化学家

卡罗琳·露丝·贝尔托西——诺贝尔化学奖史上第八位女性得主

陈彪¹ 朱玥玮¹ 李婷婷¹ 陈羽² 王燕¹ 李功¹ 吴又进^{1*}⁽¹⁾中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026; ⁽²⁾贵港市高级中学 贵港 537100

摘要 卡罗琳·露丝·贝尔托西因开创了生物正交化学而获得2022年诺贝尔化学奖,该反应使科学家能够在不破坏细胞正常化学功能的情况下探索细胞、跟踪生物过程并实现了多种应用,提高了人类探索生命运动的能力和医学药物治疗的发展水平。通过回顾贝尔托西的研究背景以及相关的科研历程,提出了重视自主研究能力,在实践探索中收获无限可能;关注跨学科知识生产,在交叉领域开拓学科前沿;发挥科研“她”力量,更加多元与开放包容的思考与启示。

关键词 卡罗琳·露丝·贝尔托西 2022 诺贝尔化学奖 生物正交化学

Carolyn Ruth Bertozzi: The Eighth Woman to Win the Nobel Chemistry PrizeChen Biao¹, Zhu Yuewei¹, Li Tingting¹, Chen Yu², Wang Yan¹,
Li Gong¹, Wu Youjin^{1*}

⁽¹⁾ Department of History of Science and Scientific Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026; ⁽²⁾ Guigang Senior High School, Guigang, 537100

Abstract The Nobel Prize in Chemistry 2022 was awarded to Carolyn Ruth Bertozzi for the development of bioorthogonal chemistry. This reaction enables scientists to explore cells and track biological processes without disrupting the normal chemistry function of cells and has achieved multiple applications and improving the development level of human exploration of biological fate and medical drug therapy. By reviewing Bertozzi's research background and related scientific research history, the author points out that we should attach importance to the ability of independent research, gain infinite possibilities in practical exploration, and pay attention to the production of interdisciplinary knowledge, so as to open up interdisciplinary frontiers in cross-cutting fields Give full play to the power of “Her” in scientific research, more pluralistic and open and inclusive thinking and enlightenment.

Keywords Carolyn Ruth Bertozzi, The Nobel Prize in Chemistry 2022, Bioorthogonal chemistry

2022年10月5日,卡罗琳·露丝·贝尔托西(Carolyn Ruth Bertozzi)、摩顿·梅尔达尔(Morten Meldal)和卡尔·巴里·夏普莱斯(Karl Barry Sharpless)因“为点击化学(click chemistry)和生物正交化学(bioorthogonal chemistry)的发展”做出突出贡献而获得2022年诺贝尔化学奖^[1]。梅尔达尔和夏普莱斯的研究成果奠定了点击化学的基础,而贝尔托西则将点击化学应用在生物体中,开创了生物正交化学,对于提高癌症药物的靶向性和开发新的癌症疗法等具有巨大的帮助^[2]。

贝尔托西是诺贝尔化学奖史上的第八位女性得主^[3]。

1 科研之路

1.1 学术之家中的多面人生

贝尔托西于1966年出生在美国马萨诸塞州波士顿,父亲威廉·贝尔托西(William Bertozzi)是麻省理工学院的物理学教授^[4]。她的父亲经常带她和姐姐安德里亚·贝尔托西(Andrea Bertozzi)去他工作的地方,也会叫上她们一起修理家里坏

* 联系人,吴又进 博士,副研究员,主要从事科技史、科技考古相关教学与研究,E-mail: yjwu@ustc.edu.cn

安徽省高等学校省级质量工程项目(2022szsfc010,2022yjxggjy031,2022yjxggjy030,2019jyxm0014,2014jyxm015)和中国科学技术大学校级教学研究项目(2023xjyxm060,2022yehx10,2022ycjg14,2022xjyxm009,2018jyy13,2020kszc062,2021ycjg12,2021kszc035)资助

