

· 研究进展 ·

世界前沿科学发展趋势研究： 基于 ESI 数据库和十大突破分析

钱万强^{1,2} 张峰³ 江海燕³ 墨宏山³ 李志兰^{4*}

(1. 中国农业科学院 人事局, 北京 100081; 2. 中国农业科学院 深圳农业基因组研究所, 深圳 518120;
3. 科学技术部 基础研究管理中心, 北京 100086; 4. 浙江省自然科学基金委员会办公室, 杭州 310012)

[摘要] 21 世纪以来, 一些前沿科学领域正孕育革命性变革与突破, 更引领了基础研究的发展。本文分析了世界基础研究发展特征, 结合 ESI 数据库的热点前沿、*Science* 杂志的年度十大突破等前沿科学方向, 进一步总结了部分重要学科的发展方向, 以及前沿科学的发展特点, 并提出了我国基础研究发展的启示。

[关键词] 基础研究; 前沿科学; 十大突破; ESI 数据库

基础研究是人类文明进步的动力, 是国家科技综合科技实力的根基。随着人类认识活动的不断深入, 社会经济环境和需求的变化, 以及科学自身发展的需要, 当前世界基础研究的发展出现了显著变化, 正呈现出鲜明的时代特点, 相关领域技术发展迅速, 知识呈现爆炸增长态势, 一些重要科技领域正在孕育革命性变革和突破。而前沿科学属于基础研究中最有活力的部分, 近年来部分前沿科学领域有了质的变化, 一定程度上引领了基础研究的进步。

1 世界基础研究发展特征

1.1 新一轮科技革命的特征日趋显现

当前, 人类对自然规律的认识已经达到了前所未有的深度和广度, 特别是 21 世纪以来, 一些重要科技领域正在孕育革命性变革和突破。从宇观世界到微观粒子, 从生命起源到人类的自我认识, 从思维科学到人工智能, 人类对客观世界的探索在不断突破。经过长期的科学积累, 一些领域的知识积累已经到了量变到质变的边缘, 这些突破性的原始创新, 将引发新的科学革命, 为人类带来新一轮曙光^[1]。

1.2 基础研究发展呈现双力驱动

基础研究发展的初期, 由个人兴趣驱动的自由探索研究一直是其主要形式, 随着人类经济社会活动的深入发展, 基础研究对推动经济和社会发展的引领作用日益明显, 各国政府对基础研究的宏观干预和引导不断加强, 对基础研究的投入不断加大。基础研究由最初的兴趣驱动逐步转为个人兴趣和国家目标的“双力驱动”发展模式, 同时由于基础研究对于产业技术和企业的支撑力日益显现, 国家目标的驱动越来越多的包括了政府支持和企业资助等多种驱动力形式。

1.3 学科分化与交叉融合并进

基础研究的发展正在向深度和广度两个方面延伸, 科学前沿不断细化和深化, 分支学科不断涌现。传统学科不断地分化出新的分支, 如物理学已分化为粒子物理、原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、激光物理、电子物理、等离子物理等众多的新分支。随着新兴学科的生长、学科发展深入, 在一些知识交叉点上产生了越来越多的交叉学科, 如基于生物学、信息科学等新兴学科交叉产生一系列新的学科, 促进了生命科学的发展, 而纳米科技、生物技术、信息技术、认知科学本身都是学科交叉的热点领域,

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2016-09-07

* 通信作者: Email: zhilanli@zjnsfc.gov.cn

当今前沿科学领域多数也属于交叉学科。

1.4 新兴科技力量逐步走上前台

当前,以中国为代表的新兴国家正在逐步崛起,从科研条件、人才储备、科技体制等各个方面追赶发达国家,由欧美国家主导全球科技发展的局面正在发生变化,全球科技竞争格局呈现出“版图东移”的新态势。当前美国仍然是世界第一研发大国,但中国已经居第 2 位,占到全球总支出的 20%,接近欧盟的总和;增长速度世界第一,约占 2003 年至 2013 年全球研发支出增长额的 1/3^[2]。同时,其他新兴科技力量也逐步走向前台,东亚和东南亚国家的研发支出增长非常迅速,占比从 2003 年的 25% 增长到 2013 年的 37%^[3]。新兴科技力量的产出也处于逐步上升趋势,据 *Nature* 杂志 2015 年自然指数分析,北美、北欧和西欧以及东亚和东南亚等 3 个地区的指数贡献率占全世界 91%,东亚和东南亚占到全球的 19%,呈逐年上升趋势^[3]。

