

教学研究

基于模块化构建与地图式导航的细胞生物学 蛋白质分选教学设计

舒畅¹ 叶能辉² 张宇杰¹ 甘露³ 常玲¹ 罗盼¹ 何玉池^{1*}¹湖北大学生命科学学院生物催化与酶工程重点实验室, 武汉 430062; ²湖南农业大学农学院, 长沙 410125;³汉江师范学院化学与环境工程学院, 武汉 430212)

摘要 蛋白质是生命活动的体现者, 靶向定位对于细胞发挥正常的功能至关重要。蛋白质分选是《细胞生物学》教学的重点和难点之一, 目前蛋白质分选内容大都分散在不同的章节, 学生难以构建整体的知识体系。该文分析了蛋白质分选部分的知识构成特点, 结合学生的学情分析, 创建了基于模块化构建与地图式导航的教学设计。将教材中关于蛋白质分选的内容综合成一个整体的知识模块, 分为上篇和下篇, 上篇主要讲述分泌型蛋白质的分选即共转运, 下篇主要讲述非分泌蛋白的分选即后转运, 两者有机衔接。结合蛋白质分选的路径展开地图式导航教学, 图文并茂的教学方式更有助于学生系统地掌握这一部分的知识, 更好地把分散在各个章节的相关知识有机地联系起来, 提高学生的逻辑思维能力、综合分析能力及迁移应用能力。

关键词 蛋白质分选; 模块化构建; 地图式导航; 共转运; 后转运

Teaching Design of Protein Sorting in Cell Biology Based on Modular Construction and Map Navigation

SHU Chang¹, YE Nenghui², ZHANG Yujie¹, GAN Lu³, CHANG Ling¹, LUO Pan¹, HE Yuchi^{1*}¹Key Laboratory of Biocatalysis and Enzyme Engineering, College of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China;²College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410125, China;³School of Chemistry and Environmental Engineering, Hanjiang Normal University, Wuhan 430212, China)

Abstract Proteins are the embodiment of life activities, and their targeting is crucial for cells to perform their normal functions. Protein sorting is one of the key and difficult points in the teaching of Cell Biology. Currently, the content of protein sorting is mostly scattered in different chapters, making it difficult for students to construct an overall knowledge. This article analyzes the knowledge composition characteristics of the protein sorting section, and combined with the analysis of students' academic situation, creates an instructional design based on modular construction and map navigation. Integrate the content of protein sorting in the textbook into a comprehensive knowledge module, which is divided into the first and second parts. The first part mainly focuses on the sorting of secretory proteins, namely, co-transport, and the second part mainly focuses on the sorting of non secretory

收稿日期: 2023-04-11

接受日期: 2023-07-29

国家自然科学基金(批准号: 31960068)和2022年湖北名师——何玉池细胞生物学名师工作室和湖北大学细胞生物学教学团队资助的课题

Received: April 11, 2023

Accepted: July 29, 2023

*通讯作者。Tel: 18986291880, E-mail: hyc@hubeu.edu.cn

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.31960068), and the 2022 Hubei Famous Teacher—He Yuchi Cell Biology Famous Teacher Studio and the Cell Biology Teaching Team of Hubei University

*Corresponding author. Tel: +86-18986291880, E-mail: hyc@hubeu.edu.cn

proteins, namely, post-transport. The two are organically connected. Combining the path of protein sorting with map-based navigation teaching, the teaching method with illustrations and texts is more conducive to students' systematic learning of this part of knowledge, better connecting relevant knowledge scattered in various chapters, and improving students' logical thinking ability, comprehensive analysis ability, and transfer application ability.

Keywords protein sorting; modular construction; map navigation; co-transport; post-transport

真核细胞内膜的精细分化使每个细胞内部含有多种不同的细胞器,各自执行专门功能,并相互协同构成复杂的细胞生命系统。蛋白质作为生命活动的执行者,其生命周期由合成、分选、降解等一系列过程相互衔接。蛋白质合成的细胞器主要为核糖体,此外线粒体和叶绿体也可以合成少部分蛋白质。蛋白质如何在合成与分配之间建立顺畅的分配运输体系显得尤为重要。蛋白质的转运是细胞内复杂的一项物质流动工程,其机制比较抽象,涉及细胞器多,流程复杂,学生难以理解。蛋白质的动态运输将彼此相对独立的细胞器相互衔接,可促进学生动态思维的培养,使学生学习细胞的整体智慧观念。本章学习我们需要回答一个核心问题,即蛋白质如何穿过细胞膜的屏障从而实现准确定位。