2023-01-20 收稿,2023-03-15 接受

掉的机器,她们在这些过程中潜移默化地接受了许多科学教育。“科学是家庭的焦点”,贝尔托西说,“我们穿着麻省理工学院的T恤,参加麻省理工学院的日间夏令营。”父亲经常问她们将会在哪里获得博士学位,她说:“他想让我们姐妹都去麻省理工学院——这是一种自豪感和免学费承诺的混合”^[5]。但是令父亲沮丧的是贝尔托西和她的姐姐都没有选择麻省理工学院,贝尔托西选择了哈佛大学,后在1996年成为加州大学伯克利分校的全职教师,2000年开始成为霍华德·休斯医学研究所的研究员,2015年至今在斯坦福大学任化学教授^[6];她的姐姐则选择了普林斯顿大学,之后在加州大学洛杉矶分校任教,是一名数学家,擅长非线性微分方程,是美国科学院院士^[7]。

虽然家中有着极为浓厚的学术氛围,但是贝尔托西起初并没有把科学放在最重要的位置,她小时候想要成为职业足球运动员,也曾想成为摇滚乐手。中学期间,贝尔托西擅长多种运动,不仅篮球打得好,还喜欢踢足球,甚至因为足球踢得好而被哈佛大学录取,并获得了哈佛大学的体育奖学金^[8]。高中时,贝尔托西对音乐也很感兴趣,且多次在作曲和音乐方面获奖,她一心想进入音乐系,但“我父母不希望我这么选择。我有一个亲戚从事音乐事业,最后却通过在银行上班来支付房租。我不太敢违抗他们”^[9]。也许是因为家庭教育的原因,认为自己“总要以科学为中心”,贝尔托西最终选择了生物学^[9]。

在哈佛大学学习期间,贝尔托西也没有荒废她的音乐事业,和几个好朋友一起组建了金属摇滚乐队——厌学乐队(Bored of Education)并担任键盘手。厌学乐队经常被邀请在哈佛大学以及波士顿的各大高校的派对上表演,靠着这些演出费,她赚到了自己的学费。1986年,厌学乐队还赢得了常春藤联盟的乐队之战,摇滚明星汤姆·莫雷罗(Thomas Morello)当时是该乐队的核心吉他手^[10]。

“作为性少数人群的一员,我不想要‘被容忍’,而是想要平等”^[11]。贝尔托西在大四时决定申请有机化学的博士课程时,她调查了不少研究生院,发现伯克利有她喜欢的自由、灵活、挑战以及深夜实验性马拉松的实验室文化,认为“这就是对的地方了”;更好的是,伯克利还是一个研究生物学和化学相结合新兴领域热点的高校。贝尔托西说,“那时,在化学博士项目

中,无论是学生还是教师,都没有多少女性。我希望能找到一个女性更有平等权利的地方”^[5]。之后,她经常言明自己曾经经历的挑战,并一直为女性和其他少数群体发声,为后来者开辟前进的道路。2007年,贝尔托西因在应用化学帮助解决与人类健康和疾病相关的生物学问题方面取得了杰出成就而获得了表彰性少数群体(Lesbian, Gay, Bisexual, Transgender and Queer, LGBTQ)科学家年度奖^[12]。

源于自己的经历,贝尔托西在构建自己的实验室时十分重视多元化、公平性和包容感,从她的实验室成员来看,其多样性高于一般化学实验室^[10],如在伯克利的研究生课程中女生平均占30%,而她的实验室则超过了一半;此外她的实验室还有来自不同背景的人,比如少数民族、弱势群体、LGBTQ社区的成员等^[13]。她认为实验室成员多元化,对于科学的成功也是很重要的,“身边有一群来自不同背景、拥有不同心态和思维的人,能帮你成为一个更好的、更有影响力的科学家”^[10]。同时,身为女科研工作者,她也十分关注女性的权益。

当诺贝尔化学奖采访提及她是第八位获得该奖项的女性时,贝尔托西表示,她既为又增加一名女性得主感到欣慰,又遗憾很多女性科学家没有得到应有的荣誉。在历史上相当长的一段时间里,女性科研工作者被社会历史条件刻画为微不足道的“助手”和“杂工”,湮没在了历史之中^[14]。“她们做了非常重要的工作,只是很少有机会得到认可”“有那么多了不起的女科学家。我想会看到她们越来越多(出现在诺贝尔奖的表彰中)”^[15]。

