

·Meta 分析·

基于文献计量学的耐辐射异常球菌研究态势分析

刘碧波 曾慧娴 谢雨婷 谭乐 唐艳

南华大学公共卫生学院, 衡阳 421001

通信作者: 唐艳, Email: jiayi1530@163.com

【摘要】目的 分析国内外关于耐辐射异常球菌(DR)的研究现状,明确前沿与热点问题,初步评析其发展前景,为进一步的研究提供信息和方向。**方法** 以 Web of Science 和中国知网数据库为文献来源,检索 2009 至 2018 年主题为“耐辐射异常球菌”、“耐辐射奇球菌”、“*Deinococcus radiodurans*”的相关文献,根据发文量、发文期刊、作者信息、关键词以及国家等进行文献计量分析,同时通过国内外文献可视化分析的权威工具 CiteSpace V.5.5 软件对以上信息进行多元、分时、动态地分析,探索它们之间的关系,分析其研究的发展态势、热点及前沿领域等。**结果** 共纳入 1026 篇英文文献和 157 篇中文文献。英文文献数量近十年呈持平递减趋势;中文文献数量则呈波动变化,其引证文献却呈上升的趋势。英文发文量最多的作者是 HUA YJ(华跃进)(48 篇),中文发文量最多的作者是陈明(14 篇)。国外主要发文期刊是美国的 *Plos One* 和 *Journal of Biological Chemistry*,国内的则是《核农学报》;进行这些研究的机构主要是大学和原子能研究中心,发文量前 3 的国家为美国、中国和法国;研究热点主要围绕 DR 的抗性基因,具体研究方向较分散。**结论** DR 的研究主要集中在其抗性基因,因此其耐辐射的机制今后依然是一个研究热点,且其在医学治疗、农业和环境治理等方面的应用研究具有很大的探索空间。

【关键词】 奇异球菌属;辐射耐受性;文献计量学;CiteSpace

基金项目: 湖南省自然科学基金(2018JJ3457);南华大学“大学生研究性学习和创新性实验计划”(2018XJXZ176)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202005027-00047](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202005027-00047)

Trends in *Deinococcus radiodurans* research based on bibliometrics

Liu Bibo, Zeng Huixian, Xie Yuting, Tan Le, Tang Yan

School of Public Health, University of South China, Hengyang 421001, China

Corresponding author: Tang Yan, Email: jiayi1530@163.com

【Abstract】Objective To analyze the research status of radiation-resistant abnormal cocci, *Deinococcus radiodurans*, at home and abroad; identify frontier and hot issues; and preliminarily evaluate future development and prospects in order to provide information and direction for further research. **Methods** Numerous publications from the Web of Science and China national knowledge infrastructure were examined. Advanced search was used to search for relevant literatures between 2009 and 2018 that contain the keyword "*Deinococcus radiodurans*". Literature research covered the full spectrum of major indicators, such as the number of literatures published, journals published, author information, keywords, and countries. CiteSpace V.5.5, an authoritative tool for the visual analysis of literatures at home and abroad, was used to analyze the above information. in a multi-dimensional, time-sharing and dynamic way, to explore the relationship among the indicators and analyze the development trends, hotspots, and frontier fields of research. **Results** A total of 1026 English literatures and 157 Chinese literatures were reviewed. Statistical analyses revealed that the number of English literatures is stable but there is a small fluctuation decline trend in the past 10 years.

By contrast, the number of Chinese literatures has fluctuated during the same period. However, the citation of Chinese literatures is increasing year after year. Among Chinese literatures, Hua YJ (Hua Yuejin) ranked first with 48 English papers, and Chen Ming has published the most in Chinese literatures with 14 papers. The main international journals are *Plos One* and *Journal of Biological Chemistry*, and the most popular domestic journal is the *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. The main research institutions are universities and atomic research centers, and the top three countries are America, China and France. Their studies focused on the resistance genes of *Deinococcus radiodurans*, but their specific research directions are scattered. **Conclusions** Current research on *Deinococcus radiodurans* is focused on its resistance genes. Therefore, the mechanism of its radiation resistance will still be a research hotspot in the future, and its application in medical treatment, agriculture, and environmental governance has a lot of room for exploration.

【 Key words 】 Deinococcus; Radiation tolerance; Bibliometrics; CiteSpace

Fund programs: Natural Science Foundation of Hunan Province (2018JJ3457); University of South China "Research Based Learning and Innovative Experimental Program for College Students" (2018XJXZ176)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202005027-00047](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202005027-00047)

