

· 管理纵横 ·

作物学十年：国家自然科学基金项目 资助、成果产出与未来展望

魏珊珊 蒋金金 刘卫娟 李兴峰 罗晶*

国家自然科学基金委员会 生命科学部, 北京 100085

[摘要] 作物学在保障我国粮食安全和农产品有效供给、生态安全、现代农业可持续发展中占据重要地位。作物学基础研究领域的不断拓展及基础研究水平的显著提高,促进了我国农业的发展。本文分析了十年期间(“十二五”和“十三五”)作物学领域国家自然科学基金项目的申请与资助情况,总结了两个五年期间的研究热点和取得的主要成果,并对我国作物学存在的主要问题及未来发展的关键科学问题进行了讨论。

[关键词] 国家自然科学基金;作物学;资助情况;成果产出;未来展望

习近平总书记指出,保障粮食安全始终是国计民生头等大事,要把中国人的饭碗牢牢端在自己手中^[1]。“十二五”期间,我国粮食连年高位增产,实现了农业综合生产能力质的飞跃;“十三五”期间,国家深入推进农业供给侧结构性改革,统筹调整粮食作物、经济作物、饲料作物种植结构并优化农业区域布局。两个五年期间我国农业生产方面取得的巨大成就,是国家宏观决策的结果,而作物学基础研究领域的不断拓展及基础研究水平的显著提高,也有力促进了我国农业的发展。国家自然科学基金作为资助作物学领域基础性研究的重要渠道之一,对我国作物学的发展,尤其是对增强农业科技的原始创新,提高农业生产能力,确保农业可持续发展起到了重要的推动作用。然而,我国农业发展基础条件依然薄弱,亟需加强作物学基础研究,坚持“四个面向”,深入实施“藏粮于地、藏粮于技”战略和种业振兴行动方案,为打赢种业翻身仗,确保我国粮食安全和重要农产品供给提供有力保障。

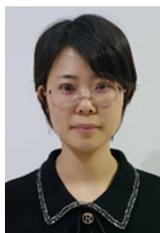
1 作物学领域基金项目申请与资助概况

1.1 项目申请与资助情况分析

2011~2020年,作物学累计接收项目申请22 885项,资助4 767项,资助直接经费286 418.27



罗晶 博士,研究员,现任国家自然科学基金委员会生命科学部农学与食品科学处处长,兼农学基础与作物学项目主任。



魏珊珊 博士,副教授,现任国家自然科学基金委员会生命科学部农学与食品科学处作物学流动项目主任。

万元。其中,“十二五”期间共接收项目申请9 601项,资助2 218项,资助直接经费131 666.90万元;“十三五”期间累计接收项目申请13 284项,资助2 549项,资助直接经费154 751.37万元。两个五年期间,作物学获基金资助的项目类别共计14类,在各类项目中,资助量排名前三的项目类型依次为面上项目、青年科学基金项目(以下简称“青年基金”)和地区科学基金项目(以下简称“地区基金”)。现主要对上述三类项目以及受关注度较高的重点项目、国家杰出青年科学基金项目(以下简称“杰青项目”)和优秀青年科学基金项目(以下简称“优青项目”)的

申请和资助情况进行分析(表1)。

面上项目、青年基金和地区基金在“十二五”期间的申请量分别为4109项、3277项和1455项,“十三五”期间的申请量较“十二五”期间分别增加了896项、1759项和738项,申请量增长率依次为21.81%、53.68%和50.72%。“十三五”期间,重点项目、杰青项目和优青项目的申请量较“十二五”期间也有不同程度的提高,其中优青项目的申请量增幅最大(113.48%),重点项目次之(41.22%),杰青项目增幅最小(1.43%)。与“十二五”相比,“十三五”期间面上项目、青年基金和地区基金的资助量分别增加了138项、131项和94项,增幅依次为15.51%、17.15%和27.33%;重点项目和优青项目资助量分别增加了1项和4项,而杰青项目资助量减少了1项。“十三五”期间各类项目的五年平均资助率较“十二五”期间均有所降低,其中面上项目、青年基金和地区基金资助率分别降低了1.12%、5.54%和3.67%,重点项目、杰青项目和优青项目资助率分别降低了5.25%、1.61%和5.66%。此外,两个五年期间的资助经费也有较大差异,“十三五”期间面上项目和重点项目的资助金额较“十二五”期间分别减少了3085万元和102万元,而其他4类项目资助金额均有提高。“十三五”期间,各类项目平均资助率降低的主要原因是资助指标并未随着申请量的逐年增长而增加。

1.2 各依托单位申请及获资助情况分析

2011~2020年,作物学共收到来自608个依托单位的项目申请,其中337个依托单位获得资助。对两个五年期间获资助项目总数排名前10位的依托单位的申请和资助情况进行分析表明(表2),“十二五”期间累计获资助项目数最多的是中国农业科学院作物科学研究所(119项),其次是华中农业大学(103项)和南京农业大学(92项)。累计项目经费

最多的是中国农业大学(11554.1万元),其次是中国农业科学院作物科学研究所(8115.3万元)和华中农业大学(7718.8万元)。“十三五”期间累计获资助项目数排名前三的依托单位发生了较大变化,依次是华中农业大学(127项)、中国农业科学院作物科学研究所(121项)和中国农业大学(104项);累计项目经费排名前三的依托单位分别是中国农业大学(13701.25万元)、华中农业大学(12789.4万元)和中国农业科学院作物科学研究所(8280万元)。两个五年期间,面上项目和青年基金获资助最多的均为中国农业科学院作物科学研究所,重点项目和优青项目获资助数最多的均为华中农业大学,杰青项目获资助数最多的为中国农业大学。两个五年期间,多数依托单位不仅注重研究类项目的发展,也更加关注人才培养,特别是对高层次人才的培养。