1.2 向着有机化学研究前进的沿途

贝尔托西刚读大学时,选择的是医学预科课程,且在大一结束时决定主修生物学。在她修习医学预科课程时,对于作为必修选项的化学,她认为,普通的化学课程只是作为必须应付过去的选修课。而与化学结缘的转机,是在她学习的生物专业要求其必须学习有机化学课程上,她的同学们大多都抱怨有机化学艰涩难懂且要背很多知识,而她从中发现了别样的乐趣,认为那正可匹配上她的大脑。之后不久,她主动从生物转向了有机化学。

但是贝尔托西的有机化学研究之旅并没有她想象中的顺利。哈佛大学非常鼓励理科学生在假

期去实验室做研究,贝尔托西在大二结束后也想要寻找进入有机化学实验室的机会,积累有机化学的科研经历,但化学实验室都满了。最后,贝尔托西选择去了马萨诸塞州眼耳实验室研究细胞膜氧化损伤问题,并学习了相关的激光眼科手术知识^[9]。

之后,贝尔托西越级选修了研究生一年级的物理有机化学课程,认识了一些有机化学的毕业生并且参观了他们的实验室,她本以为暑假可去做研究,但并未如愿。于是,贝尔托西只能另辟蹊径,去了生物化学实验室。1988年,贝尔托西终于成功地在研究物理化学的助理教授乔·格拉博夫斯基(Joe Grabowski)的课题组参与光声量热计项目,在该项目,她需自主搭建和组装仪器来测量化学反应产生的声波,以此测量化学反应所产生的能量并将其数字化。贝尔托西刚开始也不知道如何下手,经过摸索和实验,等到离开实验室时,她已经为实验室留下了一个能够测量声波,且可将所捕获的模拟信号转化为图表的仪器。贝尔托西用该项目的相关研究内容写了本科论文,她也因此于1988年获得哈佛大学化学最高荣誉学士学位。这段项目经历虽与她之后从事的研究工作没有关联,但她认为那教会了她一个道理:问题的解决并非一蹴而就,只要每天坚持做一些事情,不断清除路上杂草,道路就会愈发清晰;接受超出能力范围的项目能迫使自己竭尽全力地解决问题^[9]。

大学毕业后,贝尔托西进入伯克利跟随马克·贝德纳斯基(Mark Bednarski)教授开展糖科学的化学合成研究,她对贝德纳斯基当时正在研究的神经氨酸酶抑制剂米韦来扎(Zanamivir)和奥司他韦(Oseltamivir)以作流感药物很感兴趣,并且投身其中。不久贝德纳斯基因确诊了结肠癌而转攻医学,希望找到治疗癌症的方法。贝尔托西和两名同组的研究生留在了没有导师的课题组,不但要自行推进自己的研究课题,还要管理实验室,向学术期刊投稿。虽然这个过程充满了沮丧和不顺,但让贝尔托西提前了解了如何管理一个课题组、实验室,学会了如何更积极高效地完成工作,也奠定了她未来职业发展的基础^[9]。

1.3 糖科学与生物正交化学

20世纪90年代以来,生物化学和分子生物学快速发展。而对于许多生物过程有着重要作用的聚糖,却没有受到应有的关注,分子生物学的新工具也难以很好地在聚糖的研究中得到有效

应用^[2]。

1993年贝尔托西博士毕业后,前往加州大学旧金山分校史蒂文·罗森(Steven D. Rosen)教授的免疫学实验室进行博士后研究。在博士后的研究工作中,贝尔托西发现作为和蛋白质、核酸一起构成生命体关键组分的聚糖,因其结构复杂、缺少规律和非模板合成的特点,现有的工具无法有效追踪聚糖在生物体内作用时的位置和发挥的作用,亟待开发更好的工具和方法。因此这也成了贝尔托西1996年回到伯克利工作的第一项科研任务——研发糖蛋白的成像技术^[16]。

