

稳态强磁场在生命科学 研究中的应用

张磊 吴勃 郑新威 张欣

(中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心 230031)

强磁场是现代科学实验最重要的极端条件之一,可以将磁场效应放大,从而观测到弱磁场下无法产生或难以观测到的现象,对于发现和认识新现象、揭示新规律具有重要作用。众所周知,磁场强度的升高可以极大提高核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)与磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)的分辨率和检测能力,为开展生命科学相关问题研究提供了关键实验条件。此外,除了广为应用的物理和材料科学等领域,依托稳态强磁场实验装置发展的一系列极端实验平台和多种测试手段也为研究磁场对生物体产生的影响提供了平台。近年来,国际上依托强磁场条件开展的生命科学相关研究非常活跃,世界上五大稳态强磁场实验装置都非常重视生命科学相关研究。本文将主要介绍我国稳态强磁场下生命科学领域的部分研究工作。

一、稳态强磁场生物学效应研究

所有物质都会响应外加磁场。有的响应很强,有的却可以忽略不计,这主要取决于外加磁场的强度、类型,以及物质本身的磁性等多种因素。虽然强磁场的定义在各个领域和各个时期都有所不同,但对于生物学而言,人们一般把1 T以上的称为强磁场,把1 mT~1 T之间的称为中等磁场,而把1 mT以下的称为弱磁场。磁生物学研究则包括探索多种参数磁场与生物系统之间的相互作用、机制,并发展相关的生物医学应用技术。由于生物样品磁

性大多与水接近,呈弱抗磁性,因此在较弱的外加磁场下,绝大多数生物体并不会表现出明显的响应。而强磁场可以将微弱的生物磁效应放大,并可以产生弱磁场下无法产生的新现象,因此强磁场在研究磁场对生物体的影响方面起着“放大镜”和“极端条件”的双重作用,有着不可替代的优势。目前国内外相关研究主要集中在强磁场对生物体的安全性、强磁场生物学效应和机制,以及强磁场在疾病治疗中的潜在应用等方面。

1.1 稳态强磁场的生物安全性研究

随着科技的进步,人们接触各类电磁场的机会越发频繁(手机、电脑、磁共振成像MRI等)。同时,世界卫生组织(WHO)和国际非电离辐射保护委员会(ICNIRP)也会不定期公布不同类型电磁场的人体安全阈值指导性意见。对于手机等相关的射频磁场,ICNIRP对其指导性意见更新频繁。而对于稳态磁场,由于其安全性良好,ICNIRP于2009年公布其最后一版的指导性意见之后再未进行更新。其指导性意见建议的公众暴露上限为400 mT,职业暴露上限为2 T(头部与躯干)/8 T(四肢)^[1]。

然而,在医学领域,为了提高灵敏度和增加分辨率,新研发的MRI场强逐渐提高。除了9.4 T MRI进入临床研究,10.5 T MRI也在人体上进行了测试^[2]。美国国家强磁场实验室研制的21.1 T小口径MRI,将鼠脑部成像分辨率显著提高^[3]。与此相关的稳态强/超强磁场的生物安全性研究也引起了人们的关注。事实上,近年来国内外学者对此进行

了一系列研究。研究人员利用不同生理和病理状态的小鼠模型,进行了一系列从生理生化到行为认知等全面的小鼠磁场安全性研究。发现对于健康小鼠、中老年小鼠、抑郁症小鼠和多种类型的肿瘤小鼠,稳态磁场除了引起短暂并且可迅速恢复的眩晕之外,总体而言安全性良好。例如,对于正常小鼠而言,20 T级^[4,5]和30 T级稳态强磁场^[6,7]1~2小时短时间处理对小鼠未见明显伤害,包括主要脏器和各项生理生化指标,以及小鼠在暴露后的一个月内的各项行为学表现;有趣的是,7~33 T稳态磁场处理可以提高小鼠海马组织中的钙/钙调素依赖性蛋白激酶Ⅱ(CaMKII)和神经元增殖,小鼠的记忆和社交能力以及抑郁小鼠的抑郁状态都得到了改善(图1)^[5,7];进一步对已经在国际上开始应用于人体MRI实验的9.4 T稳态磁场进行研究,对荷瘤小鼠进行反复暴露,共累计88小时^[8],以及比较了单独200小时9.4 T稳态磁场暴露和联合不同剂量的抗肿瘤药物伊马替尼,发现9.4 T稳态强磁场具有良好的安全性,显著抑制了肿瘤生长,有效减轻了低剂量伊马替尼本身所引起的副作用,且不会引起高剂量伊马替尼所导致的小鼠体重减轻、肝功能异常和抑郁等副作用^[9]。