1.3 各分支领域申请及获资助情况分析

目前,作物学主要可以分为作物生理学、作物种质资源与遗传育种学和作物栽培学与耕作学这三大研究领域。对两个五年期间不同研究领域面上项目、青年基金和地区基金的项目申请与资助情况进行分析表明(表3),“十二五”期间共资助作物生理学研究领域相关项目191项,占整个作物学资助项目总数的9.56%;“十三五”期间共计资助273项,占比提高至11.56%。两个五年期间,作物生理学领域的主要研究对象发生了变化:“十二五”期间研究对象占比居前三位的依次为稻类作物(30.89%)、麦类作物(15.71%)和油料作物(12.57%);“十三五”期间依次为稻类作物(26.37%)、麦类作物(23.08%)和玉米(12.09%),麦类作物和玉米的占比明显提高。“十三五”期间,与作物生长发育、产量、品质相关的项目数量相比“十二五”期间有所下降。然而,随着全球气候变化,作物逆境生物学(尤其是非生物逆境)方向相关的

表1 “十二五”和“十三五”期间作物学部分项目类型的申请与资助情况

项目类型	“十二五”期间				“十三五”期间			
	申请数量 (项)	资助数量 (项)	资助率 (%)	资助金额 (万元)	申请数量 (项)	资助数量 (项)	资助率 (%)	资助金额 (万元)
面上项目	4109	890	21.66	63371	5005	1028	20.54	60286
青年基金	3277	764	23.31	17263	5036	895	17.77	20989
地区基金	1455	344	23.64	16371	2193	438	19.97	16721
重点项目	131	26	19.85	7897	185	27	14.59	7795
杰青项目	70	10	14.29	3260	71	9	12.68	3350
优青项目	89	13	14.61	1420	190	17	8.95	2140

项目明显增加,由“十二五”期间的40项增加到“十三五”期间的136项,增幅达248.72%。两个五年期间资助的非生物逆境类型主要为干旱胁迫、盐胁迫和重金属胁迫等,相关复合胁迫的研究也有所增加。

“十二五”期间共资助作物种质资源与遗传育种学研究领域相关项目1417项,占作物学资助项目总数的70.92%;“十三五”期间共资助1646项,占比略有降低,为69.72%。与“十二五”期间相比,“十三五”期间除了以豆类作物、棉麻类作物和其他类型作物为研究对象的项目数量有所降低外,以其他各类作物为研究对象的项目数量均有所增加,且资助项目数量增幅最大的三类作物分别为糖料作物(48.94%)、薯类作物(47.69%)和玉米(44.03%)。两个五年期间,研究对象占比居整个研究领域前三位的均为稻类作物、麦类作物和玉米,但“十三五”期间麦类作物的研究占比较“十二五”期间有所降低,而玉米的研究占比增加了2.69%。

“十二五”期间共计资助作物栽培学与耕作学研究领域相关项目390项,占整个学科资助项目总数的19.52%;“十三五”期间共计资助442项,占比降低至18.72%。两个五年期间,以杂粮作物、豆类作物为研究对象的栽培学以及耕作学方向的项目数量有所降低,以其他各类作物为研究对象的栽培学方向的项目数量均有所增加。资助项目数增幅最大的为薯类作物(150%),其次是糖料作物(100%)和油料作物(68.75%)。两个五年期间,研究对象占比居前三位的均为稻类作物、麦类作物和玉米,但“十三五”期间稻类作物的研究占比较“十二五”期间提高了3.44%,而麦类作物和玉米的研究占比分别降低了1.19%和0.44%。此外,薯类作物、油料作物的研究占比也明显提高,分别提高了3.09%和2.01%。

两个五年期间,各分支领域的研究对象都发生了不同程度的变化。以玉米、糖料作物和薯类作物等为研究对象的项目呈增加趋势,以豆类和棉麻类作物等为研究对象的项目呈减少趋势。总体来看,多数项目注重从我国农业生产实际中凝练科学问题,聚焦国家农业重大需求开展深入的基础研究。

1.4 各类型项目申请人的年龄结构分析

2011~2020年,各类型项目负责人的年龄结构发生了较大变化(图1)。面上项目负责人的年龄在“十二五”期间主要分布在36~50岁之间,其中36~40岁年龄段最多,占比为26.09%;“十三五”期间主要分布在36~40岁和41~45岁两个年龄段,占比分别为31.40%和24.51%。两个五年期间,青年基金项目负责人均主要分布在31~35岁,“十三五”期间该年龄段所占比例为64.32%,较“十二五”期间(63.61%)略有提高。地区基金负责人年龄主要集中在31~45岁之间,“十二五”期间36~40岁年龄段所占比例最高,为25.89%;而“十三五”期间该年龄段的比例增长至34.91%。重点项目负责人的年龄主要在46~55岁之间,“十二五”期间46~50岁年龄段所占比例最高,为36.01%;“十三五”期间51~55岁年龄段占比最高,达40.54%。杰青项目负责人主要在41~45岁之间,“十二五”期间该年龄段所占比例高达85.64%,“十三五”期间降低至79.49%;但“十三五”期间36~40岁项目负责人的占比提高至20.51%,较“十二五”期间增加了7.25%。两个五年期间,优青项目负责人的年龄均主要分布在36~40岁之间,且占比均达65%以上。此外,“十三五”期间有两位26~30岁年龄段的申请人获得了优青项目的资助。总体来看,除重点项目外,其他5类项目的负责人年龄结构均呈现不同程度的年轻化趋势,预计这种年轻化发展趋势未来将更加明显。