贝尔托西想到把探针放在糖蛋白上,以此来监测它们。由此产生了通过糖蛋白的细胞饮食中的代谢前体将标签插入其中的代谢标记方法,但探针太大,不能直接插入,且会被酶破坏。“我有一个想法,也许化学家会推动一些糖科学革命,”^[17]贝尔托西从Siglec(sialic acid/immunoglobulin superfamily/lectin,唾液酸结合免疫球蛋白样凝集素)寻找唾液酸聚糖中得到启示,通过在糖蛋白上做化学标记,再添加探针的方式监测糖蛋白。基于此,贝尔托西对施陶丁格(Staudinger)反应进行优化,开发出了施陶丁格-贝尔托西连接(Staudinger-Bertozi ligatio)的全新化学反应^[18],该反应可将荧光标签试剂添加在细胞中的特定糖蛋白上,而且不会干扰细胞的其他生化反应^[2]。她将这种反应称为“生物正交化学”,该反应开辟了一片全新的天地,它可以发生在生物体内,而且不会与任何原生生物过程相互作用或干扰,科学家们可以通过该反应清楚地看见糖蛋白在细胞表面的分布情况,研究生物体内进行的化学反应。

在这之后,贝尔托西在夏普莱斯和梅尔达尔的“点击化学”的基础上对生物正交化学反应技术进行了优化。她利用叠氮基团和具有很大环张力的含氟环辛炔研发出了无铜化改进版点击化学,克服了原有的点击化学细胞毒性,加快了反应速率。该反应就是菌株促进的叠氮化物-炔烃环加成(strain-promoted azide-alkyne cycloaddition, SPAAC)反应^[2]。这是一种对生物体更为无害的反应,使得生物正交化学反应更为快速、高效,能够观测到细胞中糖蛋白随着时间的推移而产生的变化。这一项新的突破,使得生物正交化学反应技术得到了更为广泛的应用。生物正交反应的出现以及迅速发展,为标记糖质以及蛋白、核酸等各类生物分子提供了

一种全新的工具。人们可以通过此技术观察细胞中的蛋白质等其他生物分子的积累情况,更重要的是可以利用此技术研发新的治疗癌症的药物,或者可以创造全新的材料,造福人类。

贝尔托西在关注科学的同时,也在考虑如何利用科学发现去拯救人类、造福世界。她的课题组主要关注创新方法的开发,比如生物正交化学反应技术的开发,以及新技术的运用。2015 年贝尔托西到斯坦福大学任职,协助领导 Sarafan ChEM-H 研究所(Sarafan ChEM-H institute),2020 年被任命为该研究所董事,研究与化学、工程、医学与人类健康相关的课题,探索如何在生物医学领域应用有机化学等技术治疗人类疾病^[13]。贝尔托西在诺贝尔化学奖采访中表示:“当世界陷入危机,就让化学来拯救一切”^[15]。

除了诺贝尔化学奖,贝尔托西还获得了很多荣誉。她 33 岁时获得麦克阿瑟天才奖(MacArthur Fellowship)^[19],是世界上获该荣誉最年轻的科学家;2010 年,成为首位获得勒梅尔森-麻省理工学院奖的女性科学家;2014 年,成为美国化学会首个同行评审的开放获取期刊《ACS Central Science》的主编^[20]。

2 思考与启示

2.1 重视自主研究能力,在实践探索中收获无限可能

自主研究能力是研究者开展研究活动并完成研究任务时表现出的综合特征,包括自我驱动力、自发洞察力、自觉审辩力和自律执行力^[21]。贝尔托西的科研之路,充满了自由探索、自主研究和实践出真知的色彩。从本科时期的暑假辗转在医院实验室、物理化学实验室,进行着搭建仪器、测量声波、计算机编程等多学科与多类别的工作;到攻读博士时自主推进课题研究,取得博士学位;再到大胆地将点击化学运用到糖科学领域,实现生物体内不干扰自身生化反应的化学反应。一路走来,贝尔托西始终拥有以兴趣为导向的自我驱动力,始终抱有“善于感知何时是机会”^[22]的自发洞察力,以及相信“每天做一件事,杂草就会慢慢清除,随着时间的推移,道路会变得更加清晰”^[9]的自觉审辩力,以极强的自律执行力在实践探索中实现科研的突破。

