

基于 Web of science 数据库的 ACC 脱氨酶研究文献计量分析

孔召玉¹ 邓振山² 马燕天¹ 吴子君¹ 吴兰^{1*}

(1. 南昌大学生命科学学院 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室 江西 南昌 330031)

(2. 延安大学生命科学学院 陕西 延安 716000)

摘要: 随着土壤环境日益恶化, ACC 脱氨酶(1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase) 提高植物抗逆性及生态修复功能越来越受到关注。基于文献数据库, 客观分析当前国际 ACC 脱氨酶研究的发展动态, 旨在推动我国 ACC 脱氨酶相关研究及其在土壤污染修复中的应用。基于 Web of science 数据库, 采用文献计量学方法, 对全球发表于 1991–2016 年的 ACC 脱氨酶研究论文的国家、机构、作者、研究领域、期刊及关注热点进行统计分析。ACC 脱氨酶全球论文数量在近几年呈现出持续增长态势。其中印度、加拿大和巴基斯坦在 ACC 脱氨酶研究领域处于国际领先地位, 加拿大的发文量和发文影响力均位于首位, 研究力量集中, 研究人员实力较强。中国在 ACC 脱氨酶方面的研究起步较晚, 发文数量虽然排名全球第四, 但其影响力较低。全球范围内, ACC 脱氨酶的研究内容主要集中在农业生产及环境修复两个方面。中国从微生物生态学、植物与微生物互作及植物修复等多个方向开展研究, 也是今后值得重点关注和跟踪研究的方向。加拿大的研究力量处于国际领先水平。我国在该领域的研究起步晚, 但近五年发展速度较快, 关注热点体现出一定的特色和前瞻性, 今后要注重高水平论文的发表, 同时加强与高水平研究机构之间的合作, 带动该领域研究力量的整体提升。

关键词: ACC 脱氨酶, 文献计量, Web of science

Bibliometric analysis of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase research based on Web of science

KONG Zhao-Yu¹ DENG Zhen-Shan² MA Yan-Tian¹ WU Zi-Jun¹ WU Lan^{1*}

(1. School of Life Science, Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

(2. School of Life Science, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: As the soil environment is increasingly deteriorating, the potential use of ACC deaminase in improving plant tolerance and bioremediation has received significant attention in recent years. Our aim is to objectively analyze the current development of ACC deaminase studies worldwide, thus to promote the development of related research work and their utilization in bioremediation of

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41601337, 31360127)

*Corresponding author: E-mail: wl690902@hotmail.com

Received: May 18, 2016; **Accepted:** September 14, 2016; **Published online** (www.cnki.net): September 29, 2016
基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41601337, 31360127)

*通讯作者: E-mail: wl690902@hotmail.com

收稿日期: 2016-05-18; 接受日期: 2016-09-14; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-09-29

contaminated soils in China. Based on Web of science database, the countries, institutions, authors, research fields, journals and key words of ACC deaminase literatures published during 1991–2016 are quantitatively and qualitatively analyzed. The ACC deaminase publications have witnessed a continued increase in recent years all over the world. India, Canada and Pakistan are in a leading position in the ACC deaminase research field. Both of the number and influence of the ACC deaminase publications of Canada rank the first. The ACC deaminase study in Canada has focused and strong research strength. The ACC deaminase research in China initialized late. Although the number of published paper of China ranks the fourth place worldwide, the influence is low. The worldwide research area of ACC deaminase mainly focused on agricultural production and environmental remediation. The research area in China mainly concentrated on microbial ecology, plant-microbe interaction and phytoremediation, which are worth focusing and tracking in the future. The research strength of ACC deaminase in Canada ranks the first all over the world. This research field in China started late, but has been developing rapidly during the recent five years. The hot topics of attention are also unique and forward-looking. Nevertheless, more efforts are still needed to publish high level papers, at the same time strengthening the cooperation with high level research institutes, thus to drive the overall improvement of the research strength of ACC deaminase in China.

Keywords: ACC deaminase, Bibliometric analysis, Web of science

全球气候变化、土壤盐渍化及重金属污染等是影响农业生产和土壤生态环境的严重问题。提高耕地土壤质量,增强植物抗逆性,促进植物生长,增加农作物产量是当前农业可持续发展的重大现实需求。植物根际促生长细菌(Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)能够改善土壤质量,抑制病原体微生物,增强植物抗逆性,促进植物生长,兼具农业增产、生物防治和环境治理的功效^[1]。近几年,随着土壤环境日益恶化,PGPR 提高植物抗逆性与生态修复功能也备受关注^[2]。

含有 ACC 脱氨酶(1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase)的 PGPR 能够利用并分解植物产生的乙烯合成前体 ACC,将 ACC 分解形成 α -丁酮酸和氨气,从而抑制植物体内乙烯合成,缓解植物因受到逆境胁迫产生大量乙烯而造成的抑制作用,提高植物在干旱、盐胁迫及重金属污染等逆境条件下的耐受能力^[3-5],同时还可以增加根际土壤中的碳、氮营养^[6]。当今我国土壤环境问题突出,耕地土壤环境质量堪忧,ACC 脱氨酶的研究与应用越来越凸显其潜在的价值^[7]。ACC 脱氨酶的开发与应用对改善农田土壤质量、提高土壤肥力、提高农作物产量、减少农药化肥污染等具有重要意义。为全面了解 ACC 脱氨酶方面的作用机理与应

