

RGO (还原氧化石墨烯)二三事

尚芸廷, 戴岳, 张建新, 朱楠, 宿艳*

大连理工大学基础化学实验中心, 辽宁 大连 116024

摘要: 在科技高速发展的今天, 新型复合材料的发现发展受到了广泛的关注与重视。本文通过小型可穿戴传感器与RGO(还原氧化石墨烯)的对话, 对新型材料RGO的制备、应用和发展展开了具体的描述。

关键词: RGO; 新型复合材料; 发展前景; 科技

中图分类号: G64; O6

Something about RGO (Reduced Graphene Oxide)

Yunting Shang, Yue Dai, Jianxin Zhang, Nan Zhu, Yan Su *

Experiment Center of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China.

Abstract: In the ever-evolving landscape of modern technology, the exploration and advancement of novel materials have garnered significant interest and acclaim. This paper takes an engaging narrative approach, portraying a dialogue between a small wearable sensor and Reduced Graphene Oxide (RGO), to elucidate the intricacies of RGO's preparation, application, and development. As a new composite material, RGO has emerged as a compelling contender in various technological fields.

Key Words: RGO; New composite materials; Development; Technology

1 对神秘的朋友产生好奇

大家好! 我是一个小型可穿戴电化学传感器。别看我身体小, 但是我的能量可不小哦。我能监测环境污染物指标, 能检测人类健康数据, 也能应用于光通信工作, 为人类的科研以及日常生活, 带来了极大的便利。你瞧, 这一个大艳阳天, 我的小主人在田间跑得满头大汗, 心跳升得飞快, 再这样下去可是要中暑咯。“滴滴滴!” 我急忙发出警示音提醒他坐下休息一会儿。躺在草地晒着太阳, 小主人抬起手腕直直盯着我, 突然向我发问: “小传感器, 你每天兢兢业业地帮助我监测我的健康数据, 你是怎么做到的呢?” 大大的眼睛眨呀眨, 透露出好奇与疑惑。“我的工作, 主要得益于我身体里的RGO (还原氧化石墨烯)复合材料哦!” 我回答道。“RGO? 好新奇的名字哦。”小主人轻声说, “能请他出来认识认识吗?” 敲着锣打着鼓, 我隆重地请出了我身体里的RGO, 我日常工作中最得力的助手, 请他为小主人答疑解惑。

“RGO朋友, 你愿意和我讲一讲关于你的故事吗? 比如说你的出生? 你的应用领域? 你的复合材料都有哪些? 都是怎么工作的? 哦对了, 你能给我介绍介绍你的发展现状和理想未来吗?” 小主人向RGO问道。

RGO哈哈一笑: “随我来! 我带你去RGO家族博物馆瞧上一瞧, 你的疑问就会迎刃而解啦!”

收稿: 2023-06-27; 录用: 2023-07-04; 网络发表: 2023-08-18

*通讯作者, Email: susu@dlut.edu.cn

基金资助: 国家质量工程项目(ZL2022091); 大连理工大学一般教学改革项目(物理化学实验教学资源信息化建设)

2 RGO的诞生

“嗖！”搭乘RGO家族专属时空穿越飞船，我们来到了RGO家族的大本营。这里有形形色色的RGO，他们外形相似却又不尽相同，身上的配饰丰富多彩，形状各异，凑近一看，才发现原来是不同的官能团。不同的RGO忙忙碌碌，在这所巨大的工厂里有条不紊地进行着自己的工作。我和小主人一路走，一路看，看得眼花缭乱，目不暇接，身旁的RGO缓缓开口，讲起了他的出生，关于RGO的“身世谜题”也逐渐清晰——RGO全名叫做还原氧化石墨烯，他的诞生主要归功于一位睿智的“科学家”——Hummers先生(Hummers法)。Hummers先生盯着手中的石墨粉末，觉得黑色过于单调，于是找来了高级造型师高锰酸钾和浓硫酸，请他们帮忙给石墨来个大改造，剪刀上下翻飞，石墨瞬间就从小胖墩变成了细长条；崭新的配饰装点石墨薄片的边缘，衍生羧基、酚羟基、环氧基团衬得石墨薄片更加楚楚动人。可是，Hummers先生并不满足于此，接下来，他决定亲自动手，赋予石墨薄片更新奇的外观。于是，他对此石墨薄片层进行了超声以及剧烈地搅拌^[1]，至此，氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)正式问世。只见他身姿窈窕，腰肢纤细柔软，在水中舞动飘荡，浅棕黄色的外衣更显精致。看着手中的石墨变得越来越漂亮，Hummers先生倍感欣慰，决定再接再厉，又采用了化学还原、加热、微波、电化学和光还原等新鲜时兴的化妆手法对单层氧化石墨烯进行深层改造。终于，功夫不负有心人，Hummers先生得到了还原氧化石墨烯(Reduced graphene oxide, RGO)^[2]。正是因为Hummers先生采用的方法多种多样，最后得到的RGO产品种类也纷繁复杂。不同种类的RGO佩戴着不同的官能团(图1)，发挥着各不相同的功能，在不同的领域发光发热，为RGO家族增光添彩。