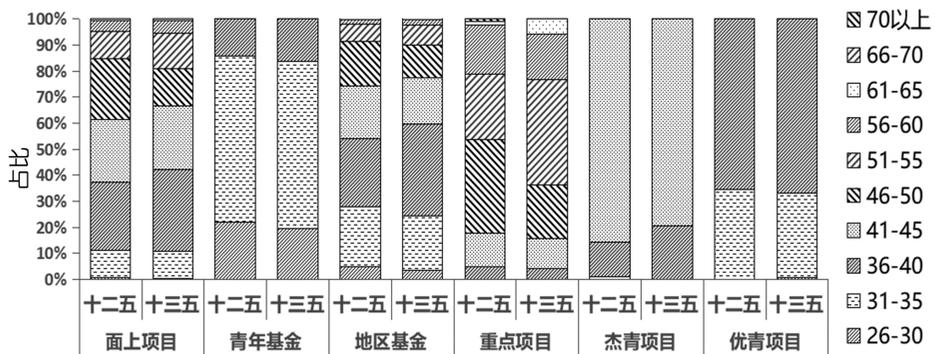


图1 两个五年期间不同类型项目申请人年龄结构分布

表2 “十二五”和“十三五”期间获资助项目总量前10名依托单位的部分项目申请与资助情况

期间	排名	依托单位	资助总量 (项)	申请总量 (项)	资助经费 (万元)	不同类型项目资助量/申请量(项)				
						面上项目	青年基金	重点项目	杰青项目	优青项目
“十二五” 期间	1	中国农业科学院作物科学研究所	119	328	8 115.3	61/185	41/93	1/8	0/3	2/6
	2	华中农业大学	103	263	7 718.8	58/161	25/54	3/11	2/5	2/3
	3	南京农业大学	92	278	6 424.2	57/177	27/56	2/12	1/9	1/9
	4	中国农业大学	77	170	11 554.1	46/104	5/12	1/5	2/4	3/13
	5	四川农业大学	74	298	4 383.0	38/179	28/91	1/6	0/3	1/5
	6	扬州大学	59	203	3 798.7	38/142	15/30	1/4	0/5	0/2
	7	河南农业大学	54	228	3 058.0	28/129	18/58	1/2	0/4	0/4
	8	浙江大学	51	145	3 384.4	31/91	13/32	2/4	0/1	0/3
	9	西北农林科技大学	48	249	2 433.0	26/176	20/64	0/1	0/2	0/1
	10	中国科学院遗传与发育生物学研究所	46	99	5 321.0	17/49	13/26	3/5	3/3	1/1
“十三五” 期间	1	华中农业大学	127	423	12 789.4	63/225	36/99	5/16	1/9	4/27
	2	中国农业科学院作物科学研究所	121	436	8 280.0	71/210	33/140	3/16	0/1	2/12
	3	中国农业大学	104	253	13 701.3	50/118	33/78	4/15	3/12	2/12
	4	南京农业大学	94	334	6 646.0	55/212	28/76	3/19	1/5	2/10
	5	扬州大学	83	257	4 070.0	47/139	33/97	0/3	1/1	0/4
	6	四川农业大学	81	359	4 432.0	54/226	24/112	1/5	0/0	1/9
	7	西北农林科技大学	64	287	3 015.0	37/198	26/69	0/4	0/0	0/3
	8	山东农业大学	57	247	2 816.0	33/126	23/94	1/4	0/3	0/6
	9	中国水稻研究所	57	215	4 331.0	26/108	22/85	0/0	1/5	0/5
	10	河南农业大学	53	262	2 563.0	30/132	21/115	0/1	0/1	0/1

表3 “十二五”和“十三五”期间面上项目、青年基金和地区基金资助项目三大研究领域下研究对象统计(项)

研究对象/ 方向	“十二五”期间				“十三五”期间			
	作物生理学	作物种质资源 与遗传育种学	作物栽培学 与耕作学	总计	作物生理学	作物种质资源 与遗传育种学	作物栽培学 与耕作学	总计
稻类作物	59	305	81	445	72	380	107	559
麦类作物	30	260	62	352	63	284	65	412
玉米	15	159	52	226	33	229	57	319
油料作物	24	152	16	192	28	191	27	246
豆类作物	17	135	23	175	22	131	19	172
棉麻类作物	12	152	41	205	17	151	43	211
杂粮作物	3	67	13	83	11	76	5	92
薯类作物	5	65	10	80	8	96	25	129
糖料作物	3	47	9	59	6	70	18	94
其他作物	23	75	19	117	13	38	18	69
耕作学	—	—	64	64	—	—	58	58
合计	191	1 417	390	1 998	273	1 646	442	2 361