用研究进展,本文采用文献计量分析的方法,对 1991–2016 年科学引文数据库的 Web of knowledge 的 Web of scienceTM 核心合集中 ACC 脱氨酶研究文献进行统计分析,旨在了解当前国际研究现状,以便推动我国 ACC 脱氨酶相关研究及其在土壤污染修复中的应用。

1 数据来源与分析方法

利用美国科学信息研究所 (ISI) Web of knowledge 的 Web of scienceTM 核心合集,数据采集范围为 1991 年–2016 年(1991 年之前文献量较少未做统计),数据检索时间为 2016 年 4 月 20 日,数据库更新时间为 2016 年 4 月 20 日。采用基本检索方式,用“ACC deaminase”、“1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase”作为主题词,以“OR”关系进行检索,文章类型选择 Article、Review 和 Proceeding paper,获取相关文献共计 625 条。核心期刊分析使用 ISI 的期刊引证报告 JCR (Journal citation reports) 及 Bibexcel 进行数据清理与分析(主要针对机构、作者和关键词的同义归并等)。

2 结果与分析

2.1 全球及国家发文趋势分析

表 1 结果表明,1991–2016 年文献发表量总数

表 1 ACC 脱氨酶文献发表量总数居前十名的国家
Table 1 The top 10 countries of literatures on ACC deaminase

排名 Rank	国家 Country	发文量(篇) Number of articles	发文百分比 Percentage (%)	总被引次数 Total citations	每篇平均被引次数 Average citations per paper	H 指数 H-index
1	印度 India	121	19.36	1 590	13.14	21
2	加拿大 Canada	112	17.92	6 343	56.63	44
3	巴基斯坦 Pakistan	84	13.44	1 431	17.04	18
4	中国 China	65	10.40	529	8.14	11
5	美国 USA	59	9.44	1 584	26.85	20
6	韩国 South Korea	54	8.64	836	15.48	17
7	日本 Japan	24	3.84	594	24.75	12
8	德国 Germany	23	3.68	505	21.96	10
9	意大利 Italy	19	3.04	660	34.74	9
10	俄罗斯 Russia	19	3.04	884	46.53	9

前十的国家从高到低依次为: 印度、加拿大、巴基斯坦、中国、美国、韩国、日本、德国、意大利、俄罗斯。其中, 发文量排名前五的国家的发文总量超过全球发文量的一半以上, 达到 70.68%。印度和加拿大的发文量明显高于其他国家, 分别占 ACC 脱氨酶研究论文总数的 19.39% 和 17.95%。加拿大的发文影响力远远高于其他国家, 被引总次数达到 6 343, 平均每篇被引次数为 56.63, 说明加拿大在此研究领域占据主导地位。中国的发文总量为 65, 占全部发文量的 10.42%, 排名第四, 但被引总次数却较为落后, 仅为 529, 平均每篇被引次数仅为 8.14, 说明论文整体影响力不高, 研究力量仍需进一步加强。此外还统计了 H 指数, H 指数表示有 H 篇论文至少被引用 H 次, H 指数越高, 表明论文影响力越大。 H 指数排名前三的国家分别是加拿大、印度和美国, 与按论文被引总次数排序一致。

选择全球及印度、加拿大和中国的发文量按发表年份汇总分析, 结果见图 1。由图 1 可知, 在 Web of science 数据库中, 全球范围内关于 ACC 脱氨酶的研究自 2006 年开始进入快速发展阶段, 在 2008 年发文量达到巅峰之后略有下降, 自 2010 年发文量又进入到快速稳步攀升阶段。1991 年开始出现关于 ACC 脱氨酶的研究论文, 共 2 篇, 其中

日本北海道大学和美国孟山都公司各发表一篇。由美国孟山都 Klee 等^[8]发表在 *Plant Cell* 上的“Control of ethylene synthesis by expression of a bacterial enzyme in transgenic tomato plants”, 被引次数达到 255。加拿大的首篇论文发表于 1994 年, 是由滑铁卢大学 Glick 等^[9]发表于 *Canadian Journal of Microbiology* 上的“1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase mutants of the plant-growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation”, 被引次数为 132。中国的首篇论文是 2007 年大连海事大学 Ji 等^[10]发表的一篇会议论文“Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the seedling growth of oat and annual ryegrass under salt stress”, 被引次数为 0。印度自 2004 年发表首篇论文以来, 直接进入到了稳步快速发展阶段, 与全球研究趋势保持一致。加拿大逐年的发文量虽然较低, 但发文影响力高, 每年平均引用次数达到 276.30。相比之下, 中国 ACC 脱氨酶研究无论在起步还是发展阶段, 都存在一定差距。