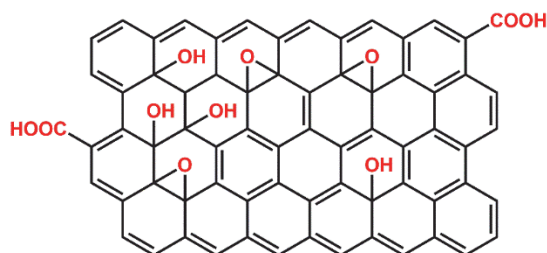


图1 RGO的精美外衣

3 RGO新型复合材料

听完RGO的自述，小主人颌首，对他有了初步的认识。“我们RGO家族不仅人丁兴旺，更懂得和外界加强合作，更好地提升自身技能哦！”RGO仰头看着我们，骄傲地介绍着。“哦？那你能给我们详细讲一讲你们的合作故事吗？关于你的复合材料，我很好奇。”小主人发问。“当然。随我这边来。”RGO昂首，引领着我们走进博物馆的复合材料展厅。

3.1 RGO/ZnO纳米复合材料

“首先，咱们就从我的ZnO朋友说起吧。”RGO抬手指向一块LED展板，俏皮的动画生动地展示着RGO/ZnO的外貌结构以及合成机理。“我与ZnO是老搭档啦，我们一起构成的RGO/ZnO纳米复合材料在光催化降解领域有着极为重要的地位。”RGO骄傲地说道。

伴随着动画的演示，RGO开口解释着他与ZnO的合作过程，“我可以均匀地包裹在ZnO的表面，与他紧密结合，形成六方纤锌矿的结构，外表光滑，却也呈现出颗粒及不规则片状。你们知道这样的合作方式，让我们RGO/ZnO复合材料在哪些方面获得了突出优势吗？”RGO一改之前内敛的形象，竟化身成一位小老师，向我和小主人这两位同学提出了问题。我与小主人面面相觑，连连摇头。RGO嘴角轻扬：“与ZnO联手后，我们的身体更加壮硕，这让我们对有机污染物的抓捕能力有了极大的提升，同时也提高了我们对有机污染物的教化能力，让他们改邪归正，变成活性氧，成为环境的小卫士^[3]。”

小主人面露疑惑，“RGO总是说RGO/ZnO复合材料在光催化降解领域贡献卓越，那光催化降解是一个怎样的化学过程啊？我好像从来没有听说过呢？”RGO略加思索，开口道：“光催化降解其实就是打败有机污染物，给他们正确的引导，让他们变成对环境没有污染的无机物，进而达到保护环境目的的化学过程。在这个过程中，我们的自由基卫士功不可没。他们强壮且有力，又精通兵法，巧用战略战术，擅长借助外力，也能够团结内部力量，统筹协调，实现自我提升。在光催化剂的加持下，小卫士获得了更为健美的身材；通过相互间的抱团取暖，互换自己的顶级装备，也就是加合、取代的方法，小卫士的战斗力的提升了一大截。他们与有机污染物持续地进行坚强的对抗。最后，在每一个小卫士的努力下，有机污染物节节败退，改邪归正，成为无毒无害的无机物，比如水和二氧化碳。”我和小主人点点头，理解了光催化降解的内涵。

RGO继续说道：“其实，我们的光催化降解性能得到提升，还有一位小朋友，发挥的作用也是举足轻重哦！他就是光生载流子。在光生载流子的帮助下，我与ZnO的光催化降解性能又迈上了新高度。”

