase I[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5646.
- [11] YE XF, LI ZK, LUO X, WANG WH, LI YK, LI R, ZHANG B, QIAO Y, ZHOU J, FAN JQ, WANG H, HUANG Y, CAO H, CUI ZL, ZHANG RF. A predatory myxobacterium controls cucumber *Fusarium* wilt by regulating the soil microbial community[J]. Microbiome, 2020, 8(1): 49.
- [12] LI ZK, YE XF, CHEN PL, JI K, ZHOU J, WANG F, DONG WL, HUANG Y, ZHANG ZG, CUI ZL. Antifungal potential of *Coralloccoccus* sp. strain EGB against plant pathogenic fungi[J]. Biological Control, 2017, 110: 10-17.
- [13] LINK JHF. Observationes in ordines plantarum naturales. Dissertatio Ima[J]. Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin, Magazin, 1809, 3(1): 3-42.
- [14] BERKELEY MJ. Introduction to Cryptogamic Botany[M]. London: Bailliere, 1857.
- [15] THAXTER R. On the myxobacteriaceæ, a new order of schizomycetes[J]. Botanical Gazette, 1892, 17(12): 389-406.
- [16] KAISER D, MANOIL C, DWORKIN M. Myxobacteria: cell interactions, genetics, and development[J]. Annual Review of Microbiology, 1979, 33: 595-639.
- [17] BAUR E. Myxobakterien-studien[M]. Jena, Fischer: Archiv für Protistenkunde, 1904.
- [18] JAHN E. Beiträge zur botanischen Protistologie[M]. Leipzig: Gebrüder Borntraeger, 1924.
- [19] KRZEMIENIEWSKA H, KRZEMIENIEWSKI S. Die zellulosezersetzenden Myxobakterien[J]. Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences Lettres, Classe Sciences Mathématiques Naturelles, Série B, Sciences Naturelles, 1937, 75: 11-31.
- [20] IMSHENETSKI A, SOLNTSEVA L. On aerobic cellulose-decomposing bacteria (Russian, with English summary)[J]. Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des Sciences Mathématique et Naturelles. Série Biologie, 1936, 1115-1172.
- [21] DWORKIN M, GIBSON SM. A system for studying microbial morphogenesis: rapid formation of

- microcysts in *Myxococcus xanthus*[J]. Science, 1964, 146(3641): 243-244.
- [22] KAISER D, ROBINSON M, KROOS L. Myxobacteria, polarity, and multicellular morphogenesis[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2010, 2(8): a000380.
- [23] 龚亚. 黄色黏球菌中亲缘辨别及其机制研究[D]. 济南: 山东大学博士学位论文, 2018.
- GONG Y. Kin discrimination in *Myxococcus xanthus*[D]. Jinan: Doctoral Dissertation of Shandong University, 2018 (in Chinese).
- [24] 乔燕, 夏丞垚, 李永凯, 李周坤, 叶现丰, 罗雪, 黄彦, 曹慧, 崔中利. 黏细菌 *Coralloccoccus* sp. strain EGB 及其培养发酵液的安全性评估[J]. 微生物学报, 2022, 62(1): 227-241.
- QIAO Y, XIA CY, LI YK, LI ZK, YE XF, LUO X, HUANG Y, CAO H, CUI ZL. Toxicological evaluation of *Coralloccoccus* sp. strain EGB and its ferments[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(1): 227-241 (in Chinese).
- [25] 崔中利, 叶现丰, 张宇, 徐昌盛, 李周坤, 黄彦, 曹慧. 根际微生物组组装与植物健康[J]. 微生物学杂志, 2022, 42(6): 1-9.
- CUI ZL, YE XF, ZHANG Y, XU CS, LI ZK, HUANG Y, CAO H. The rhizosphere microbiome assembly and plant health[J]. Journal of Microbiology, 2022, 42(6): 1-9 (in Chinese).
- [26] ZHANG L, DONG CN, WANG JH, LIU MX, WANG JY, HU JX, LIU L, LIU XY, XIA CY, ZHONG LL, ZHAO YQ, YE XF, HUANG Y, FAN JQ, CAO H, WANG JJ, LI YZ, WALL D, LI ZK, CUI ZL. Predation of oomycetes by myxobacteria via a specialized CAZyme system arising from adaptive evolution[J]. The ISME Journal, 2023, 17: 1089-1103.
- [27] DWORKIN M. Nutritional requirements for vegetative growth of *Myxococcus xanthus*[J]. Journal of Bacteriology, 1962, 84(2): 250-257.
- [28] 王磊, 田长富, 楼慧强, 焦健, 梁鹏博, 毕国志, 李颖. 微生物生理学核心课程的建设探索[J]. 微生物学通报, 2024, 51(4): 1167-1174.
- WANG L, TIAN CF, LOU HQ, JIAO J, LIANG PB, BI GZ, LI Y. Exploration of the development of the core course Microbial Physiology[J]. Microbiology China, 2024, 51(4): 1167-1174 (in Chinese).
- [29] 李昂, 郭亮, 邢德峰, 刘冰峰, 谢国俊, 赵英, 林楠, 马放. 新工科背景下微生物生理学虚拟仿真实验教学模式探索: 以“微生物絮凝剂合成机制及应用”为例[J]. 微生物学通报, 2022, 49(4): 1312-1319.
- LI A, GUO L, XING DF, LIU BF, XIE GJ, ZHAO Y, LIN N, MA F. Exploration of virtual simulation experiment teaching mode of Microbial Physiology under new engineering background: taking the mechanism research and application of microbial flocculant synthesis as an example[J]. Microbiology China, 2022, 49(4): 1312-1319 (in Chinese).
- [30] SAH GP, WALL D. Kin recognition and outer membrane exchange (OME) in myxobacteria[J]. Current Opinion in Microbiology, 2020, 56: 81-88.
- [31] PHILLIPS KE, AKBAR S, STEVENS DC. Concepts and conjectures concerning predatory performance of myxobacteria[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1031346.
- [32] KAIMER C, WELTZER ML, WALL D. Two reasons to kill: predation and kin discrimination in myxobacteria[J]. Microbiology, 2023, 169(7): 001372.
- [33] SCHÄBERLE TF, LOHR F, SCHMITZ A, KÖNIG GM. Antibiotics from myxobacteria[J]. Natural Product Reports, 2014, 31(7): 953-972.