2.2 研究机构分析

在统计范围内, 发文量全球排名前十的研究机构见表 2。这 10 个研究机构发文量共计 257 篇, 占全球发文的 41.12%。其中, 加拿大滑铁卢大学

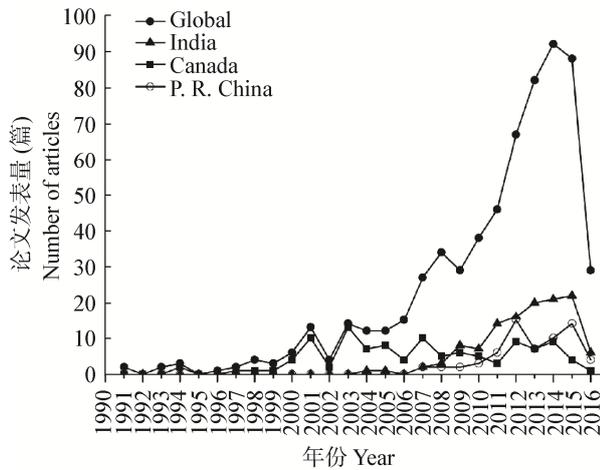


图 1 ACC 脱氨酶文献在全球及印度、加拿大、中国年发文趋势

Figure 1 Tendency of ACC deaminase literatures in the world, India, Canada and China

无论在发文数量还是影响力方面都遥遥领先,总发文量为 100, 被引总次数达到 5 564, 平均每篇被引次数达 55.64。从单篇影响力来看,俄罗斯科学院农业微生物研究所的平均影响力也较高,平均每篇被引次数为 49.36, 排名第二。从近五年发文量来看,巴基斯坦费萨拉巴德农业大学排名第一,其次是加拿大滑铁卢大学和韩国国立忠北大学。从近五年发文量百分比来看,伊朗德黑兰大学、中国南京农业大学和韩国全北国立大学近几年的研究发展呈现出强劲势头,分别占相应国家总发文量的 87.50%、83.33%和 77.78%。中国 ACC 脱氨酶的研究力量主要集中于南京农业大学,发文量排名第五,被引总次数排名第六,近五年发文量排名第三。

表 2 ACC 脱氨酶文献发表量总数居前十名的研究机构
Table 2 The top 10 research institutes of literatures on ACC deaminase

排名 Rank	研究机构 Research institutes	发文量(篇) Number of articles	发文百分比 Percentage (%)	被引总 次数 Total citations	每篇平均被 引次数 Average citations per paper	近五年发文量 (篇) Number of articles in recent 5 years	近五年发文量 百分比 Percentage of publications in recent 5 years (%)	H 指数 H-index
1	加拿大滑铁卢大学 UNIV WATERLOO	100	16.00	5 564	55.64	28	28.00	43
2	巴基斯坦费萨拉巴德农业大学 UNIV AGR FAISALABAD	54	8.64	966	17.89	32	59.26	15
3	韩国国立忠北大学 CHUNGBUK NATL UNIV	26	4.16	637	25.48	10	38.46	14
4	俄罗斯科学院农业微生物研究所 ALL RUSSIA RES INST AGR MICROBIOL	14	2.24	691	49.36	7	50.00	9
5	兰开斯特大学 UNIV LANCASTER	12	1.92	251	20.92	8	66.67	7
6	中国南京农业大学 NANJING AGR UNIV	12	1.92	246	20.50	10	83.33	6
7	印度农业研究所 INDIAN AGR RES INST	12	1.92	78	6.00	9	75.00	6
8	印度泰米尔纳德邦农业大学 TAMIL NADU AGR UNIV	10	1.60	211	21.10	6	60.00	6
9	韩国全北国立大学 CHONBUK NATL UNIV	9	1.44	39	4.88	7	77.78	3
10	伊朗德黑兰大学 UNIV TEHRAN	8	1.28	50	6.25	7	87.50	5

2.3 作者分析

统计范围内, 发文量排名前十的作者见表 3。他们分别来自加拿大、巴基斯坦、俄罗斯、韩国四个国家, 其中来自巴基斯坦 4 位, 其余 3 个国家分别 2 位。这 10 位作者累积发文量为 259 篇, 占有所有作者发文总量的 41.44%。来自加拿大滑铁卢大学的 Glick BR 发文量 97, 被引总次数 5 428, 发文量与文章影响力均排名第一, 明显高于其他作者。来自俄罗斯的两作者 Belimov AA 和 Safronova VI 按发文量分别排名第四和第八, 但按被引总次数和篇均被引次数排名, 均名列前茅, 说明俄罗斯的这两位作者虽然发文量少, 但文章影响力较高。发文量前十的作者中暂无中国作者列入。从 H 指数排名来看, 前四位作者分别是 Glick BR、Zahir ZA、Arshad M 和 Madhaiyan M, 与发文数量排名基本一致, 但与被引总次数和篇均被引次数排序有些出入, 说明 H 指数能够减少为高度引用论文或尚未被引用论文分配的不当权重。

2.4 学科领域分析

关于 ACC 脱氨酶研究涉及的主要学科领域分布情况见表 4。该研究方向涉及最多的 10 个学科, 微生物学位居首位, 发文量占 30.56%, 其他学科依次为生物技术与应用微生物学、植物科学、农业及生态环境科学等。其中说明 ACC 脱氨酶的研究方向更