值得注意的是,研究人员同时发现稳态强磁场长时间处理会对特定疾病类型和状态的小鼠造成

不同程度的损伤,其中肝脏和脾脏为稳态强磁场主要影响的靶器官。例如,24.5 T强磁场处理9小时对荷瘤小鼠造成了一定程度的肝损伤和白细胞计数异常^[10]。而已有严重肝损伤以及严重代谢性疾病的小鼠,在强磁场长时间暴露,或者梯度强磁场作用下则受到了较为严重的危害。例如,比较了三种不同类型的糖尿病小鼠,包括普通1型糖尿病、严重1型糖尿病和普通2型糖尿病小鼠,发现9.4 T近均匀磁场并未对糖尿病小鼠产生明显影响。但同时发现,在>20 T/m,1~8 T梯度强磁场作用14小时后,严重1型糖尿病小鼠的肝、脾和肾脏出现损伤,尤其是脾脏产生了显著病变^[11]。而普通1型和2型糖尿病小鼠受梯度磁场的影响相对较小。更为出乎意料的是,对于大剂量酒精喂养导致的严重炎性肝损伤小鼠,竖直向上的0.1~0.2 T稳态磁场连续处理2~3周抑制了小鼠肝再生过程的DNA合成,从而显著缩短了小鼠的存活时间^[12]。相比之下,将正常小鼠连续暴露于同样的磁场中长达1.7年也未引起不良影响,反而可以改善小鼠生存状态^[13],并且同样的磁场也可以显著减轻化疗药物顺铂引起的急性和慢性肾损伤^[14]。因此,强磁场安全性可能与代谢性疾病动物体内铁代谢异常、氧化还原失衡和自由基水平升高有关,需要进行系统深入的研究。

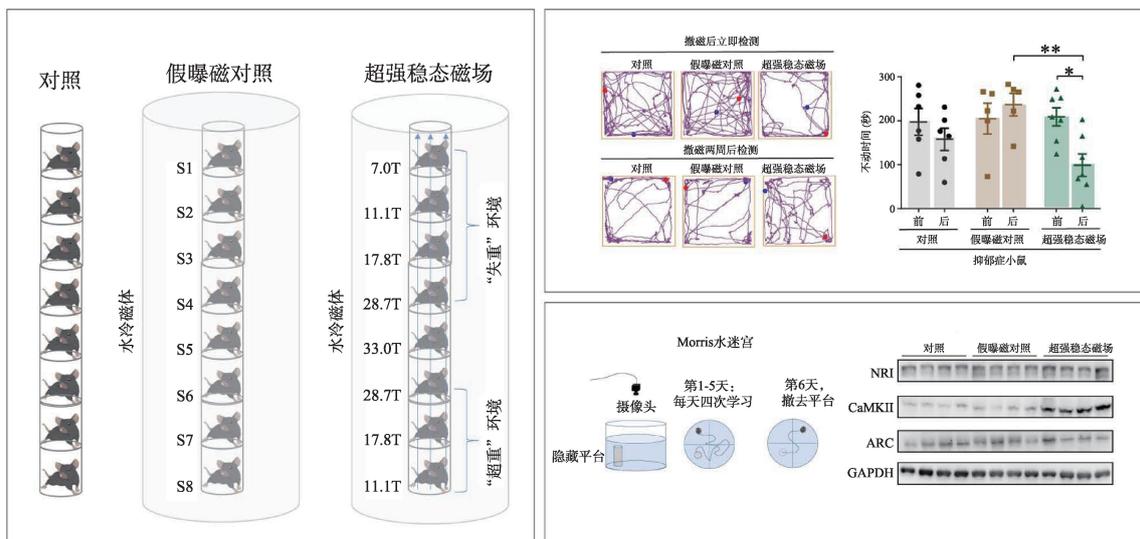


图1 7~33 T稳态强磁场增强小鼠记忆和社交能力,减轻抑郁症状(图片摘自文献[5,7],稍作修改)

1.2 稳态强磁场的生物学效应和机制

虽然稳态强磁场在健康小鼠上具有良好的生物安全性,但对特定代谢性疾病小鼠具有一定的危害,这提示了小鼠的生理病理状态直接影响了强磁场安全性和生物学效应。研究人员发现稳态强磁场可以对一些实体肿瘤的生长产生抑制,并且其抑制效果与磁场强度直接相关。例如,对于稳态磁场累计处理胃肠间质瘤荷瘤小鼠~200小时而言,9.4 T 稳态磁场对其肿瘤抑制率可达 62.9%(与药物联合后可达 92.8%),0.1~0.5 T 只有 19.3%,而 0.1 T 以下则无明显效果^[9]。

为了进一步研究这些现象背后的物理机制,研究人员结合了溶液扫描隧道显微镜、分子动力学模拟、超导量子干涉仪磁性测量等多种方法,发现稳态磁场作为一种高穿透、非侵入的物理因子,可以从多方面影响生物体。例如,从弱到强的稳态磁场都可以通过影响电子自旋来影响细胞内的自由基/活性氧(ROS),从而影响细胞代谢^[12-15];0.1~0.4 T 以上稳态磁场可以直接通过洛伦兹力来影响细胞中带负电的 DNA 运动,进而改变手性 DNA 螺旋的松紧度,最终影响 DNA 合成、肿瘤细胞增殖和肝细胞再生^[12,16];而 1 T 及以上(尤其是 10 T 以上)的稳态强

磁场可以除了抑制 DNA 合成之外再产生额外的叠加效应,包括癌细胞膜表面高表达的 EGFR 蛋白分子在强磁场下取向改变,进而引起下游信号级联激活和细胞增殖抑制,以及细胞内的微管细胞骨架和染色体的磁各向异性,导致强磁场下细胞纺锤体的取向改变和细胞分裂受阻等,都是稳态强磁场抑制肿瘤生长的重要原因^[17-19]。