贝尔托西的成长与科研经历,有其独特的个人色彩,但也为我国研究人才的培养提供有利的

借鉴:研究人才的培养要提升其自主研究能力,大力激发其自主研究的活力和动力,才能有效促进研究生群体的健康发展,优化国家高层次自主研究人才储备。

多项研究表明,我国的人才培养在自主发起和开展研究课题方面存在不足,比如博士生存在自我效能低下^[23]、动力缺乏^[24]、自主执行困难、自我管理不足^[25]等问题,上述问题对博士生能否顺利毕业具有重要的影响^[26]。无论研究生还是专职科研人员都应具备自主研究能力并不断提高这种能力;此外,自主研究能力的塑造与培养,离不开鼓励创新、开放包容的学术环境,同时,同门间的友好交流、实验室内外的合作、单位的政策支持都会激发研究人员的学术自主性与自由探索热情,这也是及时跟进学术前沿的重要保证,更是推动原始创新产出的原动力。

2.2 关注跨学科知识生产,在交叉领域开拓学科前沿

“生物正交化学”的创立与发展实现了化学反应在生物体内的无害化应用,使得对生物体内生物分子(如糖类、蛋白质和脂类等)的实时研究成为可能。

贝尔托西的成功,源于她多学科、多领域实践中的知识积累,源于她对跨学科知识的迁徙与应用,源于自由探索、深度学习的横向扩展与纵向深入。跨学科知识生产的类型包括理论与概念的跨学科借鉴融合、研究成果的跨学科应用与转化^[27]。前者源于科学家的受教育背景,后者需要科学家发挥主观能动性,重视学科的交叉融合发展的趋势并敢于实践和应用。贝尔托西的多面发展和长期以来的多领域实践,在一定程度上推动着她在糖生物学的研究中,以目的为驱动去尝试通过化学生物学的工具来研究糖的功能。同时,针对下一代研究人员的培养,贝尔托西还创立并领导了 Sarafan ChEM-H 研究所的化学/生物学界面培训计划(Chemistry-Biology Interface Predoctoral Training Program),来帮助研究生弥合化学、生物学和医学研究之间的差距^[28]。

跨学科知识的迁移与生产通常以解决问题为导向,类似一种功能主义思想。生物正交化学正是因寻找简单有效的化学连接工具服务于复杂系统被赋予特殊意义和价值^[29]。同样地,2018 年诺贝尔物理学奖得主亚瑟·阿斯金(Arthur Ashkin)因“光镊及在生物中的应用”而获奖,也

是将基于物理学的光镊技术应用于操纵病毒、细菌和活的细胞^[30],乃至探索细胞内部的结构和性质^[31]的跨学科知识迁徙。跨学科研究也是 21 世纪以来自然科学领域诺贝尔奖的一大重要趋势^[23,32],值得关注和落实。

随着前沿科技问题及社会问题日趋复杂化影响下跨学科、交叉趋势的日益显著^[33],2021 年,国务院学位委员会设置了“交叉学科门类”,该门类成为学科专业目录上的第 14 个一级学科,体现了交叉科学发展和人才培养的大变革^[34]。在此基础上,跨学科知识生产与迁徙应该突破实用主义的限制,向着理论与方法并重的方向发展,才能更好地在交叉的领域推动科技与学科前沿。

2.3 发挥科研“她”力量,更加多元与开放包容

贝尔托西是一个“非常规”科研女性,她多元的人生经历、兴趣发展与其学习、科研并行不悖,享受并热爱生活与科研:喜欢足球、篮球,获得了多所学校的体育奖学金;喜欢音乐,高中时多次在作曲和音乐方面获奖,大学时靠在厌学乐队担任键盘手赚到了自己的学费。多元人生使她拥有更

开阔的视野和思维,也更有利于她寻找自己的科研兴趣并为之坚持。

从贝尔托西的人生经历很容易理解她实验室构成的多样性、公平性和包容性,她的实验室成员对这位热情的导师也抱有极佳的感情。加利福尼亚大学洛杉矶分校教授,贝尔托西培养的研究生艾伦·斯莱滕(Ellen Sletten)感慨“作为一名科学界的女性并接受她的指导,看到她谈论自己的挑战真的很鼓舞人心”^[13]。除了自身的研究和教学外,贝尔托西还参与了许多旨在促进科学领域多样性和包容性的专业组织和倡议:她是加利福尼亚州少数族裔科学、工程和数学联盟的创始成员,并曾担任糖生物学学会和美国化学会的董事会成员。女性科研人员广泛地参与科研环境建设,很好地促进了关于科研工作与性别身份间良性循环的形成,这从诺贝尔化学奖的颁奖史中可见一斑。