多倾向于农业生产、环境保护以及交叉学科的研究。

2.5 载文期刊分析

统计范围内, 全球 ACC 脱氨酶研究发文量排名前十的期刊见表 5。这 10 种期刊总共发文 171 篇, 占总发文量的 27.36%, 平均影响因子是 2.078。载文量最多的期刊是“Canadian Journal of Microbiology”, 影响因子为 1.221, 发文量为 25 篇, 被引总次数、篇均被引次数及 H 指数也均以绝对优势位居第一。但该期刊的影响因子低于平均值, 表明单纯以影响因子的高低评价论文的学术价值并不合理。单篇最高引用次数排名第一的期刊是“Plant and Soil”, 达到 580, 影响因子 2.952。从载文期刊综合数据分析, 收录 ACC 脱氨酶研究的期刊较为分散, 平均影响因子较低, 多集中于微生物学、植物学以及土壤学领域。

2.6 高被引论文分析

一定时期内, 高被引论文能够反映学术界对某一领域关注的重点及关注程度。统计范围内, 1991–2016 年 Web of science 数据库中 ACC 脱氨酶方面被引次数最高的前十篇论文见表 6。从国别来看, 加拿大 4 篇, 以色列 2 篇, 俄罗斯、美国、奥地利、巴基斯坦各 1 篇。再一次说明加拿大在 ACC 脱氨酶方面的研究处于国际领先地位, 中国尚无作者进入此行列。在这 10 篇论文中, 被引次数最高

表 3 ACC 脱氨酶文献发表量总数居前十名的作者
Table 3 The top 10 authors of literatures on ACC deaminase

排名 Rank	作者 Authors	国家 Country	发文量(篇) Number of articles	发文百分比 Percentage (%)	被引总次数 Total citations	每篇平均被引次数 Average citations per paper	H 指数 H -index
1	Glick BR	加拿大	97	15.52	5 428	55.96	43
2	Zahir ZA	巴基斯坦	33	5.28	671	20.33	12
3	Arshad M	巴基斯坦	29	4.64	795	27.41	12
4	Belimov AA	俄罗斯	16	2.56	822	51.38	9
5	Madhaiyan M	韩国	16	2.56	494	30.88	12
6	Sa T	韩国	16	2.56	427	26.69	9
7	Naveed M	巴基斯坦	14	2.24	306	21.86	10
8	Safronova VI	俄罗斯	13	2.08	796	61.23	7
9	Shah S	加拿大	13	2.08	503	38.69	9
10	Shaharoon B	巴基斯坦	12	1.92	432	36.00	8

表4 ACC脱氨酶研究所涉及的主要学科领域
Table 4 The main research fields involved in ACC deaminase studies

学科类别 Subject	发文量(篇) Number of articles	发文百分比 Percentage (%)	百分比条形图 Bar chart
微生物学 Microbiology	191	30.56	
生物技术与应用微生物学 Biotechnology & Applied Microbiology	168	26.88	
植物科学 Plant Sciences	162	25.92	
农业 Agriculture	130	20.80	
生态环境科学 Environmental Sciences Ecology	68	10.88	
生物与化学分子生物学 Biochemistry & Molecular Biology	58	9.28	
免疫学 Immunology	26	4.16	
其他生命科学与生物医学 Life Sciences & Biomedicine Other Topics	20	3.20	
其他科学技术 Science Technology Other Topics	19	3.04	
工程学 Engineering	12	1.92	

表5 ACC脱氨酶文献发表量总数居前十名的期刊
Table 5 The top 10 journals of literatures on ACC deaminase

排名 Rank	来源出版物名称 Journals	影响因子 Impact factor	发文量(篇) Number of Articles	发文百分比 Percentage (%)	被引总次数 Total citations	每篇平均被引次数 Average citations per paper	单篇最高引用次数 Highest cited times of single articles	H指数 H-index
1	Canadian Journal of Microbiology	1.221	25	4.00	1 645	65.80	183	21
2	Plant and Soil	2.952	21	3.36	945	45.00	580	12
3	Plant Physiology and Biochemistry	2.756	21	3.36	877	41.76	274	11
4	World Journal of Microbiology Biotechnology	1.779	18	2.88	321	17.83	143	9
5	Applied Soil Ecology	2.644	18	2.88	232	12.89	42	9
6	Journal of Basic Microbiology	1.823	16	2.56	93	5.81	21	6
7	PLoS One	3.234	14	2.24	185	13.21	60	8
8	Pakistan Journal of Botany	0.822	14	2.24	63	4.50	11	6
9	Annals of Microbiology	0.990	13	2.08	277	21.31	193	7
10	Microbiological Research	2.561	11	1.76	246	22.36	163	4