此外,研究人员还发现了肿瘤与正常细胞之间的重要区别,以及细胞核与质之间的磁性差异。例如,发现肝癌细胞 DNA 合成在 0.1 和 0.4 T 都可以被竖直向上的磁场抑制,而正常肝细胞的 DNA 合成在 0.1 T 时并不受影响^[12];发现乳腺癌细胞里的微丝细胞骨架对外加旋转磁场比正常细胞更为敏感,并且无法像正常细胞一样在撤磁后迅速恢复,因此可以通过间歇性加磁来安全有效地抑制乳腺癌在小鼠体内转移^[20];27 T 稳态强磁场在正常细胞中造成的纺锤体取向和形态改变可以在撤磁后恢复^[18],而肿瘤细胞则难以恢复,从而造成了肿瘤细胞分裂受阻(图 2)。研究人员还通过前期搭建的生物磁性测量系统对人鼻咽癌细胞进行检测,通过细胞组分分离、大梯度磁场下的细胞成像分析和理论计算,不仅证实了其细胞核与质之间的磁性差异,而且发现强度为 13.1~23.5 T,梯度为 92~160 T/m 的

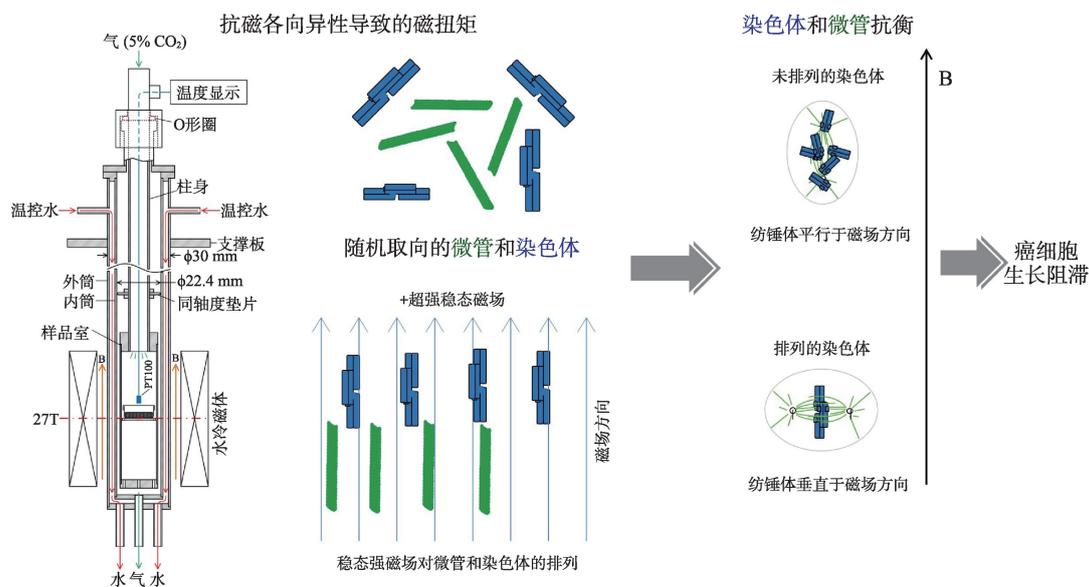


图2 27 T 稳态强磁场通过影响微管和染色体的排列改变细胞纺锤体的取向,从而抑制癌细胞增殖(图片摘自文献[18],稍作修改)

强磁场可以对单个细胞内的细胞核产生 41~130 pN 的力,而这些力足以引起细胞核在细胞内的相对位移^[19]。

1.3 稳态强磁场在疾病治疗中的潜在应用

古今中外,人们都一直在尝试将磁场应用于疾病治疗。虽然目前还未有成熟的基于稳态磁场的医疗设备被 FDA 批准,但已有许多人将稳态磁场作为慢性疾病的替代或辅助治疗方法。在张欣等 2023 年出版的 *Biological Effects of Static Magnetic Fields* 第二版中^[21],包括了“稳态磁场在癌症治疗中的潜在应用”,“稳态磁场对骨骼健康的影响”,“稳态磁场对免疫系统的影响”和“稳态磁场对神经系统的生物学效应”等关于稳态磁场在疾病治疗中的潜在应用的章节,总结分析了现有的科学证据,并对未来的进一步发展进行了展望。事实上,在张欣等 2017 年和 2023 年的两版 *Biological Effects of Static Magnetic Fields*(及译著)中^{[21][23]},都邀请了美国约翰霍普金斯的 Kevin Yarema 教授撰写了“稳态磁场用于磁疗的前景、困难和机遇”这一章节,目的是帮助人们更全面地了解稳态磁场在疾病治疗中面临的现状,从而更好地推动磁场与生物医学交叉领域的发展。

二、生物核磁共振波谱

核磁共振是指具有磁矩的原子核(如:¹H, ¹⁹F, ¹³C 等),在外磁场作用下核自旋能级发生塞曼分裂,当用特定频率的射频场进行照射后产生能级共振跃迁的物理过程。核磁共振技术是人类科学史上最伟大的发明之一,先后有五次诺贝尔奖授予了从事核磁共振研究的科学家。核磁共振技术主要有两个学科分支:核磁共振波谱(NMR)和磁共振成像(MRI)。近年来,随着磁场强度的升高和 NMR 技术的发展,极大地提高了其分辨率和检测能力。NMR 可以对分子结构、动态过程等进行非侵入性、非破坏性的分析研究。在生命科学领域,NMR