1 学生学习蛋白质分选的现状与问题

1.1 现有教材蛋白质分选部分的内容编排分析

细胞作为生命活动的基本单位,其内部各个结

构与功能存在关联,导致细胞生物学的知识点连接成网,不同的教材根据编者的逻辑顺序在内容编排上多种多样。本文主要分析了2020年高等教育出版社出版的以丁明孝教授为主编的《细胞生物学》(第5版)和2018年人民卫生出版社出版的以陈誉华、陈志南为主编的《医学细胞生物学》(第6版)两本教材中有关蛋白质分选的内容编排(表1)。《细胞生物学》教材的《第五章 细胞质基质与内膜系统》在高尔基体的介绍中简单提及了高尔基体参与溶酶体酶的包装与分选,在随后的溶酶体、过氧化物酶体知识点中描述了两者的发生过程。《第六章 蛋白质分选与膜泡运输》中具体阐明了信号肽假说、蛋白质分选转运的基本途径以及蛋白质向线粒体和叶绿体的分选等内容。在《第九章 细胞核与染色质》中,以核孔复合体的功能简要说明了亲核蛋白的核输入大致过程^[1]。《医学细胞生物学》的编排思路与《细胞生物学》大概相同,内质网、高尔基体、溶酶体和过氧化物酶体中有关蛋白质分选的知识被编排在

表1 《细胞生物学》与《医学细胞生物学》中蛋白质分选相关内容的章节分布表

Table 1 Distribution table of chapters related to protein sorting in "Cell Biology" and "Medical Cell Biology"

蛋白质分选的相关内容	《细胞生物学》	《医学细胞生物学》
内质网参与的蛋白质分选 (信号肽假说)	第六章 蛋白质分选与膜泡运输 第一节 细胞内蛋白质的分选	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第一节 内质网
高尔基体参与的蛋白质分选	第五章 细胞质基质与内膜系统 第二节 细胞内膜系统及其功能	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第二节 高尔基复合体
溶酶体的形成	第五章 细胞质基质与内膜系统 第二节 细胞内膜系统及其功能	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第三节 溶酶体
过氧化物酶体的形成	第五章 细胞质基质与内膜系统 第二节 细胞内膜系统及其功能	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第四节 过氧化物酶体
线粒体的蛋白转运	第六章 蛋白质分选与膜泡运输 第一节 细胞内蛋白质的分选	第六章 线粒体与细胞的能量转换 第一节 线粒体的基本特征
叶绿体的蛋白转运	第六章 蛋白质分选与膜泡运输 第一节 细胞内蛋白质的分选	无
蛋白质分选的基本途径和类型	第六章 蛋白质分选与膜泡运输 第一节 细胞内蛋白质的分选	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第五节 囊泡与囊泡转运
三种囊泡的工作机制、特点和作用	第六章 蛋白质分选与膜泡运输 第二节 细胞内膜泡运输	第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运 第五节 囊泡与囊泡转运
亲核蛋白的核输入	第九章 细胞核与染色质 第一节 核被膜	第八章 细胞核 第一节 核膜

《第五章 细胞的内膜系统与囊泡转运》中。线粒体蛋白和亲核蛋白的分选内容分别分布在《第六章 线粒体与细胞的能量转换》和《第八章 细胞核》中。总的来说,细胞生物学教材多以细胞的空间结构这一逻辑主线展开,蛋白质分选的内容分散于各个章节,未形成一个有机的整体。

1.2 蛋白质分选的知识特点分析

蛋白质分选所涉及的生物学知识广泛,具体分选路径复杂。根据分选路径可分为两种主要方式,一种是分泌型蛋白的共翻译转运途径,另一种是非分泌型蛋白的翻译后转运途径。根据分选机制不同,蛋白质的转运分为跨膜转运、膜泡运输、选择性门控转运和细胞质基质中的蛋白质转运四种机制。信号肽假说是学生学习分泌型蛋白合成的重要支点;COP I、COP II和网格蛋白衣被小泡作为膜泡运输的主力军,其相关知识点更加需要学生牢固掌握,以便学生能理清蛋白分选过程;非分泌蛋白质分选的目的地包括细胞核、叶绿体、线粒体和过氧化物酶体等,因此清楚各种细胞器的结构是学习跨膜运输的基本前提。而各种细胞器的转位复合体是学生在学蛋白质定向转运之前首先要掌握的基础。此外,蛋白质分选最突出的特点就是动态性。新生肽从核糖体转移到内质网膜、蛋白运输中在信号识别、蛋白跨膜、信号肽切除、膜泡的靶向运输、沿轨道运输以及货物卸载等动态过程中都蕴含着复杂而精巧的机制^[2]。