表 6 ACC 脱氨酶研究被引总次数居前十名的文章
Table 6 The top 10 most cited papers on ACC deaminase

排名 Rank	题目 Title	作者 Authors	第一作者国别机构 Country and institute of the first author	被引总 次数 Total citations	每年平均被 引次数 Average citations per year	发表期刊 Journal
1	Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers	Vessey JK	加拿大曼尼托巴大学 UNIV MANITOBA	580	41.64	Plant and Soil
2	Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (<i>Brassica juncea</i> L. Czern.)	Belimov AA, Hontzeas N, Safronova VI, 等	俄罗斯科学研究所 农业微生物研究所 ALL RUSSIA RES INST AGR 以色列耶路撒	279	23.42	Soil Biology & Biochemistry
3	Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress	Mayak S, Tirosh T, Glick BR	冷希伯来大学 HEBREW UNIV JERUSALEM	274	21.23	Plant Physiology and Biochemistry
4	Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria	Penrose DM, Glick BR	加拿大滑铁卢大学 UNIV WATERLOO	262	18.71	Physiologia Plantarum
5	Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment	Glick BR	加拿大滑铁卢大学 UNIV WATERLOO	255	18.21	Biotechnology Advances
6	Control of ethylene synthesis by expression of a bacterial enzyme in transgenic tomato plants	Klee HJ, Hayford MB, Kretzmer KA, 等	美国孟山都公司 Monsanto CO, USA	255	9.81	Plant Cell
7	Bacterial communities associated with flowering plants of the Ni hyperaccumulator <i>Thlaspi goesingense</i>	Idris R, Trifonova R, Puschenreiter M, 等	奥地利 ARC 塞伯 斯多夫研究所 ARC SEIBERSDORF RES GMBH 以色列耶路撒	214	16.54	Applied and Environmental Microbiology
8	Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers	Mayak S, Tirosh T, Glick BR	冷希伯来大学 HEBREW UNIV JERUSALEM	204	15.85	Plant Science
9	Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase	Glick BR	加拿大滑铁卢大学 UNIV WATERLOO	196	16.50	Fems Microbiology Letters
10	Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review	Hayat Rifat, Ali Safdar, Amara Ummay, 等	巴基斯坦 PMA 干旱农业大学 PMAS ARID AGR UNIV	193	28.14	Annals of Microbiology

的是发表在“Plant and Soil”，其作者来自加拿大曼尼托巴大学，被引总次数达 580，平均每年被引次数为 41.64。8 篇高引论文集中发表于 2003–2005 年，而其中又有 5 篇关注非生物环境胁迫条件下 ACC 脱氨酶对植物的促生长作用，这表明 ACC 脱氨酶提高植物抗逆性是这一时期的关注热点。

2.7 研究内容与关注热点分析

2.7.1 全球及国家的高频关键词：通过对 1991–2016 年间全球及印度、加拿大和中国科研人

员发表的 ACC 脱氨酶相关文献的关键词进行词频分析。词频数居前十名的关键词列于表 7。从全球范围来看，植物(根际)促生菌(PGPR/PGPB)以绝对优势排名第一，词频次数为 195，说明 ACC 脱氨酶主要是作为促植物生长特性被研究关注。进一步说，ACC 脱氨酶主要集中于包括 *Pseudomonas*、*Bacillus* 在内的根际细菌、内生细菌，以及在环境胁迫条件下(高盐、重金属等)对植物生长促进作用的研究。因此，植物修复(Phytoremediation)也成为

表 7 全球、印度、加拿大及中国 ACC 脱氨酶研究文章中词频居前十名的关键词
Table 7 The top 10 keywords with highest frequency in ACC deaminase research papers published in the world, India, Canada and China

排名 Rank	全球 Global		印度 India		加拿大 Canada		中国 China	
	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency
1	PGPR/PGPB	195	Siderophore	18	Salt stress/Salinity	29	Heavy metal-resistant bacteria	19
2	Salinity/Salt stress	60	<i>Brassica</i>	17	PGPB/PGPR	14	Plant growth promotion/PGP	19
3	<i>Pseudomonas</i>	58	Phytoremediation	13	Agricultural biotechnology	10	PGPB/PGPR	18
4	Ethylene	53	PGPR/PGPB	12	Ethylene	10	Plant-microbe interactions	18
5	Endophytic bacteria	51	Saline/Salt stress	11	Plant growth-promoting bacterial endophyte	15	Nitrogen fixation	15
6	Phytoremediation	45	Metal tolerant bacteria	10	Biopesticides	9	Phytoextraction	14
7	Rhizobacteria	45	Ethylene	9	<i>Bacillus</i>	9	Microbial communities	13
8	Plant growth promotion	43	Plant growth-promoting traits of rhizobacteria	9	Biofertilizers	9	ACC	13
9	<i>Bacillus</i>	38	Wheat	9	Iturin A	9	Rape	12
10	IAA	30	Field conditions	9	Surfactin	9	Ninhydrin reaction	10

全球范围内的关注热点之一。除此之外,通过印度、加拿大和中国的比较可知,印度学者比较注重同时具有其他促植物生长特性,例如铁载体,或同时具有重金属抗性的菌株研究;加拿大学者更加注重在农业技术及农业生产方面的应用价值;而中国的科研人员在重金属抗性菌株、植物与微生物之间的互作及微生物群落方面有更多的关注。

