2016 年度国家自然科学奖推荐公示表

项目名称	**高比能量超级电容器电极材料的微纳调控、合成及其器件应用研究**

项目简介（限 1200 字）：

本项目属于材料科学学科，是纳米储能材料和超级电容器器件研究的国际前沿课题。能源是人类活动的物质基础，能源的发展是全人类共同关心的问题，也是我国社会经济可持续发展的重大需求。超级电容器是介于二次电池和传统电容器之间的一种新型储能装置，具有功率密度高、充放电速度快、使用寿命长、工作温度范围宽、对环境无污染等优点，是最有希望的绿色能源之一，在电子产品、电动汽车、电力峰谷调节和风力、太阳能发电能量储存等领域得到了广泛应用；但其能量密度及循环稳定性有待进一步提升，需着重解决电极材料的导电性、结构的稳定性及复合电极材料的协同储能问题。本成果针对如何在保持高功率密度下提高储能材料的能量密度这一关键科学问题开展了大面积可控制备低成本、高性能纳米储能材料和超电容器件研制的原创性研究，**主要科学发现如下：**

（1）创新性地发展了电化学界面限域反应可控制备一维 MnO_2 基储能材料的新思路，通过 MnO_2 和碳或金属氧化物优势性能之间的耦合，解决了 MnO_2 基储能材料的电子传输与离子扩散速率较慢的瓶颈问题；为高容量、高倍率及高稳定性 MnO_2 基柔性储能材料的大面积可控制备提供了新方法。

（2）提出了构筑新型柔性固态超级电容器储能器件的新策略。利用聚合物电解质来稳定金属氮化物电极电化学活性的新方法，设计了首款柔性固态金属氮化物超级电容器；基于不同电极材料析氢、析氧电位的差异，率先构建了系列高工作电压和能量密度的非对称柔性固态超级电容器；为研发新型可穿戴电子设备亟需的柔性高效绿色能源提供了新途径。

（3）通过纳米结构优化策略，构筑出具有大比表面积和多孔道结构的纳米储能材料，阐明了其电子、离子传输的机理，为设计和制备高比电容和倍率性能新型过渡金属基储能材料提供了科学依据。

科学价值：本研究成果阐明了过渡金属基纳米储能材料结构与容量的关系，发展了几种大容量的柔性电极材料的大面积可控制备方法；在超电容器件研制方面，发现了电极材料的循环稳定性、混合型超电容正负极匹配性存在的科学问题，并提出了有效的解决方案；设计和研制了多款新型柔性高比能量超级电容器。研究成果增进了纳米尺度下储能材料的材料物理与化学知识，为纳米储能材料的设计与可控制备和高性能柔性超电容器件的研发提供了重要的科学基础。并且通过与惠州亿纬锂能股份有限公司、广州天赐新材料股份有限公司、广州鹏辉能源科技股份有限公司等进行纳米能源材料的产学研合作，初现产业化前景。

8 篇代表性论文的 SCI 影响因子总和为 111.215，平均影响因子 13.9/篇；被国内外学者在 *Chem. Rev.*，*Chem. Soc. Rev.*，*ACS Nano*，*PNAS*，*Adv. Mater.* 等期刊 **SCI-他引达 1,188 次，其中单篇论文 SCI-他引次数最高为 287，7 篇论文 SCI-他引超过 100 次。20 篇主要论文的 SCI-他引达 1,736 次，8 篇论文进入 ESI 高被引用论文，代表性论文 6 入选“2013 年中国百篇最具影响国际学术论文”。**

客观评价（限 2 页）：

8 篇代表性论文的 SCI 影响因子总和为 111.215，平均影响因子 13.9/篇；被国内外学者在 *Chem. Rev.*，*Chem. Soc. Rev.*，*PNAS*，*Adv. Mater.* 等期刊 SCI-他引达 1,188 次，其中单篇论文 SC-他引次数最高为 287，7 篇论文 SC-他引超过 100 次。20 篇主要论文的 SCI-他引达 1,736 次，8 篇论文进入 ESI 高被引用论文。