2 作物学领域研究热点和取得的主要成果

2.1 作物学领域研究热点

两个五年期间,作物生理学领域的研究方向由单纯的利用生理学、生物化学和分子生物学手段,发展为从生理水平、代谢水平、分子水平、基因水平和蛋白水平共同揭示作物生长发育,产量、品质性状形成和作物抗逆的生理生化与分子生物学机制。作物种质资源与遗传育种学领域的研究目标和方向已逐渐由单一作物的单一目标性状(产量、品质、抗性等),逐步向多种作物产量或品质性状形成的共性遗传规律以及作物产量与品质性状协同形成与改良的遗传网络解析等转变。作物栽培学与耕作学领域的主要研究方向也已经由单纯的追求产量逐步向产量、品质协同提高且环境友好转变,同时逐渐由传统的栽培耕作方式逐步向绿色轻简化方向转变。

现代生物技术的快速发展有力推动了作物学的基础研究。例如,以CRISPR/Cas为代表的基因编辑技术,自2012年底问世以来,因其具有设计简单、操作容易和靶标特异性强等特点,可实现对基因的定点敲除、插入、替换和单碱基编辑等,已成为农作物种质资源创制与遗传改良的重要研究手段和研究热点^[2-4]。育种方法的进步显著加快了作物遗传改良进程,传统育种及诱变育种周期长、有利变异少、效率低,而转基因育种技术日趋成熟^[5]、单倍体诱导技术体系效率大幅度提高^[6]、分子设计育种逐步智能化^[7]、全基因组选择育种技术广泛应用^[8]、基因编辑育种技术的逐步精准化^[9]以及合成生物学育种技术的快速发展^[10, 11],有力推动了传统“经验育种”向高效“精准育种”的转变,高产优质多抗农作物新品种大批涌现。此外,表观遗传设计育种技术体系在实现高效利用资源、智能响应环境变化的高产优质品种的创制方面也取得了突破,开辟了全新的育种方向^[12]。作物学基础研究也离不开测序技术的快速发展,全基因组重测序、转录组测序、表观修饰测序等技术的更新升级,以及高质量基因组的组装使得目标性状的定位及候选基因筛选等都取得了突破性进展^[13-18]。

此外,仪器设备的更新换代以及研究手段的不断更新,也为作物学的研究提供了便利。基于多传感器的作物表型分析技术,实现了对作物生长发育过程中植株表型的无损、客观及高通量的评价量化^[19],已广泛应用于作物形态结构特征、生理生化

性状及产量品质等方面的监测^[20-22],在作物高产性状、抗逆能力评价以及相关基因的鉴定和挖掘等方面发挥了重要作用^[23-25]。扫描电镜、透射电镜、CT及核磁共振等成像技术以及石蜡、半薄等各种切片技术可以精确的获取作物不同器官的内部形态学特征;冷冻切片技术和激光捕获显微切割等技术为实现作物不同部位微量样品的精准获取提供了可能^[26];冷冻电镜技术实现了植物重要功能蛋白的结构和功能化位点的解析^[27];高效液相色谱(HPLC)、超高效液相色谱—三重四级杆串联质谱(UPLC-QqQ-MS/MS)等可针对痕量物质进行化学定量,其测定的灵敏度和重现性不断提高,为精确测定植物内源激素等指标提供了可能^[28, 29];连续流动分析仪、快速定氮仪以及全自动间断化学元素分析仪使植株氮含量测定效率不断提高。

2.2 “十二五”和“十三五”期间作物学领域研究取得的主要成果

2011~2020年已资助项目中,有2883项已顺利结题。共获得国家奖励46项,省部级奖励248项;发表期刊论文11734篇,其中SCI/SSCI论文7004篇,EI论文141篇;共计申请专利1403项,授权专利1744项;培养出站博士后190名,研究生4749名。在国家自然科学基金项目的持续支持下,相继完成了水稻、小麦、玉米、大豆、油菜、棉花等多个重要农作物的基因组测序及其种质资源基因组的重测序,克隆了一批调控株型、品质、氮高效利用、耐低温、抗旱、耐盐碱等具有重大育种价值的新基因。

“十二五”以来,在植物科学主流期刊发表的论文数量显著增加。据不完全统计,“十三五”期间,中国科学家在5种植物科学主流期刊*Molecular Plant*、*Nature Plants*、*The Plant Cell*、*Plant Physiology*和*The Plant Journal*发表论文数量为2313篇,较“十二五”期间增加了1013篇,增幅达77.92%(表4)。“十二五”期间,中国科学家在上述期刊上发表研究论文数仅占其总载文数的18.8%,而“十三五”期间则增长至29.6%,且2019年和2020年所发表论文的占比位居世界第一。通过对2011~2020年我国科学家在5种主流期刊发表论文的研究材料进行分析,拟南芥仍然是当前主要的研究对象,但“十三五”期间以玉米和小麦等农作物为研究对象的论文数显著增加(表5)。

2011~2020年我国作物学领域科学家在*Cell*、*Nature*和*Science*等国际综合性学术期刊上发表的

表4 2011~2020年中国与4个欧美国家在5种植物科学主流期刊(MP、NP、PC、PP和PJ)的发文量比较

国别	“十二五”期间		“十三五”期间	
	文章数量	所占比例 (%)	文章数量	所占比例 (%)
中国	1 300	18.8	2 313	29.6
美国	2 342	33.8	2 549	32.6
德国	1 279	18.5	1 247	15.9
英国	618	8.9	740	9.5
法国	623	9.0	674	8.6

注:数据来源:Web of Science。文章数量按篇计算,当1篇文章属于多个国家时,每个国家计1次,分别被算入占比的数值。MP, *Molecular Plant*; NP, *Nature Plants*; PC, *The Plant Cell*; PP, *Plant Physiology*; PJ, *The Plant Journal*。“十二五”和“十三五”期间,五种植物期刊(MP、NP、PC、PP和PJ)的总载文(Article)量分别为6 926和7 827篇。