随着核电、核技术、放射技术、航天事业的飞速发展,以及发生核恐怖事件或战争的可能性增加,人们受到辐射损伤的可能性也随之增加^[1-3]。如何加强对放射工作人员、核事故应急人员的防护和对辐射损伤患者的救治,已引起国内外专家的高度关注和重视。虽然人类在进化过程中发展了DNA损伤修复机制,但对电离辐射的抵抗能力仍不强,4~6 Gy的电离辐射就可产生半数致死效应。然而有一种原核生物——耐辐射奇球菌却能在指数生长期耐受高达15 000 Gy的电离辐射,有研究报道其最高可耐受50 000 Gy的辐射剂量^[4],被公认是迄今为止地球上已知的辐射抗性最强的生物;它能产生过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶、类胡萝卜素和锰离子抗氧化物复合物等一系列抗氧化物质^[5-7]。此外,它还能高度抵抗紫外线、干燥以及H₂O₂等损伤因子,一直倍受生物医学以及核医学界的重视^[8-10]。虽然国内外研究者对耐辐射异常球菌(*Deinococcus radiodurans*, DR)已进行了分子、细胞和整体水平的研究,但其很多机制及功能还未被探知,在应用研究方面同样有很大的探索空间。文献计量学是一门运用数学和统计学方法进行定量分析的交叉学科,其因具有显著的客观性、量化、模型化的宏观研究优势,已被不少学科采用^[11],但目前仍未见关于DR中文文献计量学分析的报道。本研究采用文献计量学 and CiteSpace V.5.5(一种国内外文献可视化分析软件)从多元、

分时、动态角度分析DR的研究现状,初步评析其发展前景,为进一步的研究提供信息和方向。

1 材料与方法

1.1 文献数据来源与检索策略

1.1.1 文献数据来源

本研究所使用的英文数据来自Web of Science(简称WOS)核心数据库,中文数据来自中国知网(China national knowledge infrastructure, CNKI)数据库。

1.1.2 文献数据检索

由4名研究者在WOS核心数据库(2009至2018年)和CNKI数据库(2009至2018年)进行计算机网络检索。参考PubMed数据库中的医学主题词表检索得到“*Deinococcus radiodurans*”主题词,英文文献以“*Deinococcus radiodurans*”为主题词进行检索。中文文献以“耐辐射异常球菌”、“耐辐射奇球菌”为主题词进行高级检索。

根据纳入和排除标准进一步筛选文献。纳入标准:与DR相关的研究;2009至2018年发表的文献。排除标准:行动指南、访谈、会议总结和专利摘要;与DR无关的研究;重复发表的文献。英文文献以“纯文本”格式导出,并有完整的记录。中文文献以“refworks”格式导出,导出的内容包含作者、文献标题、摘要、关键词等。由于CNKI数据库中的引文数据未完全开放,因此没有对引文进行

分析。

1.2 分析方法

1.2.1 一般情况的分析

将检索得到的文献导入北京爱琴海软件公司开发的文献管理软件 NoteExpress, 按照标题、期刊进行去重处理, 然后再通过阅读标题、摘要及全文排除重复文献。该步骤通过双人工筛选完成。使用美国 GraphPad 公司的 Prism 8 软件绘制发文量年度分布图。利用 Excel 2016 对导入的文献数据信息进行统计。统计时均以第一研究机构、第一作者为标准, 同时结合多项统计指标对文献数量、核心作者、被引频次(反映研究者在某一研究领域的成就)^[12-13]、文献类型、期刊来源及研究领域等进行文献计量学分析。

1.2.2 数据的可视化分析

通过 CiteSpace V.5.5 软件对作者信息、发文章刊、国家、关键词等进行多元、分时、动态地分析, 探索它们之间的关系, 并通过可视化的方式呈现出科学知识图谱, 展现该研究领域在一段时间内的发展趋势和前沿热点问题^[14]。该软件生产的合作图谱可分析一个领域中机构和国家的贡献, 一个国家或一个机构发表的研究结果越多, 则说明他们做的贡献越多^[15]。中心度不低于 0.1, 说明机构或国家在该领域占据了重要地位^[16]。

操作方法: 运用 CiteSpace V.5.5 软件中内置的 CNKI 数据转换器将“refworks”格式数据转换为可识别的格式, 使用 WOS 数据转换器完成“纯文本”数据中的重复数据去除和将文档制表符转化为 CiteSpace V.5.5 处理的标准格式。本研究中的 CiteSpace V.5.5 参数设置: 时间跨度为 2009 至 2018 年, 时间切片为 1 年, 术语来源包括标题、摘要、作者关键词和关联关键词, 节点类型为按照分析对象选取, 选择标准为“Top 50”, 网络连线强度选择“cosine”。

通过 CiteSpace V.5.5 对文献中的关键词行共现分析以确定基于文献计量学视角的热点研究领域。研究热点是该领域研究人员主要关注和研究的方向, 文献的关键词是文献的高度凝练, 从一定程度上反映了文献的主要内容^[17-18]。在进行数据可视化分析时, 节点类型先后选取“keyword”(关键词)、“country”(国家)、“institution”(研究机构), 然后选择合适的阈值和参数, 分别得到 DR 的研究机

构、国家的合作图谱。

2 结果

2.1 文献检索结果

共检索出 1031 篇英文和 197 篇中文文献, 数据经过滤和去重后, 最终纳入英文文献 1026 篇和中文文献 157 篇。

2.2 一般情况的分析结果

2.2.1 发文量年度分布

由图 1 可见, 2009 至 2018 年英文文献的发文量呈持平递减趋势, 其中 2011 至 2013 年和 2016 至 2018 年两个时间段的发文量总体略少, 但仍保持着每年不少于 90 篇的水平; 中文文献的发文量在 2009 至 2018 年间呈波动变化, 发文量明显比英文文献少, 2013 年发文量最多, 为 25 篇。