1.3 学生的学情分析

细胞生物学授课对象一般为大学二年级学生,他们由上学年植物生物学、动物生物学的学习转入本学期细胞生物学的学习,知识内容由宏观具体过渡到微观抽象,学生本身需要克服知识类型转变的心理障碍,并且蛋白质分选的知识点众多,综合分析及应用难度大,教学内容缺乏与社会生活的直接联系。学生在学习过程中难免产生畏惧情绪,学习兴趣也大幅度降低^[3]。在多年的教学实践中,依据课堂互动情况和有关测试结果发现学生对本章的内容掌握零散不成体系。例如,学生虽清楚信号肽、信号识别颗粒(signal recognition particle)和停泊蛋白(docking protein)共同协助完成蛋白质在糙面内质网的合成过程,但并不清楚信号假说和溶酶体形成的关系。由于知识分散在不同的章节,课堂上学生只是被动地跟着老师的指挥棒,很少自己思

考,难以把学过的知识形成整体关联,掌握的知识也都是片段化的。在学生在学习状态上,笔者发现学生学习这部分知识比较吃力,对微观动态的分子机制学习兴趣不足,不能通透地理解各类蛋白质的分选途径。探索出高效的蛋白质分选相关内容的教学方法,是教师提高细胞生物学教学水平的必然选择,也是培养时代发展需要的生物专业人才的必然要求^[4]。