表5 2011—2020年中国科学家在5种植物科学主流期刊(MP、NP、PC、PP和PJ)上发表以水稻、玉米、小麦和拟南芥相关文章的数量

研究对象	“十二五”期间		“十三五”期间	
	文章数量	所占比例 (%)	文章数量	所占比例 (%)
拟南芥	651	66.0	914	57.7
水稻	280	28.4	443	28.0
玉米	36	3.7	166	10.5
小麦	19	1.9	61	3.9
总计	986	—	1 584	—

注:数据来源:Web of Science。以2个或2个以上物种为研究对象的文章被分别计数。

论文数量也不断增加。例如,在水稻研究方面,中国农业科学院万建民院士团队利用亚洲栽培稻和南方野生稻材料,系统解析了野生稻与栽培稻间杂种不育问题与遗传特性,发现了水稻自私基因系统,成果于2018年发表在 *Science* 上^[30]。中国水稻研究所王克剑研究员团队利用多基因编辑技术同时编辑水稻生殖发育过程的4个关键基因(*REC8*、*PAIR1*、*OSD1*和*MTL*),成功获得杂交稻克隆种子,实现了杂交水稻无融合生殖的突破,成果于2019年发表在 *Nature Biotechnology* 上^[31]。在玉米研究方面,中国农业大学田丰教授团队从玉米野生近缘种大刍草中克隆了控制玉米紧凑株型、密植增产的关键基因,建立了玉米紧凑株型的分子调控网络,为玉米理想株型分子育种、培育耐密高产品种提供了重要基因资源和理论基础,成果于2019年发表在 *Science* 上^[32]。在小麦研究方面,山东农业大学孔令让教授

团队从小麦近缘植物长穗偃麦草中克隆出抗赤霉病基因 *Fhb7*,并揭示了其抗病分子机制,解决了小麦赤霉病抗性育种的世界性难题,成果于2020年发表在 *Science* 上^[15]。在大豆研究方面,中国科学院遗传与发育生物学研究所田志喜研究员团队突破传统线性基因组的存储形式,在大豆中首次实现基于图形结构的泛基因组构建,成果于2020年发表在 *Cell* 上^[17]。广州大学刘宝辉教授和孔凡江教授团队克隆了大豆长童期关键基因 *J* 和长日照条件下控制开花期的关键基因 *Tof11* 和 *Tof12*,系统鉴定了其调控大豆光周期适应性进化的分子机制,为大豆品种适应性和产量分子育种提供了重要的理论依据,成果分别于2017年和2020年发表在 *Nature Genetics* 上^[14, 33]。

“十二五”以来,在国家自然科学基金等项目支持下,作物学相关研究获得了多项国家奖。李家洋院士团队完成的项目“水稻高产优质性状形成的分子机理及品种设计”获2017年度国家自然科学奖一等奖;张启发院士团队完成的项目“水稻产量性状的遗传与分子生物学基础”,扬州大学杨建昌教授团队完成的项目“促进稻麦同化物向籽粒转运和籽粒灌浆的调控途径与生理机制”和刘耀光院士团队完成的项目“杂交稻育性控制的分子遗传基础”分别获得了2016、2017和2018年度国家自然科学奖二等奖;中国农业大学孙传清教授团队完成的项目“水稻驯化的分子机理研究”和中国科学院遗传与发育生物学研究所傅向东研究员团队完成的项目“水稻高产与氮肥高效利用协同调控的分子基础”分别获得了2020年度国家自然科学奖二等奖。中国农业科学院作物科学研究所何中虎研究员团队完成的项目“CIMMYT小麦引进、研究与创新利用”,西南大学李加纳教授团队完成的项目“甘蓝型黄籽油菜遗传机理与新品种选育”和中国农业大学孙其信教授团队完成的项目“小麦抗病、优质多样化基因资源的发掘、创新和利用”分别获2015年度国家科技进步二等奖;中国农业科学院作物科学研究所邱丽娟研究员团队完成的项目“大豆优异种质挖掘、创新与利用”获2018年度国家科技进步奖二等奖。

3 作物学领域存在的主要问题分析

在国家自然科学基金的持续支持下,我国作物学基础研究水平迅速提升,“十二五”以来,在水稻、小麦、玉米等作物的遗传改良、生理机制和耕作栽培

等研究领域均取得了许多突破性进展,促进了作物学研究的快速发展。尽管近年来项目申请数量在持续增长,申请书质量也在不断提高,但在项目申请中依然存在一些值得注意和改进的问题,主要包括以下4个方面。

3.1 基础研究支撑实际应用的能力不强

作物学是一个应用型学科,其最终目的是解决作物生产的实际问题。因此,一方面要求基础研究领域能够真正为学科发展提供创新性的理论基础;另一方面,要面向国家重大需求,服务国家的粮食生产。然而,当前的研究存在研究方向与我国农业生产实际结合不够紧密的现象,基础研究支撑实际应用的能力不强。例如,随着近年来高温出现频次和强度的不断增加,作物栽培学和耕作学研究领域开始重点关注高温对作物生产的影响,作物种质资源和遗传育种研究也更加关注挖掘和利用特殊的抗逆资源,培育耐高温的优良品种,但更侧重基础理论研究的作物生理学领域对于作物耐高温的机制研究尚需进一步加强。我国在种质资源基础研究方面取得了诸多突破,发掘了一大批重要功能基因,但能够在育种实践中加以利用的基因却相对较少。此外,以测序为基础的作物基因组和基因功能研究项目较多,但针对目标性状的关键调控基因及其自然变异在作物遗传育种方面的应用研究却不够。