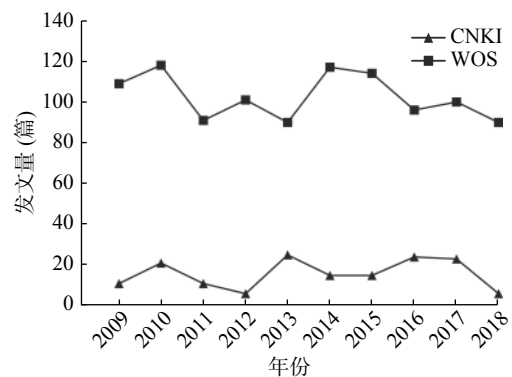


图 1 2009 至 2018 年基于 CNKI 与 WOS 数据库的关于耐辐射异常球菌的文献发文量 CNKI 为中国知网; WOS 为 Web of Science

Figure 1 Distribution map of literatures published on China national knowledge infrastructure and Web of Science database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

2.2.2 国内外的重要作者及其最新的研究成果

2009 至 2018 年, CNKI 数据库中 DR 的发文量排名前 9 的作者中有 4 位来自于中国农业科学院生物技术研究所, 且发文量排名前 2 的作者也均来自该研究所(表 1), 这说明该研究所在 DR 领域的发文量占很大优势。来自西南科技大学的杨杰的发文量排名第 9, 但其多作为第一作者, 且篇均被引频次最高(4.571)。杨杰在该领域中被关注最多的研究^[19]是 2015 年用扫描电镜与能谱分析发现 DR 的多种活性基团可能参与吸附放射性核素铀的过程, 为该菌作为生物吸附剂应用于放射性环境治理提供了依据。

由表 2 可知, 2009 至 2018 年, WOS 数据库发

表 1 2009 至 2018 年中国知网数据库中关于耐辐射异常球菌的研究发文量排名前 9 的作者及其论文信息

Table 1 Top 9 authors and their paper information of the China national knowledge infrastructure database on studies on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

作者	发文量(篇)	第一作者数	作者单位	年限	核心期刊数	被引频次	篇均被引频次
陈明	14	0	中国农业科学院生物技术研究所	2009至2017年	14	34	2.429
张维	13	0	中国农业科学院生物技术研究所	2009至2017年	5	28	2.154
华跃进	12	0	浙江大学	2010至2017年	12	32	2.667
周正富	11	1	中国农业科学院生物技术研究所	2009至2017年	0	22	2.000
何淑雅	10	1	南华大学	2009至2018年	2	30	3.000
马云	9	2	南华大学	2009至2018年	1	15	1.667
王劲	8	0	西南科技大学	2010至2017年	6	13	1.625
林敏	7	0	中国农业科学院生物技术研究所	2009至2017年	1	9	1.286
杨杰	7	5	西南科技大学	2011至2018年	2	32	4.571

表 2 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌的研究发文量排名前 10 的作者

Table 2 Top 10 authors of the Web of Science database on studies on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

作者	发文量(篇)
Hua YJ	48
Tian B	27
Wang L	21
Misra HS	21
Grove A	18
Sommer S	18
Lim S	11
Xu G	10
Kim MK	9
Sun WJ	8

表 3 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌的研究被引频次排名前 10 的作者

Table 3 Authors with highly cited Top 10 in Web of Science database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

作者	被引频次
Daly MJ	375
Cox MM	262
Slade D	251
Makarova KS	235
Battista JR	209
White O	162
Mattimore V	153
Zahradka K	144
Blasius M	143
Tanaka M	118

量排名前 10 的作者中有 4 位来自中国，分别是 Hua YJ、Tian B、Wang L 和 Xu G，且其中 3 位作者的发文量分别位列前 3。但被引频次排名前 10 的名单中未见该 4 位作者，被引频次最高的是 Daly MJ(表 3)。

2.2.3 本领域内国内外的主要发文期刊

由表 4 可知，2009 至 2018 年，在 WOS 数据库中，DR 发文量排名前 10 的期刊中，美国占 7 个，美国 *Plos One* 杂志关于 DR 的发文量最多，总发文量为 61 篇，而荷兰 *DNA Repair* 和英国 *Nucleic Acids Research* 杂志虽发文量较少，但该研究领域文献篇均被引频次却较高，分别排名第 4 和第 6；虽然美国 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 杂志的发文量(22 篇)仅约为 *Plos One* 杂志发文量的 1/3，但其篇均被引频次却高达 69.400。

2009 至 2018 年，在 CNKI 数据库中，DR 发文量排名前 13 的期刊累计发文量为 52 篇，占总发文量的 33.1%(52/157)。发文量排名前 3 的期刊分别为《核农学报》、《生物技术进展》和《辐射研究与辐射工艺学报》(表 5)。

2.3 可视化分析结果

2.3.1 研究热点

基于 WOS 数据库的 DR 研究的关键词聚类分析结果显示，近十年的研究聚为 16 个类别，主要从基因、蛋白、不同菌种以及酶和外界环境作用等角度进行研究，这 16 个类别代表近十年国内外在该领域的研究热点。热点关键词中，被引频次排名前 3 的是“*Deinococcus radiodurans*”(耐辐射异常球菌)、“*Escherichia coli*”(大肠杆菌)、“ionizing radiation”(电离辐射)，中心度排名前 3 的是“bacterium”(细菌)、“*Deinococcus*”(异常球菌)、