2.7.2 不同时期的关键词分析:将 1991–2016 年发表的 ACC 脱氨酶的研究论文分为 5 个时间段:1991–1995 年、1996–2000 年、2001–2005 年、2006–2010 年及 2011–2016 年。通过对高频关键词和新出现的关键词词频数进行统计分析,得到不同时期内 ACC 脱氨酶研究热点的变化。从表 8 可知,1991–1995 年,统计到的关键词只有 7 个,主要集中于 PGPR、ACC 以及菌肥的研究上,说明这一时期的研究刚刚起步;1996–2000 年,除 PGPR、ACC 之外,乙烯、ACC 合成酶成为新的高频关键词,说明该阶段重点关注具有 ACC 脱氨酶活性的 PGPR 促进植物生长的机理研究,此外这一阶段还新出现了生物技术等应用方面的关键词,例如植物修复技

术、生物防治、转基因番茄等;2001–2005 年,与上一阶段相比,植物修复、植物防治、转基因番茄以及重金属等关注度增加,并新出现了根际细菌群落、具有重金属抗性的 PGPB 等关键词;2006–2010 年,这一时期是 ACC 脱氨酶研究快速发展的阶段,出现了很多新的高频关键词,如溶磷作用、固氮螺菌、肌醇六磷酸酶、内生细菌、结瘤、耐盐菌等,说明这一时期更关注新的 PGPR 及其促植物生长特性的发掘与研究,同时也更多地关注到 PGPR 促进植物生长作用机理的研究;2011–2016 年,这一阶段在前期研究的基础上表现出进一步的延伸和发展,PGPR/PGPB、根际细菌、内生细菌、油菜、水稻仍然列为高频关键词,同时还出现了促植物生长复合特性、抗氧化剂、干旱胁迫、挥发性有机化合物等新的高频关键词,说明这一阶段的研究延伸到更多类型的非生物胁迫条件下,ACC 脱氨酶对植物生长及其耐受性的影响。除此之外,从生物菌肥、生物杀菌剂、可持续农业等关键词可以看出,这一阶段的 ACC 脱氨酶研究已有向农业生产实际应用发展的趋势。

2.7.3 不同类型的关键词分析: 含有 ACC 脱氨酶的 PGPR 能够缓解植物因受到逆境胁迫产生大量乙烯而造成的抑制作用, 提高植物在干旱、盐胁迫、洪涝、低温及重金属污染等逆境条件下的耐受能力。因此, 将 1991–2016 年发表的 ACC 脱氨酶的研究论文中出现的关键词按照植物类型、微生物类型、环境胁迫类型分类排序, 以此来分析 ACC 脱氨酶方面研究和应用较多的植物、微生物及环境胁迫种类(表 9)。从植物类型来看, 主要以农作物为主, 其中以水稻、小麦、油菜为关键词的频次分别排名

前三, 说明 ACC 脱氨酶研究主要集中于对农作物生长及其耐受性的促进作用。从微生物类型可知, ACC 脱氨酶主要是在细菌中被发现研究, 其中假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和根瘤菌属(*Rhizobium*)的词频数分别达到 58、38 和 27, 排名前三, 说明 ACC 脱氨酶在这三类细菌中被发现和最多。ACC 脱氨酶在环境胁迫下的研究主要集中在非生物胁迫条件, 其中盐胁迫、重金属、干旱成为研究热点, 词频数分别达到 62、47 和 26, 明显高于对其他环境胁迫类型的关注度。

表 8 5 个时期内 ACC 脱氨酶研究文章中关键词统计表
Table 8 The keywords and their frequency in ACC deaminase research papers published during 5 periods