代表性论文 6：H-TiO_2 @MnO_2 //H-TiO_2 @C Core–Shell Nanowires for High Performance and Flexible Asymmetric Supercapacitors(*Adv. Mater.*，**2013**，*25*，267 – 272）入选“2013 年中国百篇最具影响国际学术论文”（http://emuch.net/html/201501/8371591.html）；迄今受到国际同行的 192 次他引。

项目执行期间，第一完成人童叶翔当选为中国化学会理事和教育部教学指导委员会委员；第二完成人李高仁获得了“中国化学会青年化学家奖”和“中国电化学青年奖”，并入选“教育部新世纪人才”和广州市首批“珠江科技新星”；第三完成人卢锡洪获得广东省“杰出青年基金”资助，并获得了“中国青少年科技创新奖”、广东省优秀博士学位论文（http://xwb.gdhed.edu.cn/news/20150319.htm）和广东省“南粤优秀研究生”等奖励。

科学发现（1）：

德国埃尔兰根-纽伦堡大学 PatrikSchmuki 教授在其综述性论文(**代表性引文 1**：*Chem. Rev.*, **2014**, *114*, 9385-9454)中详细评述了**代表性论文 3**(*NanoLett.*, **2012**, *12*, 1690−1696)，指出“氢化处理 TiO_2 纳米管显著提高了其电化学储能性能，这主要归功于 TiO_2 载流子浓度的提升及其表面产生的氢氧官能团”。

美国密苏里州堪萨斯城市大学的 Xiaobo Chen 教授与中国科学院长春光学所 Lei Liu 教授合著的综述性论文(**代表性引文 2**：*Chem. Rev.*, **2014**, *114*, 9890-9918)大篇幅介绍了**代表性论文 3**，并指出“卢等报道的氢化处理 TiO_2 纳米管在超级电容器方面表现出优异的电化学性能”。Xiaobo Chen 教授还在其另一篇重要的综述性文章(**代表性引文 3**：*Chem. Soc. Rev.*, **2015**, *44*, 1861-1885)中再次对**代表性论文 3** 进行了全面的阐述：“卢等使用纯氢气对阳极氧化得到的 TiO_2 纳米管进行 300-600 °C 的热处理，TiO_2 纳米管阵列通过 Ti 纤维在 30 V 电压下，以石墨棒为对电极在 NH_4F、甘油水溶液里进行阳极氧化 3 小时得到的”。

欧洲科学院院士，法国格勒诺布尔大学分子化学系主任 Serge Cosnier 教授在其研究工作(*Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7, 1884-1888)对**代表性论文 3** 给予了很高的评价：“氢化处理得到的 TiO_2 纳米管无论在作为电极材料方面还是作为活性载体方面，都已成为构筑高性能超级电容器的重要组成部分”。

美国著名材料科学家 Zhong Lin Wang 教授(欧洲科学院院士，中国科学院外籍院士)在其论文中(**代表性引文 4**：*ACS Nano*, **2013**, *7*, 2617-2626)对**代表性论文 4**：(*NanoLett.*, **2012**, *12*, 3803−3807) 给予了较高评价：“李等设计和合成了具有用于超电容的高性能 MnO_2/Mn/MnO_2 纳米管阵列”。

韩国 Hanyang University 的 SeonJeong Kim 教授在其论文中(**代表性引文 8**：*Adv. Mater.*,**2014**, *26*, 2059-2065)对**代表性论文 4** 也给予了充分肯定：“制备的 MnO_2/Mn/MnO_2 纳米管阵列可用于提高电极材料的导电性和改进电子传输路径”。

科学发现（2）：

美国德雷克塞尔大学 Yury Gogotsi 教授在其研究论文中(**代表性引文 5**：*Proc. Natl. Acad. Sci.***2014**, 111, 16676-16681.)引用**代表性论文 5** (*NanoLett.*,**2012**, *12*, 5376−5381) 指出“PVA/KOH 聚合物电解质在电化学储能装置中的已被广泛应用”。