表 4 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌的研究主要来源期刊及其他数据分析**Table 4** Analysis of the main source journals and other data about the research of *Deinococcus radiodurans* in Web of Science database from 2009 to 2018

期刊名称	发文量占比(%)	篇均被引频次	影响因子	国家
<i>Plos One</i>	5.945(61/1026)	15.902	2.776	美国
<i>Journal of Biological Chemistry</i>	3.216(33/1026)	30.364	4.106	美国
<i>Journal of Bacteriology</i>	2.826(29/1026)	28.414	3.234	美国
<i>Astrobiology</i>	2.241(23/1026)	24.957	3.768	美国
<i>Biochemistry</i>	2.144(22/1026)	12.696	2.952	美国
<i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i>	2.144(22/1026)	69.400	9.580	美国
<i>Extremophiles</i>	1.949(20/1026)	12.900	2.046	德国
<i>DNA Repair</i>	1.851(19/1026)	27.895	3.710	荷兰
<i>Frontiers in Microbiology</i>	1.851(19/1026)	10.263	4.259	美国
<i>Nucleic Acids Research</i>	1.754(18/1026)	23.056	11.147	英国

表 5 2009 至 2018 年中国知网数据库中关于耐辐射异常球菌的研究主要来源期刊的发文量**Table 5** The number of papers published in the main source journals of the research on *Deinococcus radiodurans* in China national knowledge infrastructure database from 2009 to 2018

期刊名称	发文量(篇)
核农学报	14
生物技术进展	11
辐射研究与辐射工艺学报	5
中国农业科技导报	4
绵阳师范学院学报	2
现代生物医学进展	2
微生物学通报	2
生物工程学报	2
南华大学学报	2
科技视界	2
环境科学与技术	2
安徽农业科学	2
安全与环境学报	2

“protein oxidation”(蛋白质氧化)。从关键词的聚类、引用频次和中心度的相关情况来看,关键词聚类较分散,其被引频次与中心度排名前 10 的关键词重合性小。

在 CNKI 高频关键词的研究报告中,出现频次和中心度均较高的为“耐辐射奇球菌”和“PprI”(DNA 损伤开关响应蛋白)(表 6),目前国内研究者主要研究耐辐射奇球菌的基因。“PprI”是除“耐辐射奇球菌”以外中心度最高的词,含有该词的文献被广泛引用。

表 6 2009 至 2018 年中国知网数据库中关于耐辐射异常球菌的研究文献中出现频次排名前 10 的关键词**Table 6** Top 10 basic information of keywords of research literatures based on China national knowledge infrastructure database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

关键词	出现频次	中心度	年份
耐辐射奇球菌	62	0.27	2009
耐辐射异常球菌	27	0.08	2011
PprI	9	0.24	2010
PprM	6	0.00	2015
吸附	6	0.00	2014
IrrE	4	0.02	2011
大肠杆菌	4	0.00	2011
奇球菌	4	0.00	2010
非生物胁迫	4	0.01	2017
耐辐射球菌	3	0.00	2013

注: PprI、IrrE 为 DNA 损伤开关响应蛋白; PprM 为耐辐射奇球菌抗辐射响应蛋白

2.3.2 国家与机构合作图谱分析结果

对研究 DR 的国家的出现频率和中心度分析结果显示,整体而言,发达国家在该领域的研究占主导地位,发展中国家仅占 3 个,分别是中国、印度和巴基斯坦(表 7)。美国在发文量和中心度上都占有比较明显的优势,尤其在发文量上占据绝对优势,为发文量排名第 2 的国家的 2 倍。而在中心度上排名第 1 的国家为德国。中国在发文量上排名第 2,虽然在 CNKI 数据库中的文献数量不多,但中国作者在英文期刊上发表了较多的相关文献。中国文献的中心度不够高,在中心度排名前 10 的国家中未见中国。通过 CiteSpace V.5.5 对 WOS 数据

表 7 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌的研究的发文量与中心度排名前 10 的国家

Table 7 Top 10 countries based on Web of Science literature quantity and centrality on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

国家	发文量(篇)	国家	中心度
美国	314	德国	0.65
中国	154	美国	0.49
法国	122	法国	0.43
印度	108	日本	0.41
德国	85	芬兰	0.22
韩国	62	意大利	0.16
日本	43	俄罗斯	0.15
意大利	38	英国	0.11
英国	35	巴基斯坦	0.09
俄罗斯	23	瑞典	0.08

库中的检索结果做国家合作图谱分析, 结果同样显示, 德国、美国、法国、日本等国家发表的文献中心度高, 而中国的偏低, 这说明虽然中国在该领域的论文发表数量多, 但与其他国家的合作少, 在该领域的影响力偏低(图 2)。

在研究机构方面, WOS 数据库中发文量排名前 5 的机构分别为印度巴巴原子能研究中心(Bhabha Atom Res Ctr)、中国浙江大学、法国国家科学研究中心(CNRS)和法国巴黎第十一大学(Univ Paris 11)、美国路易斯安那州立大学(Louisiana State Univ), 来自印度和中国的机构在该领域的发文量较多(表 8), 但从研究机构的合作图谱来看, 这两个机构的发文量虽多, 但与其他机构的合作度较低, 而法国的机构在该领域的发文量较多且与其他机构的合作密切, 如法国巴黎第十一