广泛应用于生物大分子的结构与功能、代谢组学以及药物筛选等。下面介绍了研究人员利用稳态强磁场实验装置的 NMR 谱仪系统开展的部分研究工作。

2.1 生物大分子的空间结构及构象变化研究

NMR 能够在接近生理条件的溶液状态下,在原子层次研究蛋白质、核酸等生物大分子的空间结构。与 X 射线晶体学和冷冻电镜侧重于静态结构的解析相比,NMR 技术不仅能够解析原子分辨率的结构,还可以获得丰富的分子动力学信息。

众所周知,蛋白质是生命活动的主要承担者,因此,研究其空间结构及动态变化,将有助于揭示生命现象的本质。近年来,利用稳态强磁场实验装置的 NMR 谱仪系统,研究人员解析出多个重要蛋白质,包括一些分子量较大的膜蛋白结构,例如:酵母的线粒体内膜通道蛋白 Tim23 与其底物结合的复合物结构(图 3)^[24]。该结构是目前利用液体 NMR 所解析的分子量最大的膜蛋白复合物之一。通过结构解析,发现了 Tim23 一系列独特的空间结构特点,并进一步结合体外电生理实验提出其如何工作的分子机制模型。

核酸是生命的最基本物质之一。在生物体内,除了经典的 DNA 双螺旋结构外,人们还发现存在其他一些特殊的核酸结构,例如:G-四链体。它是一种由富含鸟嘌呤的核酸序列折叠而成的特殊四链核酸结构。G-四链体在生物体内广泛存在,其结构丰富多样,参与了基因复制、转录、基因组稳定性等多种重要的生物学过程,也与肿瘤等多种人类疾病的发生发展密切相关。研究人员利用 NMR 解析出多种 G-四链体结构,包括:自我动态组装的三聚 G-四链体和假镜像对称的异分子间端粒 G-四链体等。近期,研究人员又解析了一种由一条靶标链和两条富 G 短链构成的异三聚 G-四链体结构(图 4),发现 G-四链体内可以通过基于 Hoogsteen 氢键配对的 DNA 链置换反应实现重组装,突破了 G-四链体

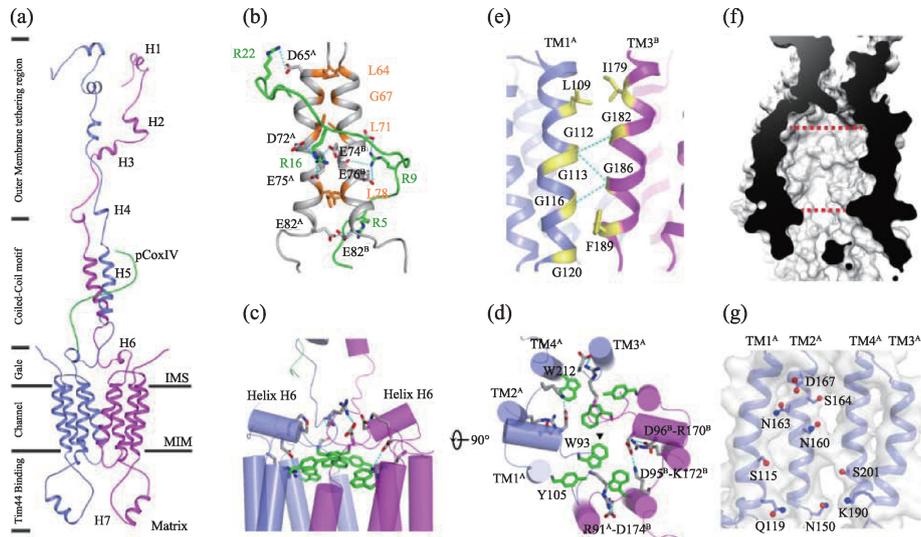


图3 酵母的线粒体内膜通道蛋白Tim23与其底物结合的复合物结构^[24]

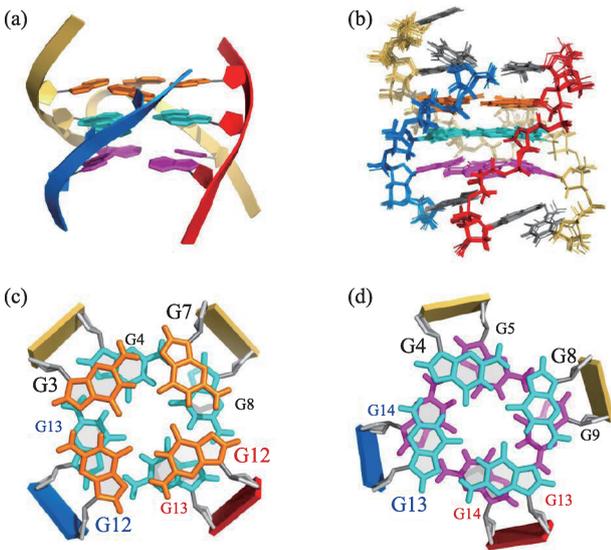


图4 异三聚G-四链体结构Tub10/2P1^[25]

呈现富G链置换惰性的传统认知^[25]。

除了结构解析外,NMR还可以用来实时检测溶液或复杂环境中的生物大分子构象变化。生物体内有很多蛋白质通过自身构象的变化来发挥功能,例如:小GTP酶家族蛋白。它是一类细胞信号转导蛋白,在人体中,发现超过150个成员。它们以“分子开关”的形式在体内发挥功能,当其与GDP结合时为“失活态”,而与GTP结合时为“活化态”,通过在两种状态之间转变控制诸多生命活动。其活性异常与诸多人类疾病,如癌症等的发