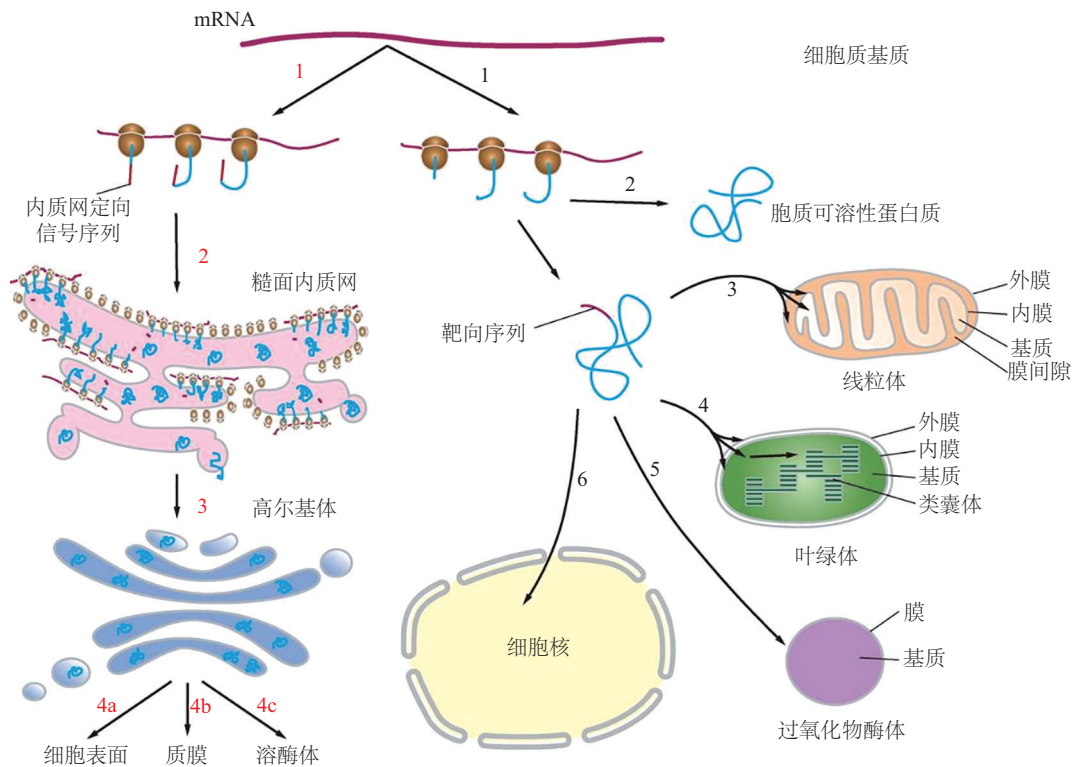
2 地图式导航的《细胞生物学》蛋白质分选的教学设计

2.1 地图式导航学习模式的建立

考虑到蛋白质分选的内容复杂,传统的讲授法容易使学生的思维不清,而难以达到教学目标。笔者参考思维导图的设计思路,结合地图导航的生活情境,建立地图式导航的学习模式。绘制蛋白质分选的形象地图,以图画生动展现各个细胞器、以箭头清晰导向流程关系,类似地图指导学生按地图探索出蛋白质分选的路径。在整个教学过程中,始终贯穿体现本章整体思想的“蛋白质分选地图”(图1)这一辅助工具。在讲课之前教师带领同学们熟悉知识地图,达到“一览众山小”的目的,学生想象自己站在山顶俯瞰山下风景,呈现的所有内容将一目了然;学习的中间时段,运用地图回顾已讲知识,展望即将学习的新内容;在课程学习完之后,教师给同学们布置看图说话的小结任务,让每个同学能够做到对照着图,逐一讲解不同的内容。以类比、想象作为本模块的学习方法,将真核细胞比喻成需求方,蛋白质的合成类比成供给方,蛋白质的输送类比成物流,蛋白质的分选类似于快递分配。蛋白快递的配送依据分选地图,沿导航路轨,以各自的运输方式精准而高效完成,以此切入教学内容,新颖直观,可降低教学难度。

2.2 地图式导航引出蛋白质转运的两条路径

以多媒体直接展示蛋白质分选地图开启课堂,同时给每个同学分发一张彩色的纸质地图(图1),“开门见山,揭示新课”,指出本次学习以蛋白质分选的两条路径为主线,分为上下两篇^[5]。上篇学习共翻译转运途径,涉及膜泡运输和溶酶体的形成,下篇学习翻译后转运途径,主要是叶绿体、线粒体、过氧化物酶体的蛋白转运。这使学生清楚本章内容的教学思路,方便学生有目的地学习。



图右侧(黑色序号)代表蛋白质翻译后转运途径: 1: mRNA在游离核糖体上完成多肽链的合成; 2: 不含信号序列的蛋白驻留在细胞质基质中; 3~5: 依据不同靶向序列, 蛋白质分别跨膜运输至线粒体、叶绿体和过氧化物酶体; 6: 蛋白质通过核孔复合体门控运输方式转运至细胞核。图左侧(红色序号)代表蛋白质共翻译转运途径: 1: mRNA游离核糖体上起始合成, 然后在信号肽及其结合的SRP引导下与内质网膜结合并完成蛋白质合成; 2: 在rER完成蛋白质合成; 3: 蛋白质以膜泡运输方式转运至高尔基体; 4a、4b、4c: 蛋白质以膜泡运输方式分选至细胞外、质膜和溶酶体。

The right side of the figure (black serial number) represents the protein post translation transport pathway. 1: mRNA completes the synthesis of polypeptide chains on free ribosomes; proteins without signal sequences reside in the cytoplasmic smatrix; 3-5: according to different targeting sequences, proteins are transported across the membrane to mitochondria, chloroplasts, and peroxisomes, respectively; 6: proteins transported to the nucleus through nuclear pore complex gated transport. The left side of the figure (red sequence number) represents the protein co-translation transport pathway. 1: mRNA starts synthesis on free ribosomes, and then binds to the endoplasmic reticulum membrane under the guidance of signal peptides and their bound SRPs to complete protein synthesis; 2: complete protein synthesis in rER; 3: proteins transport to Golgi apparatus through membrane vesicle transport; 4a, 4b, and 4c: proteins are sorted into extracellular, plasma membrane, and lysosomes through membrane vesicle transport.

图1 蛋白质分选地图(图片源自参考文献[1])

Fig.1 Protein sorting map (image sourced from reference [1])

3 模块化构建蛋白分选的整体内容

模块化综合依托老师良好的教学组织能力, 科学地将内在逻辑联系紧密, 学习方式和教学目标相近的教学内容细分为彼此独立的不同模块, 组合形成个性化模块化课程体系^[6]。基于模块化教学理念, 从知识的整体和连贯性出发, 模块化构建蛋白分选的整体教学内容。模块化知识体系如图2所示。从蛋白质属性、转运次序、转运目的地以及转运机制4个层面剖析蛋白质分选的相关内容。本教学设计以丁明孝主编的《细胞生物学》(第5版)为参考教材, 结合学生学习的现状与问题, 根据教学内容重新编排教材知识点, 以模块化教学理论为指导, 将蛋白质分选作为整个模块综合起来, 划分为上篇部分包括

