

原核耐辐射微生物资源研究及其应用前景

王 玮^{1,2} 朱 静¹ 张志东¹ 唐琦勇¹ 陈 明²

(¹ 新疆农业科学院微生物应用研究所,新疆 乌鲁木齐 830091; ² 中国农业科学院生物技术研究所,北京 100081)

摘 要:耐辐射微生物因特殊的生命现象、生理机制成为科学界关注研究的热点,其中原核耐辐射微生物是研究最多的一类耐辐射微生物。本文从原核耐辐射微生物资源等方面对耐辐射微生物的研究进行综述,并讨论了其在环境工程、人类健康、生物技术乃至军事、地外空间等方面的潜在应用发展前景。

关键词:原核耐辐射微生物;应用前景

Research Progress and Application Prospect of Radiation-Resistant Prokaryotic Microbe

WANG Wei^{1,2} ZHU Jing¹ ZHANG Zhi-dong¹ TANG Qi-yong¹ CHEN Ming²

(¹ Institute of Microbiology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091;

² Biotechnology Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081)

Abstract: Radiation-resistant microbe is becoming the research hotspot because of its special life phenomenon and physiological mechanism. Radiation-resistant bacteria are one kind of the most studied radiation-resistant microbe. This article summarized some aspects of the research on radiation-resistant bacteria, including the radiation resistant bacteria resources, and discussed its potential application prospects in the environmental engineering, biotechnology, human health, military and space et al. .

Key words: Radiation-resistant bacteria; Application prospect

通常所说的辐射是指包括高能粒子流等在内的电离辐射以及非电离辐射中能量较高的 UV 辐射。辐射能造成生物体 DNA 双链断裂,蛋白质等大分子损害,且这种损害能够遗传给后代,造成后代畸形。不同生物对于辐射的耐受剂量不同。人在辐射剂量 4~10Gy (辐射剂量国际单位,每 1kg 受照射物质吸收 1J 核辐射能时,其核辐射剂量称为 1Gy) 健康就受到影响,老鼠致死辐照剂量是 4.5~12Gy^[1],一般微生物可耐受的最高剂量为 3000Gy,而对于可在很高剂量的辐射环境下生存的微生物,通常称为耐辐射微生物。

自 1956 年,美国科学家在经辐照灭菌的罐头里发现耐辐射异常球菌(*Deinococcus radiodurans*)后,耐辐射微生物逐渐引起科学界的关注,以耐辐射异常球菌为

例该菌可在 60Gy 辐照条件下正常生长,经 15kGy 的急性照射也能保持一定的细胞存活率,且具有对干旱和 DNA 损伤的抗性。耐辐射微生物特殊的生命现象、生理机制等在环境工程、人类健康、生物技术乃至军事、地外空间等方面具有极大的潜在应用前景,成为科学界关注、研究的热点。

微生物资源是生命科学和生物技术创新的物质基础,是生物遗传和功能多样性最为丰富的宝藏。耐辐射微生物的发现可以为人类提供更多的研究材料,增加应用范围。

目前已报道的耐辐射微生物包括原核微生物和真核微生物,其中原核耐辐射微生物研究最多,现将其资源研究及其应用综述如下,为进一步的开发应用这类

收稿日期:2012-05-21 接受日期:2013-01-16

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(批准号 2010211B28),国家“863”项目(批准号 2012AA063503 及 2012AA021705),农业部公益性行业科研专项(批准号:201103007)

作者简介:王 玮(1973-)女,新疆乌鲁木齐市人,博士,副研究员。研究方向为环境微生物。Tel:13899923451;E-mail:mypony926@hotmail.com

特殊的微生物提供参考。

1 原核耐辐射微生物资源的研究

目前已报道的原核耐辐射微生物分布于细菌界和古菌界。其中包括细菌界中以下几个属: *Deinococcus*, *Rubrobacter*, *Kineococcus*, *Acinetobacter*, *Methylobacterium*, *Truepera*, *Streptomyces*, *Hymenobacter*, *Microbacterium*, *Lysobacter*。其中 *Rubrobacter*、*Streptomyces*、*Kineococcus* 和 *Hymenobacter*, *Microbacterium* 是属于放线门菌 (*Actinobacteria*), *Deinococcus* 和 *Truepera* 属于异常-栖热门菌 (*Deinococcus-Thermus*), *Acinetobacter* 和