生、发展密切相关。研究人员以其中一种小GTP酶Arf6为例,结合¹⁹F非天然氨基酸标记方法,利用¹⁹F NMR技术,基于“失活态”和“活化态”两种构象的化学位移差异,实现了在溶液及细胞裂解液中对Arf6两种构象的区分及实时定量检测分析。在此基础上,开发出Arf6调控蛋白GEF/GAP的活性检测新方法^[26]。

2.2 生物大分子相互作用研究

生物大分子在体内需要通过与其他分子(如:

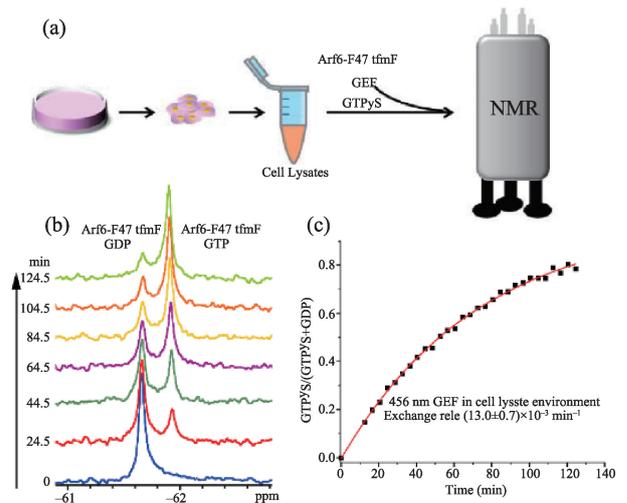


图5 利用¹⁹F NMR在细胞裂解液中实时检测酶促Arf6构象转变过程^[26]

蛋白质、磷脂、核酸以及小分子等)的相互作用来行使功能。因此,研究生物大分子相互作用,不仅能够揭示其工作机理,深入了解生命活动机制,还有助于创新药物的设计研发。NMR能够在溶液条件下,在原子分辨率上进行生物大分子相互作用的检测与表征,尤其是在弱相互作用研究方面,更是具有无可比拟的技术优势。NMR技术方法多样,其中应用最广泛的是化学位移扰动,对化学环境细微变化非常敏感。研究人员利用稳态强磁场实验装置的NMR谱仪系统,阐述了多种重要的相互作用体系。例如:T细胞受体(TCR)的活化机理,如图6所示,利用NMR技术并结合体外构建的生物膜模拟体系,研究人员发现钙离子可以直接与细胞质膜相互作用,中和其携带的负电荷,从而减弱TCR亚基CD3蛋白与质膜之间的相互作用,使其关键磷酸化位点暴露于细胞质环境中,进而促进其磷酸化,引起胞内进一步的免疫应答反应,最终放大TCR的活化信号^[27]。该工作揭示了TCR的活化机理,并发现钙离子可以通过调控生物膜与膜蛋白质之间的相互作用发挥生理功能。

2.3 基于NMR的代谢组学研究

代谢组学是对某一生物或细胞在特定生理时期所有代谢产物同时进行定性和定量分析的一门学科。由于机体生理或病理变化,会引起代谢产物的变化,通过对代谢产物的检测分析,可以用于疾病诊断与病理分析。NMR是代谢组学研究的核心分析技术,可以对复杂的代谢产物进行定量检测分析。基于NMR技术的代谢组学研究已成为生物医学领域中的一个重要研究方向。研究人员发现周期调控蛋白PLK1在肿瘤细胞周期进程中能够调节磷酸戊糖途径的关键代谢酶G6PD的活性以及整个磷酸戊糖途径。利用NMR技术对肿瘤细胞¹³C标记的葡萄糖代谢产物进行分析,进一步证实PLK1可以促进磷酸戊糖途径来源的乳酸、核酮糖-5-磷酸等代谢产物的含量^[28]。该研究发现了PLK1在调节生物大分子合成方面的新功能,揭示了代谢重编程与周期调控相互协调共同促进肿瘤细胞快速增殖的新机制,对临床肿瘤的靶向治疗有潜在的指导意义。