共翻译转运的蛋白质分泌途径和下篇部分包括翻译后转运的非分泌途径^[7]。

在蛋白质分选综合为整个模块的基础上, 按照蛋白的属性分为分泌型蛋白质和非分泌型蛋白质, 并以此为线索开展蛋白分选次序, 分选目的及分选机制的学习。共翻译转运是分泌型蛋白的运输途径, 转运目的地有细胞表面蛋白、质膜蛋白、溶酶体等。事实上内质网、高尔基体中蛋白质的分选亦属于分泌型蛋白质的共转运途径, 皆通过膜泡运输的机制完成分选任务。将《第五章 溶酶体的发生》作为分泌型蛋白分选的特例, 在讲完分泌型蛋白分选的机制后再讲述, 这样避免了之前学生缺乏相关蛋白分选背景而带来的理解障碍, 也使学生更深刻地

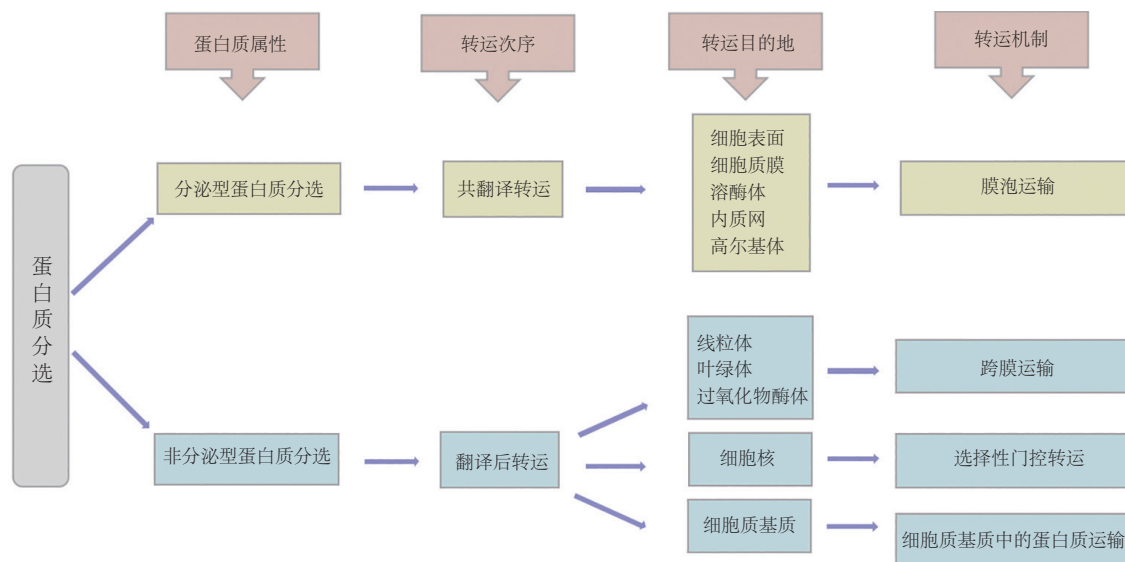


图2 蛋白质分选模块化示意图

Fig.2 Schematic diagram of protein sorting modularization

理解溶酶体的发生与蛋白分选的关联。翻译后转运是非分泌型蛋白的运输途径，转运目的地有细胞核、叶绿体、线粒体、过氧化物酶体及细胞质基质蛋白。教师首先进行教材内容的重新编排，将分散在不同章节的内容开展有机整合，例如将过氧化物酶体的发生、亲核蛋白的输入等相关内容与线粒体、叶绿体蛋白的分选转运融为一个整体来开展教学。通过模块化构建，引导学生对本章内容整体把握，从而提升相关内容的逻辑性及连贯性，提高学生学习效率^[8]。

蛋白质分选具有其高度动态性，与细胞的生理状态、发育时期以及功能特点密切相关。在这章的学习过程中，要引导学生在地图式导航的基础上建立动态观念，与大分子运输的胞吞和胞吐途径相联系，尤其将组成型胞吐和调控型胞吐与蛋白质运输相联系。认识到蛋白质靶向运输和信号转导类似也具有“交叉对话(cross talk)”调控网络，并非单一固化的分选路径。同时如果采用定量细胞生物学的方法和思想^[9]，将相关内容量化则更有助于学生掌握相关重难点。

4 模块化教学中教学场景及方法的应用

4.1 类比包裹派送，认识共翻译转运途径及靶向运输

分泌型蛋白的转运涉及蛋白质的合成、输送和接受，过程繁杂。教师可以采用逐层深入“剥洋葱式”