排名 Rank	1991–1995 年		1996–2000 年		2001–2005 年		2006–2010 年		2011–2016 年	
	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency
1	<u>PGPR</u>	10	ACC	40	Ethylene	14	PGPR/PGPB	31	PGPR/PGPB	24
2	<u>ACC</u>	10	PGPR	23	<u>PGPB</u>	12	<u>Phosphorus solubilization</u>	14	Rhizobacteria	16
3	<u>Bacterial fertilizer</u>	5	<u>Ethylene</u>	19	Heavy metal	10	<i>Azospirillum</i>	11	Endophytic bacteria	10
4	<u>Continuous assay</u>	1	<u>ACC synthase</u>	14	<u>Rhizobacterial communities</u>	10	<i>Bacillus</i>	10	Oilseed rape	10
5	<u>Adenosine deaminase</u>	1	<u>Penicillium citrinum</u>	14	<u>Metal-resistant PGPB</u>	10	<u>Phytase</u>	10	Rice (<i>Oryza sativa</i>)	12
6	<u>Pyridoxal phosphate</u>	1	<u>Soil bacteria</u>	10	<u>Lycopersicon esculentum cv. Heinz 902</u>	9	<u>Mechanisms of action</u>	10	<u>Multiple PGP traits</u>	10
7	<u>Site-directed mutagenesis</u>	1	<u>Indole-3-acetic acid PGPR-adventitious roots</u>	9	Transgenic tomato plant	9	Biofertilizers	10	<u>Antioxidant</u>	10
8				9	<u>Growth</u>	9	<u>Endophytic bacteria</u>	9	<u>Drought stress</u>	9
9			<u>Mung bean</u>	9	<u>Fruit</u>	9	<u>Diversity</u>	9	<u>VOCs</u>	9
10			<u>Phytoremediation</u>	4	<i>Azospirillum brasilense</i>	8	<u>Nodulation</u>	9	<u>LapA</u>	9
11			<u>Transgenic tomato</u>	4	<u>Carnation</u>	8	<u>Plant growth promotion</u>	9	<u>EPS</u>	9
12			<u>Heavy metals</u>	4	<u>Cuttings</u>	8	<u>16S rRNA</u>	9	Biofertilizer	9
13			<u>Stress</u>	4	<u>Rooting</u>	8	<u>Halotolerant bacteria</u>	8	<u>Biofungicide</u>	8
14			<u>Biocontrol</u>	2	Biocontrol	7	<u>Root elongation</u>	8	Indole-3-acetic acid	8
15			<u>Ethylene biosensors</u>	2	Phytoremediation	7	Canola	8	<u>Spoon-leaved sundew</u>	8
16			<u>Enterobacter cloacae</u>	1	<i>Pseudomonas putida</i>	7	<u>Salt stress</u>	8	<u>Sustainable agriculture</u>	8
17			<u>Leucine responsive regulatory protein</u>	1	<i>Bacillus sp.</i>	7	Biocontrol	8	<u>Endophyte community</u>	7
18					<u>Scotch Bonnet pepper</u>	7	<u>Exudate</u>	7	<u>Plant stress tolerance</u>	7
19					<i>Brassica napus</i>	7	<u>Phytohormones</u>	7	<u>Pathogenicity suppression</u>	7

(待续)

						(续表)
20	Stress	6	<u>Solanum</u> <u>nigrum</u> L.	6	<u>Salvia</u> <u>officinalis</u>	6
21	<u>Copper</u> <u>Polycyclic</u> <u>aromatic</u> <u>hydrocarbons</u> <u>Alginate</u> <u>encapsulation</u>	1	<u>Phytoextraction</u>	6	<u>Essential oils</u>	6
22		1	IAA	6	<u>Cis-Thujene</u>	6
23		1	<u>Siderophores</u>	6	<u>Antibacterial</u>	6
24			ACC	6	<u>Hungarian</u> <u>vetch</u>	5
25			<u>Burkholderia</u> <u>phytofirmans</u>	5	<u>Humic acid</u>	5
26			Ethylene	5	Salinity	5
27			<u>Nitrogen</u>	4	<u>Autochthonous</u> <u>mycorrhizal</u> <u>fungi</u>	4
28			<u>Rhizosphere</u> <u>competence</u>	3	<u>Autochthonous</u> <u>bacterial strain</u>	4
29			<u>Organic acids</u>	3	<u>Water stress</u>	4
30			<u>Rhizobium</u>	2	<u>Oxidative</u> <u>damage</u>	4
31			<u>Sugarcane</u>	2	<u>Yerba mate</u>	3
32			<u>Symbiotic</u>	1	<u>Nitrogen</u> <u>fertilizer</u>	2
33			<u>Non-symbiotic</u>	1	<u>Nutrient</u> <u>uptake</u>	2

注：下划线标注的为这一时期内新出现的关键词。

Note: The underlined words are the new key words occurred during this period.

表 9 ACC 脱氨酶研究文章中不同类型的词频居前十名的关键词

Table 9 Different types of top 10 keywords with highest frequency occurred in ACC deaminase research papers

排名 Rank	植物 Plant		微生物 Microorganism		环境胁迫 Environmental stress	
	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency	关键词 Keywords	频次(次) Frequency
	1	Rice	31	<i>Pseudomonas</i>	58	Salinity/Salt
2	Wheat	22	<i>Bacillus</i>	38	Heavy metal	47
3	Canola/Brassica	21	<i>Rhizobium</i>	27	Drought	26
4	Maize/ <i>Zea mays</i>	14	<i>Burkholderia</i>	14	Waterlogging	6
5	Tomato	14	<i>Enterobacter</i>	13	Petroleum	5
6	<i>Arabidopsis</i>	10	<i>Azospirillum</i>	12	Hoypoxic	4
7	Switchgrass	7	<i>Burkholderia</i>	9	VOCs (volatile organic compounds)	3
8	Soybean	6	<i>Agrobacterium</i>	8	Air pollutants	2
9	Pepper	5	<i>Methylobacterium</i>	8	Osmotic	1
10	Cucumber	5	Mycorrhizal fungi	7	Low-temperature	1

3 小结

随着土壤污染问题日趋严重，PGPR 提高植物抗逆性与生态修复作用也日益得到关注。ACC 脱氨酶作为逆境条件下 PGPR 促进植物生长的一种重要机理，其相关研究也自然受到全球范围的关注。各国学者积极不断地致力于 ACC 脱氨酶的作用机理