美国威斯康星大学麦迪逊分校 Xudong Wang 教授在其综述性论文(**代表性引文 6**：*Chem. Rev.*,**2014**, *114*, 9346 − 9384) 中详细评述了我们的关于 H-TiO_2@MnO_2//H-TiO_2@C 柔性非对称超级电容器工作(**代表性论文 6**：*Adv. Mater.*,**2013**, *25*, 267−272)，并引用了论文中的重要数据，指出：“卢等人以氢化的 TiO_2@MnO_2 核壳纳米线为正极和氢化的 TiO_2@C 核壳纳米线为负极研制了一款柔性固态非对称储能器件。氢化后 TiO_2 核的电子传输能力得到极大地改善，可以作为高导电的通道来负载电活性材料，并能有效地提高它们的电容性能。基于这些核壳纳米线的非对称器件的工作电压高达 1.8 V，比电容达到 139.6 F/g，且具有非常好的循环稳定性(循环 5000 圈后，容量只损失不到 8.8%)”。

美国加州大学河滨分校 Yadong Yin 教授在其发表的综述性论文(**代表性引文 7**：*Chem. Rev.*, **2014**, *114*, 9853−9889)引用**代表性论文 6** 指出“这些 MnO_2/TiO_2 复合材料在未来先进能源储存领域极具发展潜力”。

美国著名材料科学家 Zhong Lin Wang 教授在其最近的工作(*Nano Lett.*, **2014**, *14*, 731-736；*ACS Nano*, **2013**, *7*, 2617-2626.)中多次引用并介绍我们研制的 H-TiO_2@MnO_2//H-TiO_2@C 非对称超电容器件，并直接引用**代表性论文 6** 中的相关数据。

暨南大学麦文杰研究员在 2014 年发表的综述文章(*Nano Energy*，**2014**, *8*, 274-290)中大篇幅介绍了我们关于柔性固态锰基非对称超级电容器研究工作。

科学发现（3）：

电极材料性能受到众多因素的影响，例如，电极的比表面积、离子的传输速率、电子的传输速率等。上述研究成果受到了国际同行的广泛关注，被包括 *Energy Environ. Sci.*, *Adv. Energy Mater.*, *Adv. Funct. Mater.*, *Nano Energy*, *Chem. Mater.*, *Small* 等在内的多篇国际知名杂志正面引用。其中美国加州大学洛杉矶分校的 Richard B. Kaner 教授引用**主要论文 10** (*Macromolecules*, **2010**, *43*, 2178-2183) 指出“电化学是研究聚苯胺纳米结构合成机理的一种有效手段”(*J. Mater. Chem.*, **2011**, *21*, 3534-3550)。

湖南大学的段辉高教授在其论文(*Electrochim. Acta*, **2015**, *151*, 510-516)中详细论述了**主要论文 10**，并引用了论文中的重要数据。

基于我们有关纳米储能材料和柔性超电容器件的原创性工作和学术影响，近两年多次应邀为 *Adv. Mater.*，*Energy Environm. Sci.*，*J. Mater. Chem. A*，*Nanoscale*，*Sci. China Tech. Sci.*，中国科学-化学等高水平期刊撰写综述和评论性文章。