的方式，引导学生运用类比方法来学习。通过对分泌型蛋白的合成、输送和接受与物资的生产、派送、签收进行类比，搭建知识和生活联系的桥梁，促进知识有效迁移，从而达到揭示蛋白质转运过程的本质的目的，使学生的注意力轻松聚焦于知识讲授^[10]。理解信号假说是学习共翻译转运途径的第一步，其中多肽由游离核糖体输送到内质网，进而继续合成，类似于商品的生产从一家工厂转移到另一家工厂完成制造。新生肽链N-端的信号肽类似于导弹的靶向部分，指导多肽成功到达蛋白质转运的第一驿站——内质网。紧接着提问学生：分泌型蛋白到达内质网后，下一站是哪？学生根据蛋白质分选地图，顺理成章地知道下一目的地是高尔基体以及细胞的不同部位。教师进而逐步一一解析内质网如何跨膜转运至高尔基体、网格蛋白有被小泡如何靶向定位，层层递进，使学生最终明了分泌性蛋白质如何通过信号肽指引、膜泡运输实现定向转运。

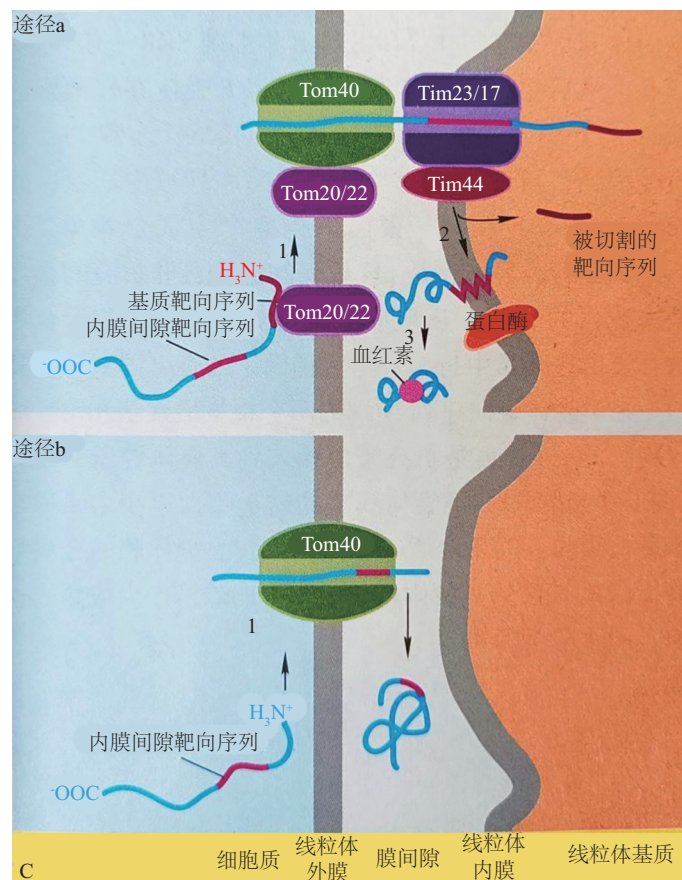
4.2 着手区室化亚细胞结构，细化翻译后转运途径

学完共翻译转运途径后，教师再次展示蛋白质分选地图，引导学生回顾上篇内容，这不仅帮助学生理顺分泌型蛋白的转运路径，更明确地表明了接下来的学习任务——非分泌型蛋白的转运途径。后转运途径在讲解过程中要注重各个细胞器的独特结构，分析蛋白质的定位特点以及具体路径。如线粒体和叶绿体二者的亚细胞结构存在极为相似的地

方, 可以将二者类比分析。细胞核蛋白和过氧化物酶体蛋白的定位具备自身的特性, 单独讲解。但四个细胞器之间也具有一些共同的特点, 比如都是通过后转运方式完成。这部分的内容在教学设计时应更加注意平行的联系以及比较, 其与共转运部分教学设计相比具有很大不同。

我们以线粒体膜间隙蛋白的输入为例进行教学设计。在教学过程中, 教师引导学生参考教材《细胞生物学》(第5版)呈现的线粒体蛋白转运图示(图3), 将线粒体膜间隙蛋白的输入途径a类比考生到指定考场参加笔试, 将线粒体膜间隙蛋白比作考生, 将线粒体的区室化结构比作考场的空间结构, 膜间隙蛋白N-端带有的内膜间隙靶向序列和基质靶向序列仿佛是考生所带的考试必备的准考证, 指明考生参加考试的准确位置。内外膜接触点附近的输入受