“对了，你们还不清楚我的好帮手的真实身份吧？移步看看这块展板吧。”RGO带着我们向博物馆深处走去，边走边讲解：“这块展板展示的是分子星球上的故事。电子是分子星球上的居民，他们一直有一个远行梦，想去更远的地方，见更多的朋友，看更广阔的世界。因此，这些住在半导体催化剂价带国度的电子居民们无时无刻不在养精蓄锐。以光子为食，等到自己足够强壮，就会像火箭一样，从价带国飞到导带国。这时候价带国人去楼空，一个个房子就成了我们所说的空穴，当然，他们还有另一个名字，那就是光生载流子^[4]。外面的世界多彩美好，大部分电子会选择和新朋友们继续携手，向更远的地方进发。当然，也有一部分电子觉得故土难离，想要重新回到价带上的家里。他们会搭乘荧光船，启程回到家中，光生载流子消失，这就是电子-空穴对复合。电子居民们吃得越饱，选择在外游历的电子越多，我们RGO/ZnO复合材料光催化活性就越好哦(图2)^[5]！”

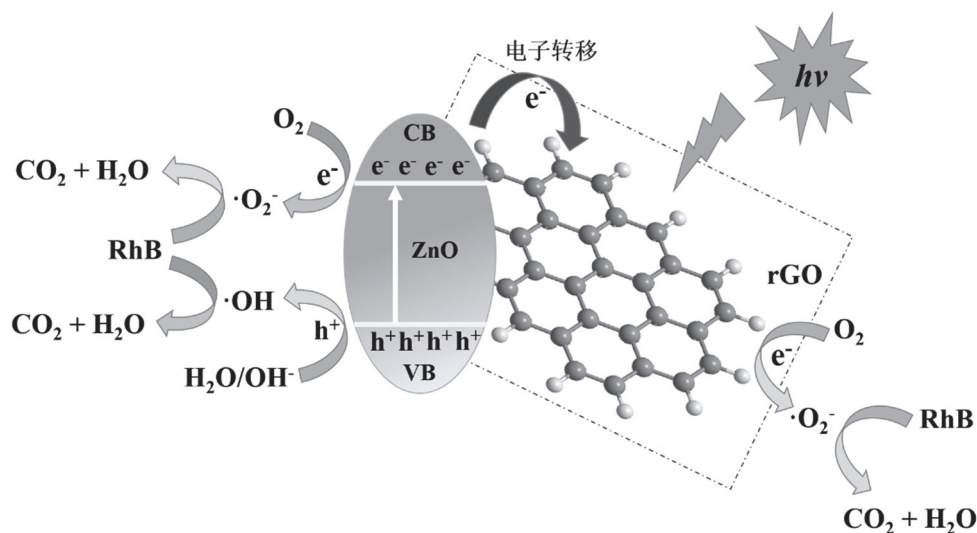


图2 光催化电子出游记

“你看，我利用我优异的电荷分离能力，既抑制电荷重组又促进电子迁移，准确地指挥光生载流子小朋友按时按需完成工作，让小朋友每天都能养足精神，活力四射。怎么样，我对提高光催化活性是不是有极大的助益呀？”RGO嘴角含笑，满满的自豪。

3.2 MoS₂/RGO复合材料

惊奇、欣喜，小主人脸上盈满笑意。继续向前走，我们来到了MoS₂/RGO复合材料的展区。这里不仅有MoS₂/RGO复合材料的模型展示，还有关于MoS₂/RGO复合材料优异的储电性能的详细解

释。MoS₂，一位与RGO携手，在电学领域闯出一片天的知己。可是这时，小主人又有了新的疑问：“RGO，据我所知，有很多材料都有非常优秀的导电性能，为什么你偏偏选中了MoS₂呢？”RGO眨了眨眼，神秘地说道：“别着急，听我慢慢介绍。”