代表性论文专著目录（不超过 8 篇）

序号	论文专著名称/刊名/作者	影响因子	发表时间（年月日）	通讯作者	第一作者	SCI 他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Facile synthesis of large-area manganese oxide nanorod arrays as a high-performance electrochemical supercapacitor/ Energy & Environmental Science/Xihong Lu, Dezhou Zheng, Teng Zhai, Zhaoqing Liu, Yunyun Huang, Shilei Xie and Yexiang Tong*	20.523	2011 年 06 月 22 日	童叶翔	卢锡洪	152	181	是
2	Single-crystal ZnOnanorod/amorphous and nanoporous metal oxide shell composites: Controllable electrochemical synthesis and enhanced supercapacitor performances/ Energy & Environmental Science/Yun-Bo He, Gao-Ren Li,* Zi-Long Wang, Cheng-Yong Su and Ye-Xiang Tong	20.523	2011 年 03 月 04 日	李高仁	贺沄波	80	95	是
3	Hydrogenated TiO_2 Nanotube Arrays for Supercapacitors / Nano Letters/ Xi-Hong Lu, Gongming Wang, Teng Zhai, Ming-Hao Yu, Jiayong Gan, Yexiang Tong*, Yat Li*	13.592	2012 年 02 月 24 日	童叶翔/ Yat Li	卢锡洪	287	333	是
4	Design and Synthesis of MnO_2/Mn/MnO_2 Sandwich-Structured Nanotube Arrays with High Supercapacitive Performance for Electrochemical Energy-Storage/ Nano Letters/ Qi Li, Zi-Long Wang, Gao-Ren Li,* Rui Guo, Liang-Xin Ding, and Ye-Xiang Tong	13.592	2012 年 06 月 25 日	李高仁	李奇	141	152	是
5	Stabilized TiN nanowire arrays for highperformance and flexible supercapacitors/ Nano Letters/ Xihong Lu, Gongming Wang, Teng Zhai, Ming-Hao Yu, Shilei Xie, Yichuan Ling, Chaolun Liang, Ye-Xiang Tong*, and Yat Li*	13.592	2012 年 09 月 04 日	童叶翔/ Yat Li	卢锡洪	108	137	是
6	H-TiO_2@MnO_2 // H-TiO_2@C Core-Shell Nanowires for High Performance and Flexible Asymmetric Supercapacitors / Advance Materials/ Xihong Lu, Minghao Yu, Gongming Wang, Teng Zhai, Shilei Xie, Yichuan Ling, Yexiang Tong* and Yat Li*	17.493	2012 年 10 月 19 日	童叶翔/ Yat Li	卢锡洪	192	226	是
7	Mesoporous MnO_2/Carbon Aerogel Composites as Promising Electrode Materials for High-Performance Supercapacitors / Langmuir/Gao-Ren Li,* Zhan-Ping Feng, Yan-Nan Ou, Dingcai Wu, Ruowen Fu, and Yexiang Tong*	4.457	2010 年 01 月 12 日	李高仁/童叶翔	李高仁	115	118	是
8	Co_3O_4/$Ni(OH)_2$ composite mesoporousnanosheet networks as a promising electrode for supercapacitor applications/ Journal of Materials Chemistry/ Jin-Hui Zhong, An-Liang Wang, Gao-Ren Li,* Jian-Wei Wang, Yan-Nan Ou and Ye-Xiang Tong	7.443	2012 年 02 月 10 日	李高仁	钟锦辉	113	1114	是

主要完成人情况

姓名	童叶翔	排名	1
行政职务		技术职称	教授
工作单位	中山大学	完成单位	中山大学

对本项目的技术创造性贡献（限 300 字，必须以本项目的主要知识产权为佐证）：

负责本成果的总体性设计和指导，包括思路的提出与论证、项目的立项和实施方案的规划及研究论文的撰写等。对《重要科学发现》中所列 1、2、和 3 都做出了创造性的贡献，是代表性论文 1、3、5、6、7 的通讯作者，提出纳米储能材料的大面积可控制备和超电容器件研制的学术思想。

主要完成人情况

姓名	李高仁	排名	2
行政职务	物理化学所副所长	技术职称	教授
工作单位	中山大学	完成单位	中山大学

对本项目的技术创造性贡献（限 300 字，必须以本项目的主要知识产权为佐证）：

对本成果“重要科学发现”中所列第 1、3 点科学发现做出了创造性贡献。是代表性论文 2、4、7、8 的通讯作者。开发出 ZnO 模板法可控电化学合成纳米阵列材料新方法和发展了电化学限域生长合成法。

主要完成人情况

姓名	卢锡洪	排名	3
行政职务		技术职称	副教授
工作单位	中山大学	完成单位	中山大学

对本项目的技术创造性贡献（限 300 字，必须以本项目的主要知识产权为佐证）：

对本成果“重要科学发现”中所列第 1、2 和 3 点科学发现做出了创造性贡献，是代表性论文 1、3、5、6 的第一作者，为纳米储能材料制备与表征和柔性固态超电容器件的设计与研制做出了重要贡献。

主要完成人情况

姓名	李　奇	排名	4
行政职务		技术职称	讲师
工作单位	河南大学	完成单位	中山大学

对本项目的技术创造性贡献（限 300 字，必须以本项目的主要知识产权为佐证）：

对本成果“重要科学发现”中所列第 1 点科学发现做出了创造性贡献，设计并制备出了“三明治”结构的 MnO_2/Mn/MnO_2 储能材料，是代表性论文 4 的第一作者。