体(Tom22/20)是教学楼外检查身份的“保安”, 他们只允许此处的“考生”入内。保安Tom22/20识别了考生膜间隙蛋白带有的基质靶向序列后, 考生同样依据准考证上基质靶向序列经过考生专用通道Tom40和Tim23/17找到考场教室, 而后根据准考证上的内膜间隙靶向序列找到对应的座位号, 即完成蛋白质准确定位于线粒体膜间隙的过程。另一种膜间隙蛋白的转运途径b则可以类比考生参加面试, 只需要依据准考证上的内膜间隙靶向序列找到面试教室即可。此教学片段的设计将抽象的知识置于具体的情境之中, 在方便学生理解的同时, 加深了学生对该知识点的印象, 达到使学生过目不忘的效果。鉴于叶绿体的蛋白输入过程与线粒体基本相似, 可以让学生以小组协作的方式, 自主学习叶绿体基质的蛋白输入。



途径a中1: 前体蛋白与输入受体(Tom20/22)结合, 被引进输入通道(外膜为Tom40, 内膜为Tim23/17); 2: 蛋白质在转运过程中被内膜上蛋白酶于膜间隙一侧切割; 3: 释放的蛋白质折叠并与血红素结合。途径b中1: 蛋白质通过外膜Tom40输入孔直接进入膜间隙。

Pathway a 1: the precursor protein binds to the input receptor (Tom20/22) and is introduced into the input channel (Tom40 in the outer membrane and Tim23/17 in the inner membrane); 2: the protein is cut by the protease on the inner membrane on the membrane space side during transport; 3: the released protein folds and binds to heme. Pathway b 1: protein enters the membrane space directly through the outer membrane Tom40 input well.

图3 线粒体膜间隙蛋白的输入(图片源自参考文献[1])

Fig.3 Input of mitochondrial membrane gap proteins (image sourced from reference [1])

4.3 蛋白质共翻译转运和后翻译转运的异同比较

共翻译转运和后翻译转运都是蛋白质进行翻译、转运和加工才能实现功能性活性的途径,其过程存在共性和差别,引导学生比较两者的异同能帮助学生进一步理解蛋白质的合成和转运。共转运蛋白质的合成主要表现为在游离核糖体上起始合成,当合成一段蛋白质之后,蛋白质在信号肽的指引下,转位到粗面内质网边合成边转运,需借助膜泡实现靶向运输,其分选目的地一般为细胞膜、溶酶体等。而后翻译转运的蛋白质需在游离核糖体上完成合成之后才能开启转运,最终在细胞核、线粒体、叶绿体等胞内环境发挥相应功能。不论是共翻译转运还是后翻译转运,二者都需要特定的靶向序列为指引,但具体过程存在较大差异,需要在分析比较其异同中深入理解。

4.4 蛋白质分选的地图导航式总结分析

学生学习完蛋白质分选的全部内容后,容易混淆其中部分概念,因此章末总结对学生清晰掌握蛋白分选的整体模块起着尤为重要的作用。本教学设计以学生熟悉的蛋白质分选地图为中心展开知识复习,教师通过提问的方式,使学生围绕蛋白分选路径以及细胞器内部结构示意图重温蛋白质运输的细节内容。这不仅有助于学生脉络清楚地理清整个模块,建立整体观^[1],同时也能保证学生知识体系的系统性和完整性,从而充分体现了“学生为主体、教师为主导”的教育理念。

5 教学效果及教学反思

本次教学设计基于模块化构建与地图式导航的思路,灵活调整授课顺序,生动展开教学。模块化构建将蛋白质分选作为一个整体进行课程讲解,重视整体模块内容的理解,帮助学生构建较为清晰的理论知识框架,解决学生学习知识零散不成体系的问题^[12]。地图式导航将复杂生硬的理论知识转化为形象的动态过程,突破了教学重难点,增强了教师课堂教学的趣味性。除此之外,类比、想象等多种教学方法的使用易化了知识的理解。通过对湖北大学生命科学学院2021级生物科学试点班52人的学习情况进行调查发现:在过程性评价中,学生小组成员互动频繁,平均每小组成员发言次数从过去的2次增加到4次,课堂参与讨论积极,75%的学生在课堂中都积极回答问题,课堂成果展示质量提高,90%的学生

展示的课堂作业符合预定标准。在结果性评价中,学生的期末综合测试成绩较往届得到提升,平均分由76分提高到83分。

细胞作为一个统一的有机整体,其内部各个结构和功能的关联性为教师灵活教学提供了可能。学生可以将模块化及地图式导航拓展到本课程的其他章节以及其他课程的学习中。例如,可以将细胞膜的特性作为起点,通过在地图上添加分支,展示与细胞膜相关的知识点,如细胞内外环境、细胞通讯、细胞识别与吞噬等。在这种教学思路的指引下,教师可对细胞生物学的整个内容“谋篇布局”,在适当的组合和变换中优化课堂要素^[13]。

——致谢

感谢北京大学生命科学学院丁明孝教授和四川大学生命科学学院邹方东教授对本论文的指导!