1.5 全球化国际合作日益加强

随着基础研究领域的不断扩大和向纵深发展,所要解决的科学问题越来越复杂,所需投入的财力和智力资源越来越多,单靠原有的单一学科、个人或小团队的组织方式,难以适应重大科学问题的研究;需要多学科、多机构、多团队的合作与协同创新,全球合作已逐步成为基础研究的一个重要的方式。在此背景下,欧洲核子研究中心、国际岩石层计划、国际大洋钻探计划、人类和水稻基因组计划、全球变化计划、国际大陆钻探、全球海洋观测网、反物质探测计划等一系列全球各国大合作的大科学计划相继出台。

2 世界基础研究前沿热点领域与方向

2.1 热点学科分析

为了得到目前研究较为热门的学科,本文利用基本科学指标数据库(Essential Science Indicators,简称 ESI 数据库)分析了 22 个自然科学学科 SCI 的论文分布情况,数据检索时间为 2016 年 6 月 30 日。如表 1 所示,临床科学、化学、物理学是全部 22 个学科中论文数量最多、总被引用次数最多的学科,生物学/生物化学、分子生物学和遗传学、神经科学/行为学、免疫学等生命学科领域,以及空间科学等篇均被引用次数较高,代表了这几个学科领域是目前基础研究领域较为关注的热点领域。

表 1 ESI 数据库 22 个学科文章情况

排序	研究领域	SCI 论文数	总被引用次数	篇均被引用次数	高引用论文
1	临床医学	2 494 294	32 297 297	12.95	24 723
2	化学	1 546 690	20 542 003	13.28	15 523
3	物理学	1 167 257	12 841 019	11	11 690
4	生物学/生物化学	695 466	11 763 637	16.91	6 984
5	分子生物学和遗传学	419 837	10 727 717	25.55	4 236
6	神经科学/行为学	485 645	8 854 377	18.23	4 898
7	工程学	1 085 403	6 993 166	6.44	10 833
8	材料科学	685 616	6 974 412	10.17	6 943
9	动植物科学	685 999	6 226 864	9.08	6 807
10	社会科学	789 782	5 100 635	6.46	8 042
11	环境科学/生态学	390 255	4 952 493	12.69	3 864
12	免疫学	240 731	4 743 760	19.71	2 386
13	地球科学	401 771	4 669 863	11.62	4 068
14	药学/毒理学	356 867	4 564 757	12.79	3 544
15	精神病学/心理学	359 897	4 433 072	12.32	3 673
16	农业科学	375 585	3 090 711	8.23	3 697
17	微生物学	189 653	2 954 737	15.58	1 882
18	空间科学	142 841	2 501 448	17.51	1 419
19	计算机科学	346 736	1 992 430	5.75	3 488
20	经济学/商学	240 986	1 842 118	7.64	2 397
21	数学	391 068	1 617 509	4.14	3 925
22	交叉科学	17 955	249 084	13.87	186

2.2 世界各国优势学科分析

为综合分析世界各发达国家学科发展情况,本研究利用 ESI 数据库中的学科排名来分析各国的学科优势。图 1 显示了学科总体排名第 4 位的中国与其他排名前 5 的国家各自然科学学科间的比较。美国各学科排名依然稳居世界第 1 位,德国在大部分学科方面都处于世界领先地位。英国数学、农学相对于其他学科较弱;法国学科发展比较均衡,相对生态学和材料科学弱势一些。我国近年来学科发展迅速,在农学、化学、计算科学、工程学、数学、材料科学等学科方面已经靠前,但同时空间科学、临床医学、生命科学等领域还存在较大差距。

2.3 前沿科学热点方向和领域

在学科分析的基础上,为了明确当前前沿科学研究的热点方向和领域,本文统计了 2006—2015 年 10 年来 *Science* 杂志评选出的年度科学突破,年度科学突破可代表了当前各学科的一些热点领域。本文将每年度科学突破按照学科相似性进行学科归