3.2 聚焦农业生产实际问题不够

作物学研究应坚持“四个面向”,坚持问题导向和需求导向,从国家农业发展需求的重大问题出发,聚焦我国农业生产实际来提出并解决真正的科学问题。例如,针对集约化作物生产体系,未能充分将土壤、作物群体与环境作为一个整体进行研究,难以提供降排增产提质增效的融合技术方案;当前对高产田相关产量与品质形成规律的研究较多,但是针对不同类型中低产田限制产量与品质提升的关键生理、生化过程研究不足;针对当前气候变暖导致的极端性灾害天气频发、重发、突发现象,未能从深层次明确其对作物生产的致灾机理,导致其防灾减灾技术的有效性降低;面对我国“小杂粮”作物种植分散、生产水平低下、现有品种混杂退化、优良品种少且推广困难的生产现状,对杂粮作物种质资源利用、优化耕作栽培措施的研究不够。

3.3 对交叉研究重视度不足

多学科交叉研究有助于作物学内涵和外延拓展、基础研究深化与应用基础研究的创新。然而,目

前多数研究仅限于作物学研究本身,与其他学科的实质性交叉不够,需要将现代分子生物学技术、信息技术以及智能装备技术等与作物学研究紧密结合起来,达到加强学科交叉,拓宽研究领域,进一步提升作物学整体研究水平的目的。通过多学科融合,才有可能突破关键技术瓶颈问题,提升我国种质资源保护和利用领域的原始创新能力。同时,作物学内部交叉领域的研究也较少。在种质创新层面,常存在“遗传”和“育种”脱节的情况,而种质资源创新要与作物育种学紧密结合,才能从根本上解决种业“卡脖子”问题;在作物生产层面,作物栽培学也需要与耕作学紧密结合才能最大程度地发挥增产、提质和增效的作用。

3.4 研究技术的创新性亟需提高

我国种质资源保护和利用的关键技术存在明显的“卡脖子”现象。在技术创新推动作物种质改良方面,我国总体处于跟跑阶段,仅在水稻分子设计育种、小麦染色体工程和玉米单倍体育种等领域处于并跑阶段。当前研究项目多数注重跟踪国际研究热点,如基因编辑等技术多基于国外报道的原理和方法,然后加以优化改进,未能做到从源头上创新。“十二五”和“十三五”期间,国际上人工智能技术、基因工程等技术发展迅猛,为我国作物种质资源与遗传育种领域步入崭新发展阶段提供了良好机遇,但我国在现代技术应用方面与西方发达国家相比仍有较大差距,亟需在高通量表型精准鉴定技术、基因精准编辑和选择技术、代谢途径重构技术、合成生物学技术、全基因组选择育种技术以及大数据分析 with 智能决策技术等方面实现自主创新。

4 作物学未来发展的关键科学问题分析

4.1 优异种质资源形成与演化机制解析

种业是现代农业发展的核心,而种质资源是种业的“芯片”,因此要加强种质资源的基础研究,必须要强化农业生物育种的源头创新。目前,我国具有育种应用价值的重要基因资源缺乏,复杂性状形成的调控网络尚未阐明,优异种质形成的全景组学研究和新型种质资源创制还刚刚起步,亟需加强优异种质资源形成与演化机制的研究。其关键科学问题主要包括:以水稻和小麦等主要农作物优异种质资源为研究对象,通过高通量组学分析和鉴定野生种、农家种、育成品种的遗传与表型特征,挖掘主要农作物种质资源在驯化和改良以及区域适应过程中的全景组学基础与多样性产生机制,克隆关键调控基因,

揭示重要性状的形成与演化规律,明晰作物平行驯化的遗传基础,阐明种质资源快速驯化改良的协同调控机理。

4.2 作物智能育种的理论和技术研发

随着生物技术、育种技术的发展,农作物生物育种发展到了智能育种时代。智能分子设计育种完全以需求为目标进行新品种设计,通过利用基因编辑、生物合成、人工智能等手段,结合作物性状形成的分子遗传学机理以及作物与营养、环境互作的机理研究,构建分子设计的人工智能大数据分析模型。其关键科学问题主要包括:如何整合多维大数据并快速针对需求,智能化地在体外构建相应的分子代谢途径与对应的基因组结构、环境调控因素,从而整合基因编辑技术、合成生物技术、生物信息技术、育种技术等多领域的最新成果,快速地形成新品种。搭建全基因组基因型和重要性状表现型的大数据平台,开发耦合效应分子模块以及系统模型分析的计算体系,构建农业生物智能育种信息网络。在此基础上,深入开展基因组编辑、智能分子设计、全基因组选择育种和工程化的单倍体技术等研究,构筑智能育种的技术体系,实现育种理论和关键技术的新突破,抢占育种技术的制高点。

4.3 作物表型组学的研究与利用

表型组学是促进功能基因组学研究、加速作物分子育种与高效栽培进程的重要推动力。然而,我国在高通量作物表型组学技术研发及装备研制方面相对薄弱,大部分表型组设备和技术依赖进口,缺少自主创新的设备和技术。此外,我国尚未建立起具有精准表型的大规模参考群体,缺少精准的植物表型及生长调控模型,表型数据测定技术薄弱,亟需在表型组学研究领域有所突破。其关键科学问题主要包括:解析作物生长发育规律的核心问题,综合利用现代组学技术、基因操作技术、环境模拟与智能监控技术、高分辨成像技术、自动化信息分析技术等,实现田间和人工可控环境下多群体、多尺度、多样本、多组织、多性状的实时采集,建立作物表型高通量精准鉴定的现代技术体系,支撑我国作物栽培和育种的创新与发展。