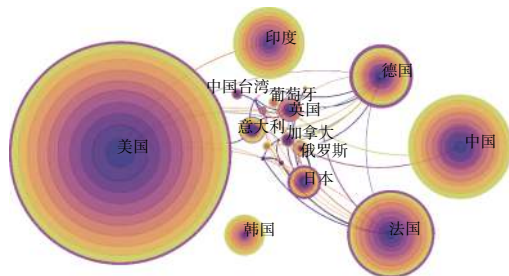


图 2 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌研究的研究国家合作图谱 节点类型为国家, 时间切片为 1 年, 选择标准为“Top 50”, 结果显示: 节点数为 30 个, 连线数为 47, 密度为 0.108

Figure 2 Research on national cooperation map based on Web of Science database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

表 8 2009 至 2018 年 Web of Science 数据库中关于耐辐射异常球菌的研究的发文量排名前 10 的研究机构

Table 8 Top 10 research institutions based on Web of Science database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

机构名称	国家	发文量(篇)
Bhabha Atom Res Ctr(巴巴原子能研究中心)	印度	68
Zhejiang Univ(浙江大学)	中国	57
CNRS(法国国家科学研究中心)	法国	30
Univ Paris 11(巴黎第十一大学)	法国	25
Louisiana State Univ(路易斯安那州立大学)	美国	24
Univ Wisconsin(威斯康星大学)	美国	21
Russian Acad Sci(俄罗斯科学院)	俄罗斯	19
Korea Atom Energy Res Inst(韩国原子能研究院)	韩国	15
CEA(原子能和替代能源委员会)	法国	13
Seoul Womens Univ(首尔女子大学)	韩国	10

大学(Univ Paris 11)和法国国家科学研究中心与法国原子能和替代能源委员会(CEA)间的合作密切(图 3)。

3 讨论

从 DR 的文献增长情况来看, 英文文献数量近十年呈持平递减状态, 中文文献数量则呈波动变化, 这说明目前在该领域的研究已陷入瓶颈期, 但可喜的是中文文献的引证文献在此期间呈现出增长的趋势, 这说明国内该领域的研究发文质量逐年提高。

对发文作者和发文期刊的分析结果显示, 刊登英文文献的期刊大多来自美国, 这与美国对该领域的研究起步较早有关: 1956 年, DR 首次被美国科学家从 γ 射线辐射后的肉罐头中发现^[20]; 该领域内影响因子最高的杂志 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 也是美国的。英文文献发文量最多的是中国作者 HUA YJ(华跃进); 中文文献发文量最多的作者是陈明, 篇均被引频次最高的作者是杨杰。国内该领域研究发文量排名前 2 的作者均来自中国农业科学院生物技术研究所, 他们的研究多发表在《核农学报》。这些信息可以帮助该领域的研究者快速了解最新、最重要的研究成果, 促进学者间的知识共享和交流, 进一步推进该领域的研究。

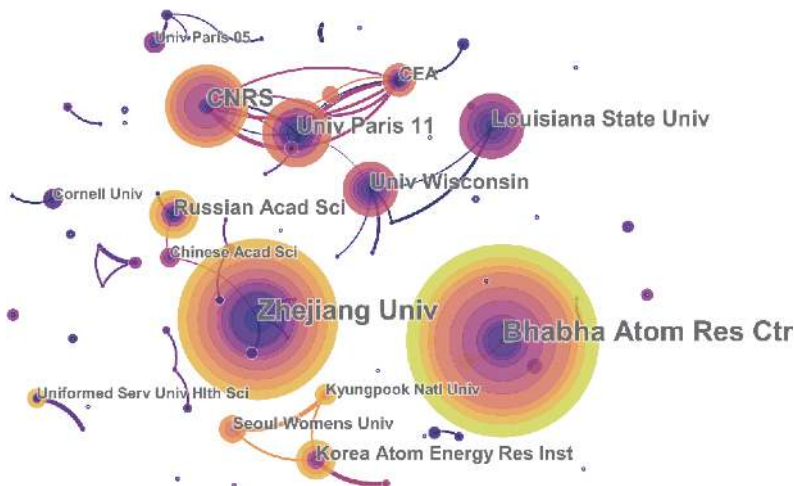


图3 2009至2018年Web of Science数据库中关于耐辐射异常球菌的研究的机构合作图谱。节点类型为机构，时间切片为1年，选择标准为“Top 50”，结果显示：节点数为78个，连线数为52，密度为0.0173。Univ Paris 05为法国巴黎第五大学；CNRS为法国国家科学研究中心；CEA为法国原子能和替代能源委员会；Univ Paris 11为法国巴黎第十一大学；Louisiana State Univ为美国路易斯安那州立大学；Cornell Univ为美国康奈尔大学；Univ Wisconsin为美国威斯康星大学；Russian Acad Sci为俄罗斯科学院；Chinese Acad Sci为中国科学院；Zhejiang Univ为中国浙江大学；Bhabha Atom Res Ctr为印度巴巴原子能研究中心；Uniformed Serv Univ Hlth Sci为美国健康科学统一服务大学；Kyungpook Natl Univ为韩国庆北大学；Seoul Womens Univ为韩国首尔女子大学；Korea Atom Energy Res Inst为韩国原子能研究院