类,分析得出目前科学界关注的热点领域。从表2中可以看出,基因组学、干细胞、脑科学、蛋白质科学等生命科学领域,能源材料、石墨烯等材料科学领

域,量子科学、粒子物理等物理领域,宇宙探测等空间科学领域,古生物学等地质科学领域是当前的热点领域。

表2 2006—2015年 Science 杂志评选的十大突破

年度	学科分类							
	生命科学	临床医学	数学与计算科学	化学与材料科学	物理学	天文学	地球科学	社会科学
2006	1. 新的小 RNA 2. 制造记忆 3. 生物多样性发生机制	黄斑变性机制	证明庞加莱猜想	隐身术的科 学	显微学新前沿		1. 冰原收缩 2. 鱼的进化 3. 提取化石 DNA	
2007	1. 人类基因差异 2. 干细胞与皮肤细胞 3. 人类感官运作机制 4. 免疫细胞分工 5. 记忆和幻想研究		破解西洋跳棋	1. 分子控制 2. 过渡金属氧化物研究	量子旋转“霍尔效应”	宇宙射线源追踪		
2008	1. 细胞重新编程 2. “好”脂肪机制 3. 观察工作中的蛋白质 4. 更快更廉价的基因组测序	1. 发现新的癌症基因 2. 视频观察胚胎		1. 新型材料 2. 按需供应型再生能源		1. 太阳系外行星研究 2. 宇宙物质重量		
2009	植物脱落酸受体结构	1. 雷帕霉素延长鼠寿命 2. 基因疗法重来		石墨烯应用	1. 超快 X 射线激光 2. 磁单极子的存在	1. 月球上发现水 2. 费米伽玛射线太空望远镜探测到脉冲星 3. 修复哈勃太空望远镜	最古老原始人“阿 尔迪”的化石	
2010	1. 外显子组测序 2. 千人基因组 3. 人造生命诞生 4. iPS 新型培养方法	1. HIV 预防新希望 2. 大鼠解剖学		分子动力学模拟	1. 量子鼓研究 2. 量子模拟器解开高温超导谜团		尼安德特人基因组	
2011	1. 光合成蛋白质结构 2. 肠道微生物组 3. 清除衰老细胞	1. 抗逆转录病毒药物可预防 HIV 2. 疟疾疫苗研究		全能的沸石		1. “隼鸟号”行动 2. 太空中的原始气体 3. 奇异的太阳系	阐述人类起源	
2012	1. 基因组的精密工程 2. ENCODE 项目 3. 干细胞形成卵子 4. 大脑/机器界面				1. X 射线激光解析蛋白质结构 2. 希格斯玻色子 3. 马约拉纳费米子 4. 中微子混合角	好奇号着陆系统	丹尼索瓦人基因组	
2013	1. CRISPR 基因编辑 2. 人类的克隆胚胎 3. 睡觉机制 4. 人体微生物与健康	1. 癌症免疫疗法 2. 结构生物学指导疫苗设计 3. CLARITY 成像观测脑神经 4. 迷你器官研究		钙钛矿型太阳能电池		宇宙射线追溯超新星的残余物		
2014	1. 生命基因密码“添丁” 2. 操纵记忆	1. 年轻者血液的修复作用 2. 治糖尿病的细胞	1. 让机器人合作 2. 神经形态芯片			1. 人造探测器首次登陆彗星 2. 立方体卫星	1. 从恐龙到鸟的进化 2. 印尼洞穴艺术	
2015	CRISPR 技术	1. 抗击埃博拉疫苗 2. 酿出止痛药 3. 大脑淋巴管秘密揭开			量子诡异性	空间探测器与矮行星	1. 早期美洲人起源于亚洲 2. 纳勒迪人研究 3. 地幔柱存在证据	心理学研究可重复性