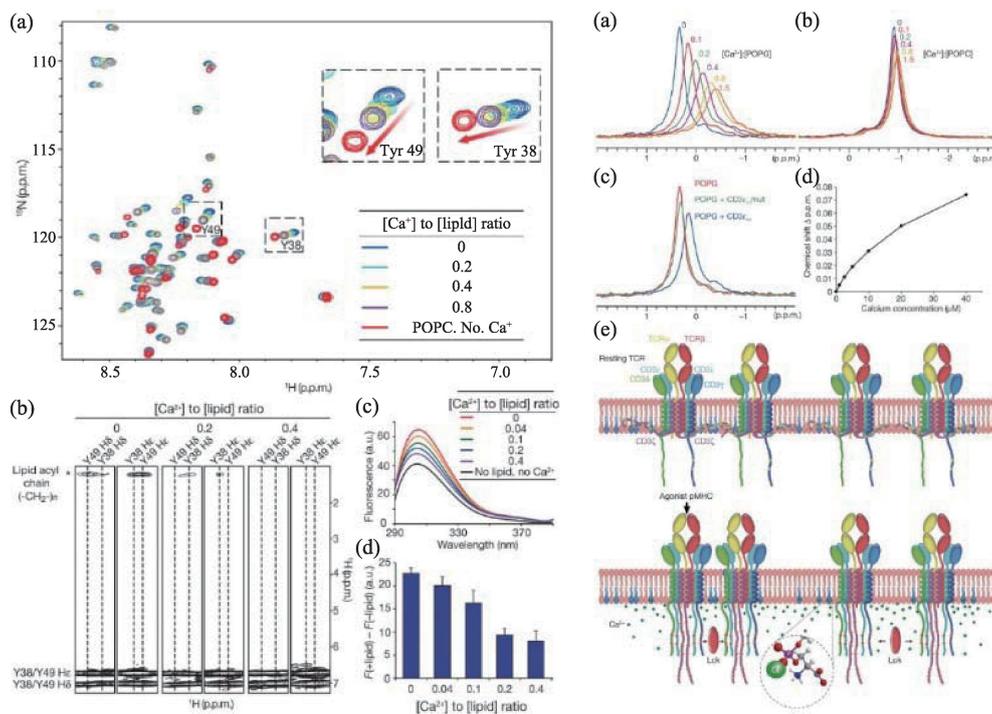


图6 NMR研究钙离子减弱CD3与细胞质膜相互作用的分子机制^[27]

三、磁共振成像研究

磁共振成像(MRI)是生命科学领域中一项非常重要的影像技术。它具有非侵入性、高空间分辨率和对比度等特点,被广泛应用于医学诊断和生物医学研究中。稳态强磁场实验装置中的大口径

(400 mm)9.4 T MRI装置提高了成像的分辨率和对比度,能够获得更高质量的图像。同时,围绕9.4 T大口径MRI装置搭建了一体化SPF级动物房,包含了大动物和小动物的饲养以及动物行为学实验室,是国内唯一的磁共振成像-动物设施一体化研究平台(图7)。

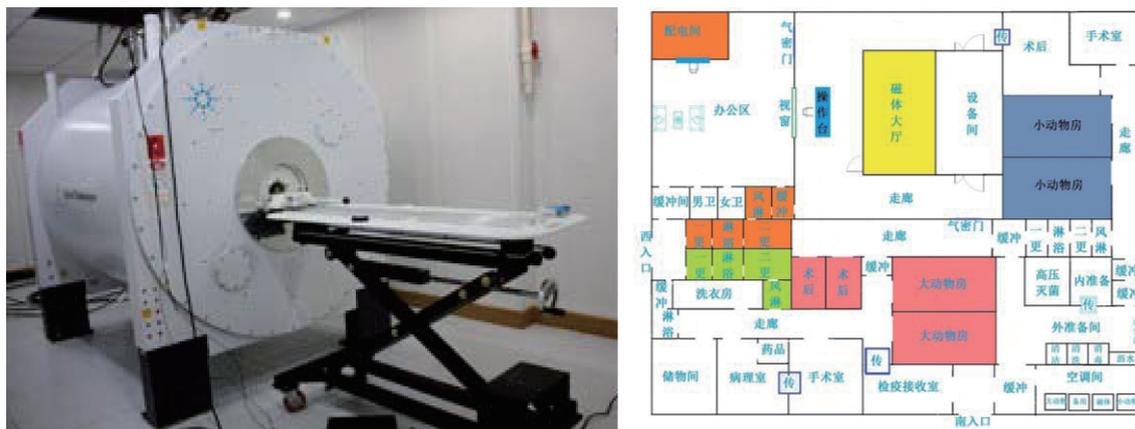


图7 9.4 T大口径磁共振成像装置及一体化动物房

利用该平台能够进行连续磁共振成像观测,以了解动物模型的疾病进展和治疗过程,从而获取全面的动物疾病病理以及药物治疗信息。例如,可以通过对体内水分子或脂肪分子的成像,检测各种器官和组织的异常情况。研究人员利用9.4 T高场MRI可以动态捕捉阿尔茨海默病(AD)转基因小鼠微血管大小和密度的变化信息,这为早期AD疾病的监测提供新的生物指标,也为评判AD的血管靶向治疗效果提供了监测依据(图8)^[29]。

MRI技术广泛应用在肿瘤诊断中,通过MRI结构成像能够提供肿瘤位置、大小和形态等信息,辅助医生进行诊断和选择治疗方案。利用9.4 T高场MRI技术,还可以对诊疗纳米颗粒的体内药物输送及治疗过程进行跟踪。研究人员设计了一种磁性顺铂-铁锰氧化物纳米颗粒,由于其突出的磁性和高T2弛豫增强效果,这种纳米颗粒不仅能够诱导肿瘤细胞凋亡和铁死亡,实现肿瘤的协同治疗,还可以利用高场MRI来观测纳米颗粒的组织分布和渗透速率等信息,为评估药物抗肿瘤作用提供重要依据^[30]。

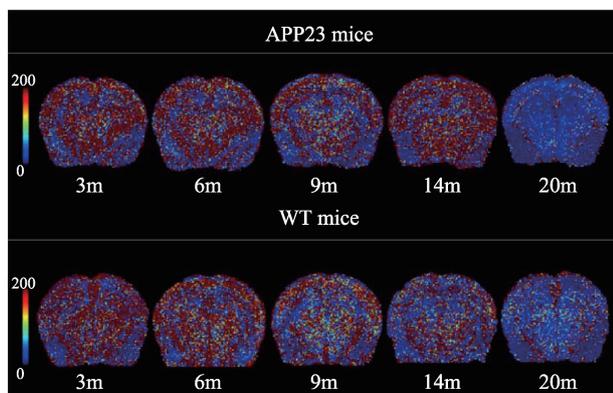


图8 不同年龄段阿尔茨海默APP23小鼠和野生型小鼠的微血管密度彩图^[29]