参考文献 (References)

- [1] 丁明孝,王喜忠,张传茂,等.细胞生物学,第5版[M].北京:高等教育出版社(DING M X, WANG X Z, ZHANG C M, et al. Cell biology, 5th Edition [M]. Beijing: Higher Education Press), 2020: 100-43.
- [2] 张泰军,邹光萍.细胞内蛋白质的合成以及分选[J].新一代(ZHANG T J, ZHOU G P. Synthesis and sorting of proteins in cells [J]. New Gene Ration), 2018, 18(3): 101-2.
- [3] 翟中和.我对写《细胞生物学》教材的一些想法[J].高校生物学教学研究(电子版)(ZHAI Z H. My thoughts on the textbook of cell biology [J]. Biology Teaching in University, Electronic Edition), 2013, 3(1): 3.
- [4] 陈凌懿,王春国,朱玉山,等.细胞生物学SPOC课程的建设与实践[J].高校生物学教学研究(CHEN L Y, WANG C G, ZHU Y S, et al. The construction and practice of the small private online course of cell biology [J]. Research on College Biology Teaching), 2022, 12(2): 12-5.
- [5] 美荣,苏亚拉图,乌云达来.高等师范院校细胞生物学课堂教学改革与探索[J].中国细胞生物学学报(MEI R, SUYA L T, WUYUN D L. Reform and exploration of cell biology classroom teaching in normal universities [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2022, 44(8): 1644-50.
- [6] 何玉池,熊雨果,彭勃,等.模块化和“部分游离教材”的细胞生物学教学体系的建立研究[J].中国细胞生物学学报(HE Y C, XIONG Y G, PENG B, et al. Research on the establishment of cell biology teaching system based on modularization and “partial free textbook” [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2020, 42(1): 125-9.
- [7] 甘露,王桂友,张亚春,等.模块化设计和微课应用在研究生课程教学中的实践研究——以分子细胞生物学课程为例[J].中国细胞生物学学报(GAN L, WANG G Y, ZHANG Y C, et al. Practical research on modular design and micro course application in postgraduate course teaching: taking molecular cell biology as an example [J]. Chinese Journal of Cell Biology), 2014,

- 36(12): 1674-9.
- [8] 邵一江, 刘红. 基于能力导向的模块化教学体系构建——合肥学院模块化教学改革的理论与实践[J]. 合肥学院学报(SHAO Y J, LIU H. The construction of modular teaching system based on ability orientation: theory and practice of modular teaching reform in Hefei University [J]. Journal of Hefei University), 2013, 12(4): 11-6.
- [9] WALL M E. Quantitative biology: from molecular to cellular systems [M]. CRC Press: Boca Raton, 2019: 121-52.
- [10] 陈红俊, 孙天山. 类比: 一种有效的教学方法[J]. 化学教与学 (CHEN H J, SUN T S. Analogy: an effective teaching method [J]. Chemistry Teaching and Learning), 2014, 21(2): 75-7.
- [11] 崔继红, 李军林, 黄萱, 等. 细胞生物学课程教学的思考与实践 [J]. 生物学杂志(CUI J H, LI J L, HUANG X, et al. Thinking and practice of cell biology teaching [J]. Journal of Biology), 2020, 37(3): 115-7.
- [12] 高伟霞, 李玉. 模块化教学在代谢工程与合成生物学中的探索实践[J]. 中国轻工教育(GAO W X, LI Y. Exploration and practice of modular teaching in metabolic engineering and synthetic biology [J]. China's Light Industry Education), 2021, 11(4): 80-4.
- [13] 袁惠君, 冯再平, 鲍婧婷, 等. 基于问题驱动和思维导图的细胞增殖调控教学设计[J]. 高校生物学教学研究(YUAN H J, FENG Z P, BAO J T, et al. Teaching design of cell proliferation regulation based on problem driven and mind mapping [J]. Research on College Biology Teaching), 2022, 12(1): 61-5.