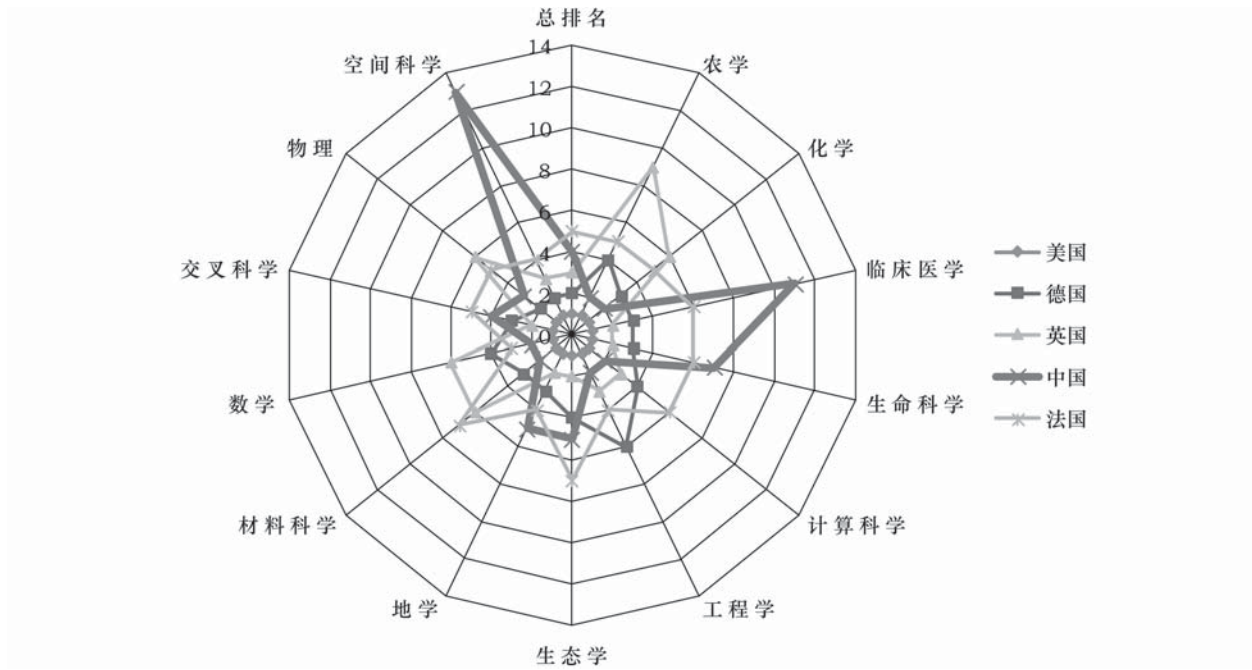


图 1 中国与美、德、英、法自然科学学科排名分布(数据来源:ESI 数据库,以 2005—2016 年文章总被引用数计算。)

为了深入了解各个学科中的前沿热点方向,本文根据中科院文献情报中心、汤森路透等机构利用 ESI 数据库分析发布的《2014 研究前沿》和《2015 研究前沿》^[5,6],在 10 大学科领域中,筛选除了各学科的前沿热点方向。如表 3 所示,农业和动植物科学研究热点集中于植物对生物和非生物胁迫的抗性这一方向上;生态与环境科学集中在物种分布、气候变化对物种的影响方面;地球科学集中在全球变化方向;临床医学

集中在心脑血管疾病和癌症方向;生命科学集中于免疫学、传染病、基因组编辑技术方面,尤其是基因组编辑技术,连续 2 年入选热点前沿;化学与材料科学集中于目前比较热点的石墨烯、有机材料中;物理学集中于希格斯玻色子观测、中微子震荡研究等微观粒子方向;天文学集中于宇宙的起源与演化,更多的依赖于大科学装置;数学和计算机科学集中于算法、纳米材料方向;社会科学方向集中于心理学、创新创业模式等。

表 3 近年来基础研究热点方向

领域	热点问题
农业、动植物科学	植物天然免疫机理、树木旱死机理、植物系统获得性抗性、植物抗非生物胁迫机理、美国食源性疾病的统计和经济损失评价、拟南芥生物钟调控、生长素生物合成与调控、植物内生真菌物种识别的系统发育方法
生态与环境科学	Maxent 等物种分布模型预测物种的潜在分布、景观遗传学、干旱导致树木死亡、气候变化对动植物和生态的影响
地球科学	气候变化对土壤、大气的影 响、海平面高度与全球温度的关系、2011 年东日本大地震与海啸成因研究、中国华北克拉通的地质构造模型研究
临床医学	去肾交感神经术治疗顽固性高血压、前列腺癌检测与治疗、肺肿瘤、心血管疾病
生物科学	新型 H7N9 禽流感病毒的传播与致病机理、中东呼吸综合征冠状病毒的分离、特征与传播、基因组编辑技术、C9orf72 基因六核苷酸重复扩增引起的额颞叶痴呆症和肌萎缩侧索硬化、细胞的免疫调节
化学与材料科学	石墨烯、有机催化、有机材料、电池材料
物理学	希格斯玻色子观测、中微子震荡研究、引力波探测
天文学与天体物理学	斯隆数字巡天第三期工程重子振荡光谱巡天、基于“开普勒空间望远镜”(Kepler)和“高精度径向速度行星搜索器”(HARPS)等任务开展系外行星搜寻及其性质研究、利用地基和地基天文台探测高红移星系、费米伽玛射线空间望远镜搭载的大天区望远镜的观测结果及其性能表现、赫歇尔空间天文台任务、科学仪器性能表现及观测计划、恒星、星系形成理论与实验研究
数学、计算机科学	粒子群算法、强塑性变形制备块体纳米材料
经济学及其他社会科学	实验心理学统计分析的科学性与可重复性、创新创业模式、远古人类考古学