主要完成人情况

姓名	翟　腾	排名	5
行政职务		技术职称	讲师
工作单位	南京理工大学	完成单位	中山大学

对本项目的技术创造性贡献（限 300 字，必须以本项目的主要知识产权为佐证）：

对本成果“重要科学发现”中所列第 1、2 点科学发现做出了重要贡献，是代表性论文 1 的第三作者、代表性论文 3 的第三作者、代表性论文 5 的第三作者和代表性论文 6 的第四作者，为纳米储能材料制备与表征和超电容器件的研制做出了创新性工作。

完成人合作关系说明：

本项目由中山大学在 2007 年 1 月至 2012 年 12 月期间独立完成，五个完成人按排名顺序分别为童叶翔、李高仁、卢锡洪、李奇、翟腾。

第一完成人童叶翔和第二完成人李高仁在 2007 年 1 月至 2012 年 12 月期间，在论文合著、共同立项等方面合作，合作成果包括代表性论文 2、4、7、8 和主要论文 9、10、11、12、13、17、18、19、20，证明材料为附件代表性论文 2、4、7、8。

第一完成人童叶翔和第三完成人卢锡洪在 2007 年 1 月至 2012 年 12 月期间，在论文合著、共同立项等方面合作，合作成果包括代表性论文 1、3、5、6 和主要论文 14、15、17、18，证明材料为附件代表性论文 1、3、5、6。

第一完成人童叶翔和第四完成人李奇在 2007 年 1 月至 2012 年 12 月期间，在论文合著、共同立项等方面合作，合作成果包括代表性论文 4，证明材料为附件代表性论文 4。

第一完成人童叶翔和第五完成人翟腾在 2007 年 1 月至 2012 年 12 月期间，在论文合著、共同立项等方面合作，合作成果包括代表性论文 1、3、5、6 和主要论文 14、15、16，证明材料为附件代表性论文 1、3、5、6。

上述内容真实，特此说明。

推荐单位意见（限 600 字）：

大面积可控制备纳米储能材料和高性能超电容器件研制是材料科学领域的国际研究热点，具有重要的学术价值和应用前景。近年来，中山大学研究团队针对如何在保持高功率密度下提高储能材料的能量密度这一关键科学问题开展深入系统的研究，实现了系列新型纳米储能材料的大面积可控制备和柔性超电容器件的研制，并阐明了相关的构效关系。

本项目创新性地发展了电化学界面限域反应可控制备储能材料的新思路，阐明了过渡金属基纳米储能材料结构与容量的关系，大面积可控制备了高比能量的纳米储能材料；发现了电极材料的循环稳定性、混合型超电容正负极匹配性存在的科学问题，并提出了有效的解决方案；设计和研制了多款新型柔性高比能量超级电容器。

本项目研究成果发表在 *Adv. Mater.*，*Nano Lett.*，*Energy Environ. Sci.* 等国际重要学术期刊上。8 篇代表性论文的 SCI 的平均影响因子 13.9/篇；被国内外学者在 *Chem. Rev.*，*Chem. Soc. Rev.*，*PNAS*，*Adv. Mater.* 等期刊 SCI 他引 1,188 次；20 篇主要论文被他引 1,736 次，他引 100 次以上论文 7 篇，单篇最高他引 287 次，其中 8 篇为 ESI 高被引论文，1 篇论文入选“2013 年中国百篇最具影响国际学术论文”。部分成果获得 2015 年广东省科技一等奖。

该成果中的单位、人员排序和阐述的内容真实、可靠。

推荐该项目为国家自然科学奖＿二＿等奖。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文合著、共同立项	李高仁/2	2007 年 1 月至 2012 年 12 月	代表性论文 2、4、7、8，和主要论文 9、10、11、12、13、17、18、19、20	代表性论文 2、4、7、8	
2	论文合著、共同立项	卢锡洪/3	2007 年 1 月至 2012 年 12 月	代表性论文 1、3、5、6，和主要论文 14、15、17、18	代表性论文 1、3、5、6	
3	论文合著、共同立项	李奇/4	2007 年 1 月至 2012 年 12 月	代表性论文 4	代表性论文 4	
4	论文合著、共同立项	翟腾/5	2007 年 1 月至 2012 年 12 月	代表性论文 1、3、5、6 和主要论文 14、15、16	代表性论文 1、3、5、6	

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：童叶翔