4.4 作物产量、品质协同提高及环境友好的理论基础与配套技术

作物产量与品质同步提高已成为各国作物产业化发展的共同战略,发达国家把优质、专用农产品的生产技术研发和应用放在首位。我国在主攻单产兼

顾优质、高效、质量安全的作物栽培技术创新和应用方面虽然取得了显著成效,但是作物产量、品质协同提高的理论基础依然薄弱。此外,我国还需在传统栽培技术和耕作方式上有所创新和突破,才有可能进一步实现作物高产优质、养分高效和环境友好,保障农业可持续发展。其关键科学问题主要包括:通过多学科交叉研究,从作物光合性能、源库关系和资源高效等角度,在研究作物产量和品质形成规律与调控机理的基础上,重点关注产量与品质形成之间的关系,探讨作物产量、品质协同提高的理论基础;针对主要农作物特别是粮食作物在主产区的高产、优质、安全、高效及全程机械化栽培技术进行深入研究,为实现我国粮食安全和生态安全提供技术支撑。

4.5 作物抗逆减灾、丰产高效的生物学基础及关键技术

随着全球气候变化,各种非生物逆境发生频率增加、多重并发突出,对作物的高产稳产影响逐年加重。我国主要作物的非生物逆境发生规律及致灾机理研究较为薄弱,有效应对非生物逆境对作物不利影响的基础研究和技术较少,迫切需要全面深入地阐明作物感受、应答和适应非生物逆境胁迫的机理和调控网络,并明确能够提高作物抗逆减灾能力的关键栽培和耕作技术,为实现作物高产、稳产提供理论和技术支撑。其关键科学问题主要包括:通过应用生理学、分子生物学与生物化学等技术手段,明确作物感知、响应和适应各种非生物逆境的遗传及分子调控机理,揭示植物抗逆应答和生长发育的协同关系;从种植制度、品种筛选与布局、化学调控、农田培肥等关键栽培技术和耕作技术等方面开展系统深入研究,明确提高主要农作物抗逆减灾能力的关键技术,实现稳产丰产。

5 作物学基础研究展望

新时期科学基金的资助导向为:“鼓励探索、突出原创;聚焦前沿、独辟蹊径;需求牵引、突破瓶颈;共性导向、交叉融通”。作物学研究具有明显的以“需求牵引,突破瓶颈”为主的科学问题属性特征。为贯彻落实国家自然科学基金“优化学科布局”的改革任务,2021年农学基础与作物学学科对申请代码进行了更新和整合,二级申请代码由原先的6个调整为12个,每个二级申请代码下设置多个研究方向供申请人选择。新的申请代码体现了农学基础的多

学科交叉,作物产量、品质与抗性形成与调控的理论与方法,作物种质资源利用与遗传育种的国家需求,作物生产过程及其关键技术等。展望“十四五”,贯彻落实“藏粮于地、藏粮于技”战略和强化农作物种业基础研究,作物学需要重点关注的研究领域包括:农作物种质资源挖掘与创新利用,农作物种质优异性状形成、调控规律及环境适应性,主要农作物重要性状的遗传调控网络,作物基因组与分子设计育种的理论与方法,作物产量潜力挖掘、品质改良与资源效率协同提高的栽培生理机制及种植制度等。作物学研究应从我国农业生产实际中凝练科学问题;鼓励将现代生物技术、信息技术、智能装备技术与作物生产紧密结合开展多学科交叉研究;鼓励应用新型基础生物学研究思路与方法,开辟新的作物学研究领域;鼓励采用新技术、新方法开展种质资源挖掘与创新;鼓励关注适应机械化生产的农艺性状研究;鼓励围绕作物丰产优质、轻简宜机、资源高效的根本问题,开展作物栽培调控与耕作制度研究。