磁共振波谱(MRS)是一种能够检测活体生物组织内代谢产物和化学成分的非侵入性成像技术。例如,研究人员通过小鼠静脉注射尿氨酸(UCA)来模拟日光照射引起的血液中UCA的升高,利用9.4 T MRI设备开展MRS实验,发现其大脑海马区(HPC)和运动皮层(M2)中谷氨酸(GLU)水平具有显著的提升(图9)。该工作为揭示脑内谷氨酸合成新通路及其参与日光照射改善人类情绪、学习和记忆

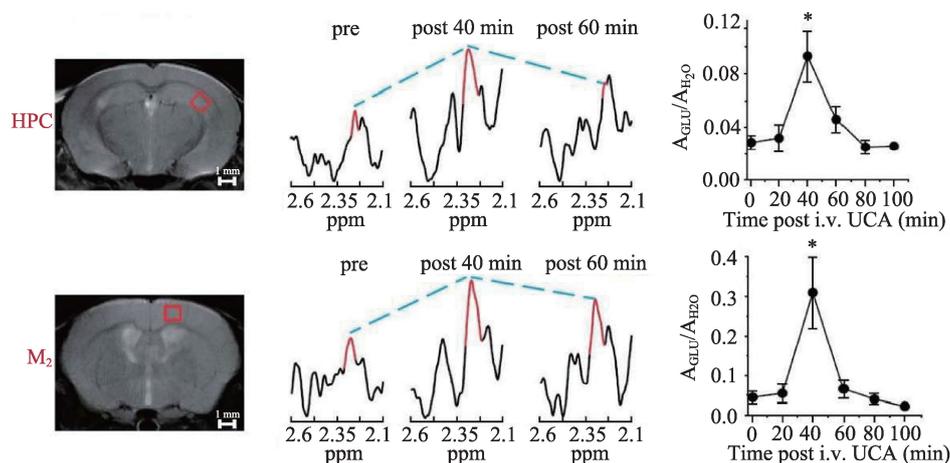


图9 MRS检测脑内海马区(HPC)及运动皮层(M2)谷氨酸含量变化^[31]

的分子及神经环路机制提供了影像学证据。这项研究成果入选了2018年“中国生命科学十大进展”^[31]。

四、总结

本文简要介绍了稳态强磁场在生命科学研究中的部分应用。它不仅提供了一种可以对生物大分子和组织的结构与功能等多方面进行检测的有力工具,并且可以作为一种高穿透、非侵入性的物理场在分子、原子和电子水平上对生物分子和体内多种生命过程进行调控,在基础科研和应用领域都具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] Ziegelberger, G. and I.C.N.-I.R. Pr, *Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields*. Health Phys, 2009. 96(4): p. 504-14.
 [2] Grant, A., et al., *10.5 T MRI static field effects on human cognitive, vestibular, and physiological function*. Magn Reson Imaging, 2020. 73: p. 163-176.
 [3] Schepkin, V.D., et al., *Initial in vivo rodent sodium and proton MR imaging at 21.1 T*. Magn Reson Imaging, 2010. 28(3): p. 400-7.
 [4] Tian, X.F., et al., *Effects of 3.5- 23.0 T static magnetic fields on mice: A safety study*. Neuroimage, 2019. 199: p. 273-280.
 [5] Khan, M.H., et al., *Short- and long-term effects of 3.5-23.0 Tesla ultra-high magnetic fields on mice behaviour*. Eur Radiol, 2022. 32 (8): p. 5596-5605.
 [6] Tian, X., et al., *Safety evaluation of mice exposed to 7.0- 33.0 T high-static magnetic fields*. J Magn Reson Imaging, 2021. 53(6): p.

1872-1884.
 [7] Lv, Y., et al., *The Anti-Depressive Effects of Ultra-High Static Magnetic Field*. J Magn Reson Imaging, 2022. 56(2): p. 354-365.
 [8] Yang, X., et al., *An upward 9.4 T static magnetic field inhibits DNA synthesis and increases ROS-P53 to suppress lung cancer growth*. Transl Oncol, 2021. 14(7): p. 101103.
 [9] Tian, X.F., et al., *9.4 T static magnetic field ameliorates imatinib mesylate-induced toxicity and depression in mice*. Eur J Nucl Med Mol I, 2023. 50(2): p. 314-327.
 [10] Tian, X., et al., *The Effects of 3.7-24.5 T High Magnetic Fields on Tumor Bearing Mice*. Chinese Phys B, 2018. 27(11): p. 118703.
 [11] Yu, B., et al., *Effects of gradient high-field static magnetic fields on diabetic mice*. Zool Res, 2023. 44(2): p. 249-258.
 [12] Song, C., et al., *Magnetic Fields Affect Alcoholic Liver Disease by Liver Cell Oxidative Stress and Proliferation Regulation*. Research, 2023. 6: p. 0097.
 [13] Fan, Y., et al., *Life on Magnet: Long-Term Exposure of Moderate Static Magnetic Fields on the Lifespan and Healthspan of Mice*. Antioxidants, 2022. 12(1): p. 108.
 [14] Yu, X., et al., *Static Magnetic Fields Protect against Cisplatin-Induced Kidney Toxicity*. Antioxidants, 2022. 12(1): p. 73.
 [15] Yu, B., et al., *A Static Magnetic Field Improves Iron Metabolism and Prevents High-Fat-Diet/Streptozocin-Induced Diabetes*. The Innovation, 2021. 2(1): p. 100077.
 [16] Yang, X., et al., *Effect of static magnetic field on DNA synthesis: The interplay between DNA chirality and magnetic field left-right asymmetry*. FASEB Bioadv, 2020. 2(4): p. 254-263.
 [17] Zhang, L., et al., *Moderate and strong static magnetic fields directly affect EGFR kinase domain orientation to inhibit cancer*