“我的好朋友MoS₂是一位卓越的建筑师，大胆新奇的建筑风格是他的扬名中外的法宝。这里收藏的是MoS₂最为得意的一个建筑作品。你瞧，他把Mo和S作为建筑基材，不同于平常建筑的简单叠加，MoS₂建筑师把他们进行了挤压、翻转，重新排列，呈现出一种类似于三明治的层状结构。那么层与层之间就采用普普通通的并列排列吗？当然不会。我们的MoS₂想出了一种更新奇的方式，那就是建一座桥，让层与层之间独立却还能保持联系，这座桥就是范德华力。可是再坚固的桥梁也很难抵挡灾害的毁灭。当洪水或是地震袭击，桥就会坍塌断裂。可是建设不会终止，桥塌了就再修，即使换了建筑地点，两岸之间的联系也不会断。正是这种打不倒的精神，让无数游子心生向往，定居于此，而MoS₂这位伟大的建筑师，也乐于为这些游离在外的电子提供一个容身之所(图3)^[6]。”RGO娓娓道来。“但是，MoS₂也有一个致命的缺点。他能够安顿好这些游离的电子，却很难让他们物尽其用，找到合适自己的工作岗位，而我则担起了分配工作这一艰巨的任务。你看，我将我的身体平整地展开，而MoS₂则细细密密地笔直地生长在我的身体上，互相连接，交错纵横，形成网格结构^[7]，使材料形成多褶皱片层状，就像老人沟壑纵横的脸，这些褶皱就是电子们的家。他们在家聚会，聊天交友，养精蓄锐，等到电池工作时，随着我一声令下，他们则一往无前，努力工作。这样的多褶皱片层状，缩短了电子们从家中到工作岗位的距离，减少了路程上浪费的时间，有效提升了工作效率。看这边，一声哨响，一个个圆滚滚的电子就冲出家门，飞奔向工作岗位。在我们的共同努力下，材料导电性终于得到了有效的解决。可是，MoS₂建筑师在最初的建设工作中，为了追求美观，在建筑外表加了许多装饰物——不饱和和硫悬挂键，这些装饰物在电子上班的途中，会成为交通的阻碍，看到马路中间尽职尽责的交通警察了吗？那就是维持秩序的我，正使劲浑身解数，扫除障碍，为电子们开出一条阳光大道。”

“MoS₂/RGO复合材料优异的电学性能，与RGO和这位大建筑师都密不可分呢！”小主人称赞道。

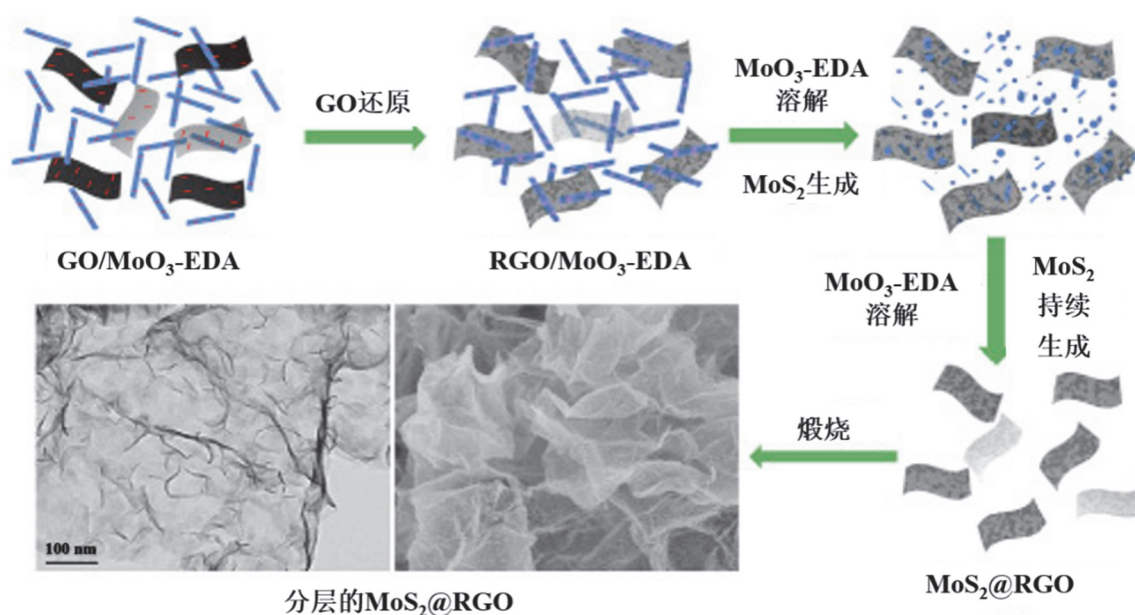


图3 MoS₂/RGO材料的建筑过程^[8]