与应用研究。研究论文数量在近几年呈现出持续增长态势，特别是在 2010 年以后，论文数量快速增长。其中印度、加拿大和巴基斯坦在 ACC 脱氨酶研究领域处于国际领先地位。加拿大的发文量和发文影响力均位于首位，研究力量集中，研究人员实力较强，如滑铁卢大学的发文篇数占加拿大总发文

量的 Glick BR 发文篇数占 86.61%，主要关注于 ACC 脱氨酶的作用机理及其在农业生产方面的应用价值。

ACC 脱氨酶在农业生产及环境修复两方面的应用研究引起了微生物、植物、农业、生态环境等各界领域研究人员的广泛关注，并成为近几年相关领域内一直活跃的研究热点。ACC 脱氨酶能够增强植物抗逆性，促进植物生长已被越来越多的科研人员在田间试验中所证实^[11-13]，这为解决农业增产、生物防治、环境治理等问题提供了新的希望和思路。中国在 ACC 脱氨酶方面的研究虽然起步较晚，但目前开展的相关研究也已取得一定进展。姚军朋等^[14]综述了 ACC 脱氨酶在提高作物抗逆性及产量和转基因技术等方面的国内外应用研究进展，展望了 ACC 脱氨酶在植物修复领域的应用价值及其对农业可持续发展的重要意义，并针对 ACC 脱氨酶应用研究尚存在的问题提出采取对策。

中国的发表论文数量虽然排名全球第四，但其影响力却较弱，研究实力有待提高。南京农业大学在 ACC 脱氨酶研究中显示出相对优势，其论文数量、被引总频次与篇均被引频次在全球范围内的研究机构中均排名前十。今后中国在 ACC 脱氨酶的研究要更加注重高水平论文的发表，要实现从量变到质变的飞跃，同时也要加强与高水平研究机构之间的合作，由高水平的个体研究机构带动该领域科研力量的整体提升。中国对 ACC 脱氨酶研究的关注热点体现出一定的特色和前瞻性，从植物修复、植物与微生物互作及微生物生态学等多个领域开展研究。目前利用 PGPR 强化植物修复重金属污染土壤的研究主要停留在修复效果的评价，然而，土壤修复的最终目的不仅仅是去除土壤中过量的重金属，更重要的是恢复土壤的生态生产功能。土壤微生物能够有效反映土壤重金属胁迫程度和健康状况，是土壤修复评价与调控的重要指标。但是，大量引入外源微生物对原有土壤生态环境的影响和作用机制目前还尚未清楚。另外，不同的 PGPR 影响植物生长及其重金属吸收特性的方式也不同，

提高植物修复效率势必要阐明 PGPR 的促植物生长特性及其与土壤微生物、植物以及重金属之间相互作用的机制。因此，植物-微生物相互作用机制、微生物生态学也是今后该领域值得重点关注和跟踪研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Glick BR. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(1): 30-39
- [2] Liu DD, Li M, Liu RJ. Recent advances in the study of plant growth-promoting rhizobacteria in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 815-824 (in Chinese)
刘丹丹, 李敏, 刘润进. 我国植物根围促生细菌研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 815-824
- [3] Gamalero E, Glick BR. Ethylene and abiotic stress tolerance in plants[A]//Ahmad P, Prasad MNV. *Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change*[M]. New York: Springer, 2012: 395-412
- [4] Glick BR. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications[J]. *Scientifica*, 2012, 2012: 963401
- [5] Lugtenberg B, Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63: 541-556
- [6] Dobbelaere S, Vanderleyden J, Okon Y. Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(2): 107-149
- [7] Singh RP, Shelke GM, Kumar A, et al. Biochemistry and genetics of ACC deaminase: a weapon to "stress ethylene" produced in plants[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 937
- [8] Klee HJ, Hayford MB, Kretzmer KA, et al. Control of ethylene synthesis by expression of a bacterial enzyme in transgenic tomato plants[J]. *The Plant Cell*, 1991, 3(11): 1187-1193
- [9] Glick BR, Jacobson CB, Schwarze MMK, et al. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase mutants of the plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1994, 40(11): 911-915
- [10] Ji YX, Huang XD. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the seedling growth of oat and annual ryegrass under salt stress[A]//International Conference on Agriculture Engineering Baoding[C]. Peoples R China Orient Acad Forum, 2007: 661-665
- [11] Nadeem SM, Zahir ZA, Naveed M, et al. Rhizobacteria containing ACC-deaminase confer salt tolerance in maize grown on salt-affected fields[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2009, 55(11): 1302-1309
- [12] Prakamhang J, Tittabutr P, Boonkerd N, et al. Proposed some interactions at molecular level of PGPR coinoculated with *Bradyrhizobium diazoefficiens* USDA110 and *B. japonicum* THA6 on soybean symbiosis and its potential of field application[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 85: 38-49
- [13] Shaharoon B, Arshad M, Zahir ZA, et al. Performance of *Pseudomonas* spp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2971-2975
- [14] Yao JP, Yao T, Wang XL. Research progress and application of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase[J]. *Biotechnology*, 2010, 20(2): 87-91 (in Chinese)
姚军朋, 姚拓, 王小利. ACC 脱氨酶的应用研究进展与评述[J]. *生物技术*, 2010, 20(2): 87-91