回顾诺贝尔化学奖的女性得主(表 1),120 余年的时间里,仅有 8 位获奖,但 2018 年到 2022 年短短四年里就有 4 位,可以看出女性科研工作者的工作得到了更多的认可。

表 1 诺贝尔化学奖历届女性得主

Tab. 1 Female winners of the Nobel Prize in Chemistry

年份	姓名	获奖理由	共享者
1911	玛丽·居里	发现了镭和钋元素,提纯镭并研究了这种引人注目的元素的性质及其化合物	-
1935	伊伦·约里奥·居里	合成了新的放射性元素	让·弗雷德里克·约里奥·居里
1964	多萝西·克劳福特·霍奇金	利用 X 射线技术解析了一些重要生物物质的结构	-
2009	阿达·约纳特	对核糖体结构和功能方面的研究	文卡特拉曼·拉马克里希南, 托马斯·施泰茨
2018	弗朗西斯·阿诺德	酶的定向演化以及用于多肽和抗体的噬菌体展示技术	乔治·史密斯,格雷戈里·温特
2020	埃马纽埃尔·卡彭蒂耶	开发了一种基因组编辑方法	
2020	珍妮弗·杜德纳		
2022	卡罗琳·露丝·贝尔托西	点击化学和生物正交化学	摩顿·梅尔达尔, 卡尔·巴里·夏普莱斯

同时,随着社会与科学的发展进步,也有越来越多的女性参与到科研领域的工作之中。《中国科技人力资源发展研究报告(2020)》显示,女性科技人力资源占总量比例从 2005 年的约三分之一,迅速增长到 2019 年底的 40.1%^[35],但与相对庞大的群体总量相比,高层次女性科研人员占比仍较少^[36],这一现象也存在于国际范围^[37],是世界科研领域需要共同面对和解决的问题。2009 年诺贝尔生理学或医学奖得主之一卡罗尔·格雷

德(Carol Greider)曾在接受纽约时报采访时说“女性做事的方式不同,这也是我认为更多的女性应该处在学术医学高层的原因……虽然并不意味着女性必然对实验机制有不同的思考方式,但至少更多的是一种不同的社交互动方式,会带来不同的结果”^[38]。

针对这种现象,首先需要从文化、社会等角度对科学建制中的“玛蒂尔达效应”^[39](Matilda Effect)予以修正,其中的“玛蒂尔达”是 19 世纪

的一位有着成就不被承认经历的美国女作家,对该效应修正即对女性的成就被忽略、除名、贬低或被归于男性的现象予以修正,让女性科研工作者在科研成果被承认之前与获得自致性社会资本上缩小与男性科研工作者的差距^[40];其次,为了更好地保护女性科研工作者的权益,激发其科研热情,科学管理组织需要与社会各界形成资助力量,在“世界杰出女科学家成就奖”“中国青年女科学家奖”“新基石研究员项目”等项目的基础上更好地营造性别平等的科研环境;最后,女性科研工作者需要充分发挥主观能动性,充分交流与合作,将群体的规模优势转变成质量优势,从“她”力量向“她”时代迈进。