Figure 3 Cooperation map of research institutions based on Web of Science database on *Deinococcus radiodurans* from 2009 to 2018

国家、机构合作图谱显示，国家间的合作较普遍，而机构间合作不足。但由于各机构间缺乏深层次的交流，导致研究重叠、不深入。国家、机构合作图谱表明美国是主要的发文国家，与其他国家的合作较多，研究成果较其他国家更丰富；中国发文量也很可观，但中国除与俄罗斯和英国有合作外，基本上很少与其他国家合作，因此，国内DR的相关研究者可以在未来的研究中加大与其他各国的合作，以便获得更多研究成果，提升在该领域的影响力。从机构合作图谱分析来看，各个机构间合作较少，未来还需加大该领域各个前沿机构的相互合作，集结该领域的人才，使该领域的研究更深入。

从国内外研究热点来看，国外研究的热点比较分散，而国内的研究主要集中在对耐辐射奇球菌抗性基因的研究及对其实际应用的探索。其中PprI是研究最多的转染基因之一，近年来，关于其的基础及应用研究逐步深入。研究者在早期发现，PprI基因可以调控DR中recA基因的表达，并且PprI的敲除株会失去DR对电离辐射的超强抗性^[20-22]。Hua等^[20]于2003年提出，激活的PprI

作为一个总开关，可调节包括recA、pprA和过氧化氢酶在内的多个DNA修复和保护基因的表达和活化，对DR的辐射损伤修复起到重要作用。Kuo和Allis^[23]的蛋白组学分析结果显示，PprI基因作为一个总开关，不但显著上调全局调控蛋白PprI、重组酶RecA^[24]、多效修复蛋白PprA，还涵盖了参与压力响应、能量代谢、转录调控、信号转导、蛋白翻译和伴侣蛋白六大途径的基因，并能增强细胞清除自由基的能力。PprI蛋白失活将导致DR对辐照及其他极端环境因素敏感，进而引起菌体死亡。陈震等^[25]在2013年综合分析了该调控蛋白潜在的应用前景。Devigne等^[26]通过实验证明IrrE(DNA损伤开关响应蛋白)可与DdrO(DNA损伤诱导基因的负调节因子)相互作用，促进DNA损伤诱导基因的表达，提高DR对辐射、干旱等的抗

性。Dong等^[27]研究发现，PprI的表达提高了乳酸乳球菌对各种压力的耐受性；黎婷婷等^[28]研究发现，PprI作为全局性的开关基因，能够在DNA损伤响应与修复过程中调控众多细胞通路的基因表达。Shi等^[29]研究发现，以活体转染的方式将PprI蛋白(肌肉注射)转入受照小鼠体内，可提高小鼠的辐射抗性，对动物急性放射损伤具有明显的保护作用。Chen等^[30]研究发现，上述这种辐射保护作用可能与DR的recA同源的Rad51蛋白的表达有关。Luo等^[31]研究发现，将IrrE导入铜绿假单胞菌PAO1中后，IrrE的表达可提高其约71%的产电效率。今后，对DR辐射抗性机制的研究不断深入，可为生物体的辐射防护提供更好的思路。但目前相关研究仍停留在动物研究阶段，将该基因用于人类辐射防护的设想还需不断探索。

本研究通过WOS和CNKI数据库对主题词“耐辐射奇球菌”、“耐辐射异常球菌”、“*Deinococcus radiodurans*”进行检索，基于文献计量学观点及CiteSpace V.5.5分析，对关于DR的研究的发文量、发文期刊、作者信息、国家和机构的合作情况、研究内容及热点等做了全面的比较分

析。中国在该研究领域占有一定的地位,研究者众多、发文量也可观,但研究不够深入,缺乏与其他国家和机构的合作研究,影响力还不够大。通过以上分析,得到了DR相关研究的状况,这提示我们,DR的抗辐射机制今后依然是一个研究热点,同时研究趋势将逐步转向医学治疗、农业和环境治理等方面。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 刘碧波负责论文的撰写;曾慧娟负责数据的分析;谢雨婷、谭乐负责图表的绘制;唐艳负责论文的审阅与最终版本的修订。