参 考 文 献

- [1] 习近平. 决胜全面建成小康社会,夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告, 2017.
- [2] Zhu H, Li C, Gao C. Applications of CRISPR-Cas in agriculture and plant biotechnology. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2020, 21: (11): 661—677.
- [3] Mao YF, Botella JR, Liu YG, et al. Gene editing in plants: progress and challenges. *National Science Review*, 2019, 6 (3): 421—437.
- [4] Chen KL, Wang YP, Zhang R, et al. CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 2019, 70: 667—697.
- [5] Zaidi SSEA, Mukhtar MS, Mansoor S. Genome editing: targeting susceptibility genes for plant disease resistance. *Trends in Biotechnology*, 2018, 36(9): 898—906.
- [6] Jacquier NMA, Gilles LM, Pyott DE, et al. Puzzling out plant reproduction by haploid induction for innovations in plant breeding. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 610—619.
- [7] Chong K, Li JY. The development of plant science has brought about a new revolution in breeding technology. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51(10): 1353—1355.
- [8] Zhao YS, Mette MF, Reif JC. Genomic selection in hybrid breeding. *Plant Breeding*, 2015, 134(1): 1—10.
- [9] Zong Y, Song Q, Li C, et al. Efficient C-to-T base editing in plants using a fusion of nCas9 and human APOBEC3A. *Nature Biotechnology*, 2018, 36(10): 950—953.
- [10] 林敏. 农业生物育种技术的发展历程及产业化对策. *生物技术进展*, 2021, 11(4): 405—417.
- [11] 赵国屏. 合成生物学——革命性的新兴交叉学科,“会聚”研究范式的典型. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(10): 905—908.
- [12] Yu Q, Liu S, Yu L, et al. RNA demethylation increases the yield and biomass of rice and potato plants in field trials. *Nature Biotechnology*, 2021, 39(12): 1581—1588.
- [13] Wu K, Wang SS, Song WZ, et al. Enhanced sustainable green revolution yield via nitrogen-responsive chromatin modulation in rice. *Science*, 2020, 367(6478): eaaz2046.
- [14] Lu S, Dong L, Fang C, et al. Stepwise selection on homeologous *PRR* genes controlling flowering and maturity during soybean domestication. *Nature Genetics*, 2020, 52 (4): 428—436.
- [15] Wang HW, Sun SL, Ge WY, et al. Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Science*, 2020, 368(6493): eaba5435.
- [16] Sun S, Zhou Y, Chen J, et al. Extensive intraspecific gene order and gene structural variations between Mo17 and other maize genomes. *Nature Genetics*, 2018, 50(9): 1289—1295.
- [17] Liu YC, Du HL, Li PC, et al. Pan-genome of wild and cultivated soybeans. *Cell*, 2020, 182(1): 162—176.
- [18] Deng YW, Zhai KR, Xie Z, et al. Epigenetic regulation of antagonistic receptors confers rice blast resistance with yield balance. *Science*, 2017, 355(6328): 962—965.
- [19] Mahlein AK, Kuska MT, Behmann J, et al. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. *Annual Review of Phytopathology*, 2018, 56: 535—558.
- [20] Yendrek CR, Tomaz T, Montes CM, et al. High-throughput phenotyping of maize leaf physiological and biochemical traits using hyperspectral reflectance. *Plant Physiology*, 2016, 173(1): 614—626.
- [21] Cotrozzi L, Peron R, Tuinstra MR, et al. Spectral phenotyping of physiological and anatomical leaf traits related with maize water status. *Plant Physiology*, 2020, 184(3): 1363—1377.
- [22] Pieruschka R, Schurr U. Plant phenotyping: past, present, and future. *Plant Phenomics*, 2019, 2019: 7507131.
- [23] Sun DW, Robbins K, Morales N, et al. Advances in optical phenotyping of cereal crops. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(2): 191—208.

- [24] Jiang Z, Tu HF, Bai BW, et al. Combining UAV-RGB high-throughput field phenotyping and genome-wide association study to reveal genetic variation of rice germplasms in dynamic response to drought stress. *The New Phytologist*, 2021, 232(1): 440–455.
- [25] Zhou J, Mou HW, Zhou JF, et al. Qualification of soybean responses to flooding stress using UAV-based imagery and deep learning. *Plant Phenomics*, 2021, 2021: 9892570.
- [26] Zhong YX, Vidkjær NH, Massange-Sanchez JA, et al. Changes in spatiotemporal protein and amino acid gradients in wheat caryopsis after N-topdressing. *Plant Science*, 2020, 291: 110336.
- [27] Deng YN, Kashtoh H, Wang Q, et al. Structure and activity of SLAC1 channels for stomatal signaling in leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(18): e2015151118.
- [28] Wang HQ, Liu P, Zhang JW, et al. Endogenous hormones inhibit differentiation of young ears in maize (*Zea mays* L.) under heat stress. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 533046.
- [29] Cai BD, Yin J, Hao YH, et al. Profiling of phytohormones in rice under elevated cadmium concentration levels by magnetic solid-phase extraction coupled with liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 2015, 1406: 78–86.
- [30] Yu XW, Zhao ZG, Zheng XM, et al. A selfish genetic element confers non-Mendelian inheritance in rice. *Science*, 2018, 360(6393): 1130–1132.
- [31] Wang C, Liu Q, Shen Y, et al. Clonal seeds from hybrid rice by simultaneous genome engineering of meiosis and fertilization genes. *Nature Biotechnology*, 2019, 37(3): 283–286.
- [32] Tian JG, Wang CL, Xia JL, et al. Teosinte ligule allele narrows plant architecture and enhances high-density maize yields. *Science*, 2019, 365(6454): 658–664.
- [33] Lu S, Zhao X, Hu Y, et al. Natural variation at the soybean *J* locus improves adaptation to the tropics and enhances yield. *Nature Genetics*, 2017, 49(5): 773–779.

Decade of Crop Science: Funding, Outcomes and Future Prospects of National Natural Science Foundation of China

Shanshan Wei Jinjin Jiang Weijuan Liu Xingfeng Li Jing Luo*

Department of Life Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

Abstract Crop science plays important roles in ensuring food security and effective supply of agricultural products, ecological security and sustainable development of modern agriculture in China. The development of agriculture in China was significantly promoted by the continuous expansion of basic research fields and the remarkable improvement of basic research level. This paper analyzed the application and funding of crop science in National Natural Science Foundation of China during the past decade (the 12th Five-Year Plan period and 13th Five-Year Plan period), and summarized the research highlights and major achievements during these two five-year periods. Furthermore, the main problems in crop science of China and key scientific issues for future development were discussed.

Keywords National Natural Science Foundation of China; crop science; funding situation; outcomes; prospects

(责任编辑 吴征天 张强)