3 讨论

3.1 前沿科学的发展趋势

综合各学科领域的关注度,各领域的前沿热点方向以及重大突破,我们总结当前前沿科学发展趋势如下:

(1) **宇观微观以及人类自身是前沿科学热点。**人类对于“宇宙的起源与发展”、“世界的物质构成”以及“人类的健康与发展”是前沿科学的热点领域。*Science* 十大突破中,每年与生命科学和宇宙科学、粒子物理学突破所占比例高达 60%—70% 以上,尤其是近几年几乎全部是这两方面的内容(表 2)。在研究论文的发表和影响力中也充分说明这一情况,临床医学的发表论文数量以及总被应用数排在各大学科之首,化学、物理学等针对微观研究的方向紧随其后,空间科学的文章平均被应用数排名靠前(表 1)。热点方向中,临床医学和生命科学除了关注心脑血管等传统疾病外,近年来持续关注了“新型 H7N9 禽流感病毒”、“中东呼吸综合征”等有可能影响人类安全的新发传染病,体现出了人类自身安全的关注度。而物理学中,有望认识我们这个世界基础的“希格斯玻色子观测”、“中微子震荡研究”等粒子物理方向连年入选热点方向(表 3)。

(2) **研究方式由单一到系统。**近年来的基础研究越来越关注系统科学的研究方法方式。例如在生命科学领域,不再过多关注单个基因研究,各类组学和系统生物学研究迅猛发展,逐步进入系统解析生命规律新阶段。如人类基因组、植物基因组、古基因组、千人基因组,近期外显子组(负责蛋白质编码)、肠道微生物组(在人体中长期共生)成为新的热点(表 2)。在地球科学领域,更多地将地球作为一个系统来研究,更加关注地球各圈层的相互作用,特别是随着全球变化研究的不断深入,越来越多的研究集中到太阳与气候变化、微生物与气候变化、气候变化与海洋酸化等(表 3)。

(3) **逐步开始调控物质和生命。**随着技术手段的不断提高,科学研究不再仅仅是局限于认识规律、解释现象,越来越多地开始加强对过程的调控。如生命科学领域,自 2006 年实现了诱导多能干细胞(iPS 细胞),生命过程调控成为新的热点,科学家能够逆转成人细胞的生长时钟以制造干细胞,并可以将这些干细胞培养成完全不同的组织,比如神经元以及心脏细胞等。2012 年又发现有可能实现胚胎干细胞定向分化为卵细胞,被 *Science* 评为当年重大

突破。2010 年首个人造生命细胞的诞生,更显示出生命过程调控达到了一个新的高度。量子科学研究,通过实现量子调控,在量子通信、量子模拟器等方面连续取得重大突破。

(4) **前沿科学的突破更加依赖于新的手段和技术。**从科学突破中,也可以看到目前的基础研究突破更多的依赖于新的手段和技术。2008 年,十大突破中“更快、更廉价的基因组测序技术”榜上有名,使得测序成本和时间大大压缩,进而让各类基因组学的研究成为可能,并取得一系列重要成果。随着第三代基因组测序技术的发展,必将使基因组研究迈上新的台阶。2013 年和 2015 年,CRISPR 基因组编辑技术两次入选十大突破,2014 至 2015 年,该技术连续成为生物科学领域重点新兴前沿,其核心论文的数量以及被引用数都表现突出,基因组编辑技术将给生命科学领域带来革命性的突破。

(5) **大科学装置对前沿科学发现作用明显。**随着人类对自然认识的不断深入,基础研究正向更宏观、更微观和更综合的方向发展,大型和超大型科学装置成为推动基础研究发展的重要手段。大科学装置通过大规模运用先进的科学原理和极端复杂的技术,为物质科学、自然本原、宇宙起源与演化、生命起源与演化等当代基本科学问题研究实现重要突破提供了必要条件。2014—2015 连续 2 年天文学相关的前沿热点方向中,基本都与大科学装置有关,“赫歇尔空间天文台任务、科学仪器性能表现及观测计划”更是连续 3 年入选天文学与天体物理领域年度最重要热点方向,大型空间任务、大型基础设施正逐步获得领内的持续高度关注,成为学科前沿热点,而这种大科学装置将在任务执行中甚至任务结束后的很长一段时间持续推动成果的产出。