参 考 文 献

- [1] Iglesias ML, Schmidt A, Al Ghuzlan A, et al. Radiation exposure and thyroid cancer: a review[J]. *Arch Endocrinol Metab*, 2017, 61(2): 180–187. DOI: 10.1590/2359-3997000000257.
- [2] Dainiak N. Medical management of acute radiation syndrome and associated infections in a high-casualty incident[J]. *J Radiat Res*, 2018, 59(Suppl 2): Sii54–ii64. DOI: 10.1093/jrr/rry004.
- [3] 廖小刚, 王岩松. 2019年国外载人航天发展综述[J]. *载人航天*, 2020, 26(1): 113–119. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2020.01.017.
Liao XG, Wang YS. Review of human spaceflight development abroad in 2019[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(1): 113–119. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2020.01.017.
- [4] 茆璇, 郭江峰. 极端微生物及其相关功能蛋白研究进展[J]. *生命科学*, 2018, 30(1): 107–112. DOI: 10.13376/j.cbls/2018015.
Mao X, Guo JF. Functional protein research progression in extremophiles[J]. *Chin Bull Life Sci*, 2018, 30(1): 107–112. DOI: 10.13376/j.cbls/2018015.
- [5] Slade D, Radman M. Oxidative stress resistance in *Deinococcus radiodurans*[J]. *Microbiol Mol Biol Rev*, 2011, 75(1): 133–191. DOI: 10.1128/MMBR.00015-10.
- [6] Lim S, Jung JH, Blanchard L, et al. Conservation and diversity of radiation and oxidative stress resistance mechanisms in *Deinococcus species*[J]. *FEMS Microbiol Rev*, 2019, 43(1): 19–52. DOI: 10.1093/femsre/fuy037.
- [7] Qi HZ, Wang WZ, He JY, et al. Antioxidative system of *Deinococcus radiodurans*[J]. *Res Microbiol*, 2020, 171(2): 45–54. DOI: 10.1016/j.resmic.2019.11.002.
- [8] Yamashiro T, Murata K, Kawai S. Extremely high intracellular concentration of glucose-6-phosphate and NAD(H) in *Deinococcus radiodurans*[J]. *Extremophiles*, 2017, 21(2): 399–407. DOI: 10.1007/s00792-016-0913-z.
- [9] Pellegrino S, Radzimanowski J, McSweeney S, et al. Expression, purification and preliminary structural analysis of the head domain of *Deinococcus radiodurans* RecN[J/OL]. *Acta Crystallogr Sect F Struct Biol Cryst Commun*, 2012, F68: 81–84 [2020-05-14]. <http://scripts.iucr.org/cgi-bin/paper?S174430911048743>. DOI: 10.1107/S1744309111048743.
- [10] Satoh K, Kikuchi M, Ishaque AM, et al. The role of *Deinococcus radiodurans* RecFOR proteins in homologous recombination[J]. *DNA Repair*, 2012, 11(4): 410–418. DOI: 10.1016/j.dnarep.2012.01.008.
- [11] 任全娥. 大数据背景下的文献计量学研究进展与学科融合[J]. *情报理论与实践*, 2019, 42(1): 48–52. DOI: 10.16353/j.cnki.1000-7490.2019.01.008.
Ren QE. Research progress and disciplinary fusion of bibliometrics under the background of big data[J]. *Inf Stud Theory Appl*, 2019, 42(1): 48–52. DOI: 10.16353/j.cnki.1000-7490.2019.01.008.
- [12] 何宏灵, 原宝华. 医学科技论文被引频次的影响因素研究[J]. *中国全科医学*, 2017, 20: 435–437.
He HL, Yuan BH. The influence factors of cited medical research papers[J]. *Chin Gen Pract*, 2017, 20: 435–437.
- [13] 王宇鸣, 高福强, 邹海波. 基于大数据的原发性骨质疏松症研究现状与热点的可视化分析[J]. *中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志*, 2020, 13(4): 296–303. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2591.2020.04.003.
Wang YM, Gao FQ, Zou HB. Current research status and future hotspots of primary osteoporosis based on bibliometric assessment and visualization techniques[J]. *Chin J Osteoporos Bone Miner Res*, 2020, 13(4): 296–303. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2591.2020.04.003.
- [14] 李宝贵, 尚笑可. 我国汉语国际教育研究现状分析(2008–2018)——基于文献计量学视角[J]. *辽宁师范大学学报: 社会科学版*, 2019, 42(3): 12–21. DOI: 10.16216/j.cnki.lsxwbk.2019.03012.
Li BG, Shang XK. The analysis of Chinese international education research (2008–2018) in China —based on bibliometrics[J]. *J Liaoning Norm Univ (Soci Sci Edit)*, 2019, 42(3): 12–21. DOI: 10.16216/j.cnki.lsxwbk.201903012.
- [15] Zhou W, Kou AQ, Chen J, et al. A retrospective analysis with bibliometric of energy security in 2000–2017[J]. *Energy Rep*, 2018, 4: 724–732. DOI: 10.1016/j.egy.2018.10.012.
- [16] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016: 89–90.
Li J, Chen CM. CiteSpace: text mining and visualization in scientific literature[M]. Beijing: Capital University of Economy and Trade Press, 2016: 89–90.
- [17] 袁敬芸, 刘春茂. 基于可视化的情报学理论发展趋势研究[J]. *图书馆工作与研究*, 2019, (5): 5–13. DOI: 10.16384/j.cnki.lwas.2019.05.001.
Yuan JY, Liu CM. Research on development trend of information science theory based on visualization[J]. *Libr Work Study*, 2019, (5): 5–13. DOI: 10.16384/j.cnki.lwas.2019.05.001.
- [18] 胡佳卉, 孟庆刚. 基于CiteSpace的中药治疗2型糖尿病知识图谱分析[J]. *中华中医药杂志*, 2017, 32(9): 4102–4106.
Hu JH, Meng QG. Knowledge map analysis of Chinese medicine treatment of type 2 diabetes based on CiteSpace[J]. *China J*