3.3 RGO粘胶复合织物

RGO浅浅一笑：“还有厉害的哦。再给你们介绍一个朋友好不好？”小主人连连鼓掌。这次，RGO竟直接请出了他的合作伙伴粘胶织物，由他带领我们深入粘胶织物的世界，见证RGO粘胶复合织物的卓越优势。

远处，粘胶织物热情地向我们招手，欢欢喜喜地迎接我们到他们的粘胶织物博物馆参观。一边走，一边向我们介绍道：“我们粘胶织物是由粘胶纤维与纺织材料复合而成的，具有优异的吸湿性、悬垂性、透气性、防静电性以及良好的力学性能，但是我们的应用并没有得到推广，作为基材的研究更是少之又少^[9]。”只听粘胶织物轻轻一声叹息。转瞬，语气又转为先前的热情：“但是，我们的优势也并没有被埋没哦！”

“拿你举例子吧，传感器小朋友。我和我的这位RGO朋友一同构成的RGO粘胶复合织物是一位优秀的电报员，能够防止外面的信号干扰我们内部朋友的工作，当然，也能防止我们的工作成果被窃取哟！这就是人们所说的电磁屏蔽功能。这个功能在你们可穿戴传感器领域可发挥着重要作用哦。”我瞪大双眼，倍感惊奇。驻足于RGO粘胶复合织物的展品前，粘胶织物打开了话匣子：“你看，RGO站在我的粘胶纤维表面，他们舒展身体，形态各异，或呈片状或呈层块状，大小与纤维直径相当。虽然RGO站位整齐又密集，但是他们也很难挡住我的光芒。我的粘胶纤维沟槽结构依然可见，纤维间依然有空隙。”

“你看这个演示模型。一束电磁波打到RGO粘胶复合织物上，我们表面上的安全卫士——可移动电载流子立刻警觉，全力应战，阻挡掉敌人的首次进攻。奈何电载流子与电磁波比起来略显瘦小，部分电磁波还是会深入材料内部。这时，我们表面的多孔结构立刻进入战备模式，迸发出强大的能量，对电磁波发起多次反攻，进一步衰减耗散电磁波的能量(图4)。这时RGO发挥自己的导电优势，电磁波在强大攻势下溃不成军，被转化为微电流形式进行热发散。织物表面RGO排列越整齐密集，反射效率则越高，电磁屏蔽效能也就越优秀^[10]。”

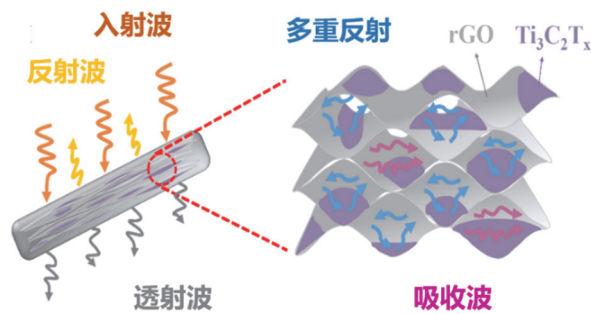


图4 RGO粘胶复合织物电报员工作示意图^[11]

“RGO和他的朋友们可谓是个个身怀绝技，这些复合材料给人类的生存发展带来了多少便捷与幸福。”我在心中暗道。

4 RGO发展现状及前景

4.1 发展现状

博物馆之旅很快步入了尾声，结语展板写出来对RGO现阶段发展情况的概述以及对未来的展望。“发展离不开高科技的加持，新型材料又是高科技技术中的重要领域。复合材料的研究深度和应用广度及其生产发展的速度和规模，已成为衡量一个国家科学技术先进水平的重要标志之一。”RGO慢慢说起，“我的这些相关的复合材料具有重量轻、强度高、加工成型方便、弹性优

良、耐化学腐蚀和耐候性好等特点，已逐步取代木材及金属合金，广泛应用于航空航天、汽车工业、化工纺织、机械制造、医疗器械以及制造体育运动器材和建筑材料等众多领域，对现代科学技术的发展有着十分重要的作用，在近几年更是得到了飞速发展。在刚才的参观中，不难看出，我对电子有着天生的领导力，能够有条不紊地指挥他们高效地工作，提高电池的功能。不仅如此，我也有很好的生物相容性，比如生活在人类日常佩戴的可穿戴传感器中，帮助人们监测健康数据。种种优势让我在传感领域中，有着举足轻重的地位。”