3.2 对我国前沿科学发展布局的启示

(1) **把握前沿科学发展趋势。**当前新一轮科技革命的特征已日趋显现,前沿科学的发展已经呈现出明显的趋势。推动我国前沿科学的发展,首先需要把握前沿科学发展的趋势,深入了解目前前沿科学聚焦的领域、研究的方法方式以及发展中的特征。进而在战略规划等顶层设计中顺应前沿科学发展趋势,最大限度的释放前沿科学的牵引作用,使我国能够抓住新一轮科技革命的机遇,实现跨越发展。

(2) **聚焦优势学科领域。**经过改革开放以来基础研究持续资助,我国学科发展迅速,在农学、化学、计算科学、工程学、数学、材料科学等学科方面已经靠前,但同时在空间科学、临床医学、生命科学等

领域还存在较大差距(图 1)。我们一方面要注重学科发展的平衡,补充我国学科的短板;另一方面更要注重发展优势学科领域,争取能够在若干领域取得国际领先成果。如动植物科学、石墨烯、基本粒子检测、纳米科学等研究领域,我国已经有了坚实的基础,同时又符合了前沿领域的发展方向,如能进行重点支持,将会占领国际前沿高地,带动其他学科的发展。

(3) 注重新兴技术的发展。前沿科学的发展,越来越多的依赖于新兴技术的产生和突破。我国需要重视优势技术领域,布局一批未来 10 年可能产生变革性技术的前瞻性科学研究,如基因组学、基因组编辑、大数据技术、人工智能等,强化自主创新成果的技术供给,加快基础研究成果向应用技术、向产品研发转化的速度,为我国经济社会转型发展提供实实在在的支撑。

(4) 加强大科学装置的部署和支持。前沿科学关注的焦点,宇观微观和人类本身,近年来在大科学装置的运用下产生了一系列突破性成果,大科学装

置和设施已成为科学发现的推进器,发达国家也意识到了这一点,纷纷布局大科学装置。我国需要选择自身优势的领域,布局一批大科学装置和设施,为前沿科学的突破提供新型手段。

致谢 本工作得到国家自然科学基金(项目批准号:L1422053)和深圳市软科学基金项目(RKX20150331104502161)资助。

参 考 文 献

- [1] 张先恩. 科技创新与强国之路. 北京:化学工业出版社, 2010: 187.
- [2] National Sanitation Foundation, USA. Science & Engineering Indicators 2016. 2016.
- [3] Nature Index 2015 Global. Nature, 2015, 522: S1—S44.
- [4] 杨凌春,周辉. 美国 NSF“科学技术中心”的协同创新. 中国高校科技, 2013(Z1): 84—87.
- [5] 中国科学院文献情报中心,汤森路透知识产权与科技事业部新兴技术未来分析联合研究中心. 2014 研究前沿. 2014.
- [6] 中国科学院文献情报中心,汤森路透知识产权与科技事业部新兴技术未来分析联合研究中心. 2015 研究前沿. 2015.

The research on the development trends of the world frontier science based on the analysis of the ESI database and the top 10 breakthrough

Qian Wanqiang^{1,2} Zhang Feng³ Jiang Haiyan³ Mo Hongshan³ Li Zhilan⁴

(1. Department of Personnel, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081;

2. Agriculture Genomics Institute of Shenzhen, Chinese Academy of Agriculture Science, Shenzhen 518120;

3. Basic Research Service Center, the Ministry of Science and Technology, Beijing 100086;

4. Zhejiang Natural Science Foundation, Hangzhou 310012)

Abstract From 21 century, some revolutionary changes arise in the frontier science fields, which lead the development of the basic research. In this paper, we analyze the development characteristics of the world basic research. Furthermore, compounding the research focus in the ESI database and the annual top 10 breakthrough of the Science journal, we summarize the development future of some key subject, and the feature of the frontier science, and propose some suggestions to the basic research development in China.

Key words basic research; frontier science; the top 10 breakthrough; ESI database