- Tradit Chin Med Pharm, 2017, 32(9): 4102–4106.
- [19] 杨杰,董发勤,代群威,等.耐辐射奇球菌对放射性核素铀的吸附行为研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(4):1010–1014. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)04-1010-05.
- Yang J, Dong FQ, Dai QW, et al. Biosorption of radionuclide uranium by *Deinococcus radiodurans*[J]. Spectrosc Spect Anal, 2015,35(4):1010–1014. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)04-1010-05.
- [20] Hua YJ, Narumi I, Gao GJ, et al. PprI: a general switch responsible for extreme radioresistance of *Deinococcus radiodurans*[J]. Biochem Biophys Res Commun, 2003, 306(2): 354–360. DOI: 10.1016/S0006-291X(03)00965-3.
- [21] Gao GJ, Lu HM, Huang LF, et al. Construction of DNA damage response gene *pprI* function-deficient and function-complementary mutants in *Deinococcus radiodurans*[J]. Chin Sci Bull, 2005, 50(4): 311–316. DOI: 10.1007/BF02897571.
- [22] Earl AM, Mohundro MM, Mian IS, et al. The IrrE protein of *Deinococcus radiodurans* R1 is a novel regulator of *recA* expression[J]. J Bacteriol, 2002, 184(22): 6216–6224. DOI: 10.1128/JB.184.22.6216-6224.2002.
- [23] Kuo MH, Allis CD. *In vivo* cross-linking and immunoprecipitation for studying dynamic protein: DNA associations in a chromatin environment[J]. Methods, 1999, 19(3): 425–433. DOI: 10.1006/meth.1999.0879.
- [24] Ngo KV, Molzberger ET, Chitteni-Pattu S, et al. Regulation of *Deinococcus radiodurans* RecA protein function via modulation of active and inactive nucleoprotein filament states[J]. J Biol Chem, 2013, 288(29): 21351–21366. DOI: 10.1074/jbc.M113.459230.
- [25] 陈震,周正富,张维,等.耐辐射异常球菌全局调控蛋白 IrrE 的研究进展[J].生物技术进展,2013,3(3):179–184. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2341.2013.03.05.
- Chen Z, Zhou ZF, Zhang W, et al. Research progress of the global regulator IrrE in *Deinococcus radiodurans*[J]. Curr Biotechnol, 2013, 3(3): 179–184. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2341.2013.03.05.
- [26] Devigne A, Ithurbide S, de la Tour CB, et al. DdrO is an essential protein that regulates the radiation desiccation response and the apoptotic-like cell death in the radioresistant *Deinococcus radiodurans* bacterium[J]. Mol Microbiol, 2015, 96(5): 1069–1084. DOI: 10.1111/mmi.12991.
- [27] Dong XR, Tian B, Dai S, et al. Expression of PprI from *Deinococcus radiodurans* improves lactic acid production and stress tolerance in *Lactococcus lactis*[J/OL]. PLoS One, 2015, 10(11): e0142918[2020-05-14]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0142918>. DOI: 10.1371/journal.pone.0142918.
- [28] 黎婷婷,王梁燕,王云光,等.耐辐射奇球菌 DNA 损伤响应开关蛋白 PprI 的研究进展[J].核农学报,2016,30(6):1106–1110. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.06.1106.
- Li TT, Wang LY, Wang YG, et al. Research progress of the general switch protein PprI for DNA damage response in *Deinococcus radiodurans*[J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(6): 1106–1110. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.06.1106.
- [29] Shi Y, Wu W, Qiao HP, et al. The protein pprI provides protection against radiation injury in human and mouse cells[J/OL]. Sci Rep, 2016, 6: 26664[2020-05-14]. <https://www.nature.com/articles/srep26664>. DOI: 10.1038/srep26664.
- [30] Chen TT, Hua W, Zhang XZ, et al. The effects of pprI gene of *Deinococcus radiodurans* R1 on acute radiation injury of mice exposed to ⁶⁰Co γ-ray radiation[J/OL]. Oncotarget, 2017, 8(2): 2008–2019[2020-05-14]. <https://www.oncotarget.com/article/13893/text/>. DOI: 10.18632/oncotarget.13893.
- [31] Luo JM, Wang TT, Li X, et al. Enhancement of bioelectricity generation via heterologous expression of IrrE in *Pseudomonas aeruginosa*-inoculated MFCs[J]. Biosens Bioelectron, 2018, 117: 23–31. DOI: 10.1016/j.bios.2018.05.052.

(收稿日期: 2020-05-15)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

谨防诈骗声明

近期发现有单位盗用我刊名义,在社会上征集稿件、征收版面费,造成了极其恶劣的影响,严重地损害了我刊声誉。在此,我刊编辑部严重声明,我们未委托任何单位、公司及网站办理网上投稿、组稿及其相关业务。请广大读者、作者提高警惕,以免上当受骗。我刊网站(www.ijrmm.com)可在线投稿、查询、审稿、退稿等,欢迎广大读者、作者登录并进行相关浏览和投稿。

联系电话: 022-87890607

联系邮箱: gjfh2006@irm-cams.ac.cn

本刊编辑部