- cell proliferation. *Oncotarget*, 2016. 7(27): p. 41527-41539.
- [18] Zhang, L., et al., 27 T ultra-high static magnetic field changes orientation and morphology of mitotic spindles in human cells. *Elife*, 2017. 6: p. e22911.
- [19] Tao, Q., et al., Magnetic Susceptibility Difference-Induced Nucleus Positioning in Gradient Ultrahigh Magnetic Field. *Biophys J*, 2020. 118(3): p. 578-585.
- [20] Ji, X., et al., Intermittent F-actin Perturbations by Magnetic Fields Inhibit Breast Cancer Metastasis. *Research*, 2023. 6: p. 0080.
- [21] Zhang, X., *Biological effects of static magnetic fields*. 2nd ed. 2023: Springer.
- [22] Zhang, X., K. Yarema, and A. Xu, *Biological Effects of Static Magnetic Fields*. 2017: Springer.
- [23] 张欣,等/著,张磊,等/译, *稳态磁场的生物学效应*. 2018: 科学出版社.
- [24] Zhou, S., et al., Solution structure of the voltage-gated Tim23 channel in complex with a mitochondrial presequence peptide. *Cell Res*, 2021. 31(7):821-824.
- [25] Hu, W., et al., Conversion to Trimolecular G-Quadruplex by Spontaneous Hoogsteen Pairing-Based Strand Displacement Reaction between Bimolecular G-Quadruplex and Double G-Rich Probes. *J Am Chem Soc*, 2023. 145(33):18578-18590.
- [26] Wang, J., et al., Site-Specific 19F NMR Method for Detecting Arf6 GEF Activity. *Anal Chem*, 2022. 94(23):8181-8186.
- [27] Shi, X., et al., Ca²⁺ regulates T-cell receptor activation by modulating the charge property of lipids. *Nature*, 2013. 493(7430):111-5.
- [28] M, X., et al., Polo-like kinase 1 coordinates biosynthesis during cell cycle progression by directly activating pentose phosphate pathway. *Nat Commun*, 2017. 8(1):1506.
- [29] Xu, X., et al., Paper Dynamic changes in vascular size and density in transgenic mice with Alzheimer's disease. *Aging-U.S.*, 2020. 12 (17), 17224-17234.
- [30] Cheng, J., et al., Manganese-deposited iron oxide promotes tumor-responsive ferroptosis that synergizes the apoptosis of cisplatin. *Theranostics*, 2021. 11 (11), 5418-5429.
- [31] Zhu, H., et al., Moderate UV Exposure Enhances Learning and Memory by Promoting a Novel Glutamate Biosynthetic Pathway in the Brain. *Cell*, 2018. 173 (7), 1716-1727.



科苑快讯

抗损能力不但提高10倍而且更环保的新型玻璃:LionGlass

玻璃制造业在全球范围内每年至少排放8600万吨二氧化碳。然而宾夕法尼亚大学(Penn State)研究人员设计的一种新型玻璃LionGlass有可能将碳排放量减少50%。这种创新玻璃不仅在生产过程中消耗的能源要少得多,而且与传统钠钙硅酸盐玻璃相比,它具有更强的抗损伤能力。做出这一突破的科学家,最近提交了一份专利申请,标志着LionGlass迈出了走向市场的第一步。

目前日用品中的常见玻璃是钠钙硅酸盐玻璃,通过熔化石英砂、纯碱(碳酸钠)和石灰石(碳酸钙)制成。纯碱和石灰石熔化时会释放二氧化碳,这是一种温室气体。不过,大部分二氧化碳排放其实来自熔化玻璃所需高温消耗的能源。LionGlass的熔化温度降低了300~400℃,与传统玻璃相比,能耗降低了约30%。

这种以宾夕法尼亚大学吉祥物尼塔尼狮子(Nittany Lion)命名的新型玻璃,不仅更环保,而且还有更高的抗裂性能。抗裂性至少是钠石灰玻璃的10倍,由于其在实验中已经达到压力测试设备的极限,所以其极限

承压值尚不清楚。

抗损性对于玻璃和使用玻璃的各行各业来说,至关重要。LionGlass的高强度意味着用其制造的产品可以更轻更薄。



如果能在减少厚度的同时,保持同样的抗损能力,那么生产所需的原材料和能源就会更少,下游运输环节所需能量也将减少。

研究组正在评估LionGlass的潜力,这一家族的每个成员的成分都有自己的特性和潜在应用。他们将不同成分的LionGlass暴露于一系列化学环境中,以研究其是怎样反应的。研究结果将有助于该团队更好地了解LionGlass如何用于全球范围。

(高凌云编译自2023年8月14日SciTechDaily网站)