参 考 文 献

- [1] The Nobel Prize in Chemistry 2022. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/press-release/>. 2022-10-26.
- [2] The Nobel Prize in Chemistry 2022 Popular information. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/popular-information/>. 2022-10-26.
- [3] All Nobel Prizes. <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes/>. 2022-12-09.
- [4] MIT Physics Department Faculty. http://web.mit.edu/physics/people/faculty/bertozzi_william.html. 2022-12-09.
- [5] Profile of Carolyn Bertozzi. Interview by Tinsley Davis. <https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/MEDLINE;20160128>. 2023-01-13.
- [6] Carolyn Bertozzi. https://en.m.wikipedia.org/wiki/Carolyn_Bertozzi. 2022-12-12.
- [7] UCLA Department of Mathematics. <https://www.math.ucla.edu/people/ladder/bertozzi>. 2022-12-09.
- [8] Oral history interview with Carolyn R. Bertozzi-Science History Institute Digital Collections. <https://digital.sciencehistory.org/works/3xomins>. 2023-01-15.
- [9] Cells, sugars and synthesis. <https://www.chemistryworld.com/features/carolyn-bertozzi/3008380.article>. 2022-12-12.
- [10] Carolyn Bertozzi. <https://www.chemistryworld.com/culture/carolyn-bertozzi-shooting-hoops-is-very-meditative/4015634.article>. 2022-12-12.
- [11] Twitter. <https://mobile.twitter.com/carolynbertozzi/status/1270575229081772032>. 2023-01-13.
- [12] 2007-01-21: NOGLSTP to Honor Bertozzi, Gill, Mauzey, and Bannochie at 2007 Awards Ceremony in February. <https://noglstp.org/publications-documents/announcements/2007-01-21-noglstp-to-honor-bertozzi-gill-mauzey-and-bannochie-at-2007-awards-ceremony-in-february/>. 2023-01-17.
- [13] Stanford's Carolyn Bertozzi wins Nobel in chemistry. <https://news.stanford.edu/2022/10/05/carolyn-bertozzi-wins-nobel-chemistry/>. 2023-01-17.
- [14] 陈强强. 化学通报, 2020, 83(2): 186~191.
- [15] Carolyn Bertozzi. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/bertozzi/interview/>. 2022-12-12.
- [16] Mahal L K, Yarema K J, Bertozzi C R. Science, 1997, 276(5315): 1125~1128.
- [17] Carolyn Bertozzi's glycorevolution. <https://chemistry.berkeley.edu/news/carolyn-bertozzi%E2%80%99s-glycorevolution>. 2023-03-20.
- [18] Saxon E, Bertozzi C R. Science, 2000. 287(5460): 2007~2010.
- [19] MacArthur Fellowship Awarded to Carolyn Bertozzi. <https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/bertozzi-macarthur.html>. 2022-12-10.
- [20] Carolyn Bertozzi To Lead ACS Central Science. <https://cen.acs.org/articles/92/web/2014/09/Carolyn-Bertozzi-Lead-ACS-Central.html>. 2022-12-10.
- [21] 施悦琪, 周海涛. 研究生教育研究, 2022(06): 8~14.
- [22] Carolyn Bertozzi's Winding Road to an Extraordinary Career. <https://inchemistry.acs.org/acs-and-you/carolyn-bertozzi.html>. 2022-11-16.
- [23] 刘成科, 孔燕. 研究生教育研究, 2017(6): 41~46.
- [24] 刘爱春, 谭顶良, 赵小云. 学位与研究生教育, 2014(4): 54~59.
- [25] 教育部办公厅关于进一步规范和加强研究生培养管理的通知(教研厅[2019]1号). http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_826/201904/t20190412_377698.html. 2023-01-15.
- [26] 蔡芬, 曹延飞, 顾晔, 等. 学位与研究生教育, 2020(03): 46~52.
- [27] 李立国, 赵阔. 大学教育科学, 2021(05): 14~23.
- [28] Sarafan ChEM-H. <https://chemh.stanford.edu/>. 2023-01-16.
- [29] 高兵. 科学通报, 2022, 67(36): 4332~4336.
- [30] Ashkin A, Dziedzic J M. Science, 1987, 235(4795): 1517~1520.
- [31] Ashkin A, Dziedzic J M. PNAS, 1989, 86(20): 7914~7918.
- [32] 陈其荣. 上海大学学报(社会科学版), 2009, 16(05): 48~62.
- [33] 李正, 吴钰滢, 焦磊. 高等工程教育研究, 2023(01): 164~171.
- [34] 刘仲林. 中国社会科学报, 2022-06-14(008).
- [35] 我国科技人力资源年轻化趋势明显. https://news.gmw.cn/2022-06/26/content_35837182.htm. 2023-01-16.
- [36] 徐素田, 王思哲, 汪凯. 自然辩证法通讯, 2022, 44(06): 112~118.
- [37] González D, Mateu A, Pons E. Sci. Commun., 2017, 39(4): 535~547.
- [38] On Winning a Noble Prize in Science. https://www.nytimes.com/2009/10/13/science/13conv.html?_r=1&ref=science. 2023-01-17.
- [39] Margaret R. Soc. Stud. Sci., 1993, 23(2): 326.
- [40] 朱婷钰, 赵万里. 自然辩证法通讯, 2017, 39(05): 8~18.