“除此之外，超级电容器也是我发光发热的舞台哦！”RGO继续补充道。“超级电容器作为除电池外的一大类储能器件，虽然储能效果介于传统电容器和电池之间，但由于其高功率密度和长循环寿命而被广泛关注；这其中柔性超级电容器具有小巧、可穿戴、可折叠和可变形等特点，在柔性精细电子器件方面应用广泛^[12]。举个例子吧，我们生活中见到的柔性折叠屏手机的柔性显示屏，其实就是一种柔性精细电子器件哦！制备工艺简单、成本低廉，我已经成为超级电容器电极材料的不二选择啦^[13]！”

4.2 发展前景

“虽然我有这么多的优点，但是我也有很大的进步空间哟！比如在未来我要掌握变形的本领，能够控制自己身形大小、宽窄、薄厚，因地制宜，在不同场景下，变为最合适形态，达到最理想的工作状态；我要提升我的传感能力，磨炼自己的应变能力，在面对重重阻挠时，也要有拨云见日的本事，直抓根源，克服不速之客的毒性和生物不相容性^[14]，高效提取数据；我要精进自己与外界合作共赢的能力，更好地借助催化剂的帮助，生成更为多样的复合材料，造福于人类。”

客观、全面、冷静，RGO透彻地分析了自己的现在和未来，脸上是掩藏不住的骄傲。他目光深远，仿佛在畅想那个璀璨的明天。

5 结语

博物馆之旅简短却收获颇丰，这一次非凡的经历让我对这位老朋友第一次有了如此透彻的认识，我的小主人也在这次的游览中收获颇丰。RGO虽然从合成和证实存在到今天只有短短十几年的时间，但是已成为学者研究的热点，有望在诸多应用领域中成为新一代器件。相信随着时间推移，技术发展，RGO更多的理想性能会被充分发掘应用，最终更好地服务于人类生活与发展。让我们发展科技，应用科技，发掘更多更好的优质电学材料，一起向未来！

参 考 文 献

- [1] 任小孟, 王源升, 何特. 材料工程, **2013**, No. 1, 1.
- [2] 朱玉方, 张慧丽, 梁丰国, 杨新伟, 陈长科, 买买提江·依米提, 马俊红. 材料导报, **2024**, 38 (12), 22110271.
- [3] 贾可, 刘罡, 陈仕飞, 王伟, 武荣兰. 化工新型材料, **2023**, 6 (51), 225.
- [4] 马瑞霄, 周浩, 张燕辉. 工业水处理, **2021**, 41 (3), 53.
- [5] 杜勇慧, 李玉环, 杨桐骁, 孙思进, 陈红. 吉林大学学报(理学版), **2022**, 60 (6), 1452.
- [6] 祝玉婷, 闫共芹, 林羽芊. 储能科学与技术, **2023**, 12 (3), 698.
- [7] 张捷, 曾晓飞, 李克训, 马江将, 王东红. 功能材料, **2019**, 50 (5), 5194.
- [8] Che, Z. Z.; Li, Y. F.; Chen, K. X.; Wei, M. D. *J. Power Sources* **2016**, 331 (1), 50.
- [9] 谢梦玉, 胡啸林, 李星, 瞿建刚. 纺织学报, **2022**, 43 (4), 117.
- [10] 王玉维豪, 史梦晗, 劳洪烽, 代梦龙, 赵连英, 洪兴华. 棉纺织技术, **2023**, 51 (5), 31.
- [11] Zhang, Y. L.; Ruan, K. P.; Shi, X. T.; Qiu, H.; Pan, Y.; Yan, Y.; Gu, J. W. *Carbon* **2021**, 175, 271.
- [12] 李奇龙, 曹金鑫, 张青. 稀有金属, **2022**, 46 (9), 1133.
- [13] 侯朝霞, 王健, 屈晨滢, 王晓慧. 人工晶体学报, **2020**, 49 (5), 930.
- [14] 雷新有, 左国防, 王鹏, 张建斌. 生物技术通报, **2018**, 34 (9), 90.