Methylobacterium, *Lysobacter* 属于变形门菌 (*Proteobacteria*)。而古菌中 *Thermococcus* 属为的广古门菌 (*Euryarchaeota*)。在已报道的原核耐辐射微生物中 *Deinococcus* 属的耐辐射微生物研究最多。

1.1 异常球菌属的耐辐射微生物

异常球菌属是包含耐辐射微生物最多的属, 该属目前已经报道有 48 个种, 除了建属时候的五个种外, 其余的大多在近 10 年内报道, 具体情况见表 1, 所有数据来自于网站 LPSN (List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature, 网址: <http://www.bacterio.cict.fr/d/deinococcus.html>)。

表 1 已报导的异常球菌属微生物
Table 1 Reported microorganisms of *Deinococcus* genus

种 Species	分离时间 Isolated time	分离自 Sample	特性 Characteristics
<i>D. aerius</i>	2009	日本大气样品	G ⁺ , 橘色球菌, 具干旱、UV-C 和 γ 辐射强抵抗力
<i>D. aerolatus</i> , <i>D. aerophilus</i>	2009	日本大气样品	G ⁺ , 粉色球菌, 能抵抗一定程度 UV 辐射
<i>D. aetherius</i>	2010	日本大气同温层	G ⁺ , 粉-红色球菌, 具干旱抗性, 对 γ 辐射 D ₁₀ > 8kGy, UV 辐射 D ₁₀ > 1000J m ⁻²
<i>D. alpitudinae</i> <i>D. altitudinis</i> <i>D. claudionis</i> <i>D. radiomollis</i>	2008	阿尔卑斯山土样	G ⁺ , 粉色球菌或杆菌, γ 辐射 D ₁₀ ≤ 4kGy. 对 UV 辐射和干旱敏感。
<i>D. apachensis</i> <i>D. hohokamensis</i> , <i>D. hopiensis</i> , <i>D. pimensis</i> , <i>D. navajonensis</i> <i>D. papagonensis</i> <i>D. maricopenis</i> <i>D. sonorensis</i> , <i>D. yavapaiensis</i>	2005	撒哈拉沙漠土样	G ⁺ , 粉色球菌, 耐 γ 辐射 > 10kGy。
<i>D. aquaticus</i> , <i>D. caeni</i>	2008	韩国新鲜的水样, 水处理场活性污泥	G ⁻ , 杆菌。对 γ 辐射 D ₁₀ ≤ 3kGy
<i>D. aquatilis</i>	2008	水样	G ⁺ , 淡粉色杆菌, 对 UV 辐射具抵抗力
<i>D. aquiradiocola</i>	2009	日本自然辐射点水样	G ⁺ , 淡粉色球菌, 抵抗 16.0 kGy γ 辐射, 640 J·m ⁻² UV 辐射
<i>D. cellulolyticus</i>	2007	韩国济州岛空气	G ⁻ , 粉色杆菌, 可抵抗一定程度 UV 辐射
<i>D. daejeonensis</i>	2011	韩国污水处理场污泥	G ⁺ , 红色球菌, 对 γ 辐射 D ₁₀ > 9kGy
<i>D. depolymerans</i>	2011	日本水样	G ⁺ , 红色杆菌, 具一定 UV 辐射、 γ 辐射抗性
<i>D. deserti</i>	2005	撒哈拉沙漠沙土样	G ⁻ , 粉色杆菌, γ 辐射 > 15kGy
<i>D. ficus</i>	2006	台湾菩提根际	G ⁺ , 淡粉色杆菌, 具一定 UV 辐射抗性
<i>D. frigens</i> , <i>D. marmoris</i> <i>D. saxicola</i>	2004	南极土壤, 大理石, 砂岩样品	G ⁺ 粉色, 鲜红橘色球菌, 具一定 UV 辐射及干旱抗性
<i>D. geothermalis</i> <i>D. murrayi</i>	1997	意大利热泉	G ⁺ , 橘色球菌, γ 辐射 D ₁₀ 为 1.4kGy
<i>D. gobiensis</i>	2009	中国新疆戈壁沙土	G ⁺ , 红色球菌, γ 辐射 > 15 kGy, UV 辐射 > 600J·m ⁻² 。
<i>D. grandis</i>	1987	动物粪便, 淡水鱼	G ⁻ , 粉色或红色杆菌, γ 辐射 > 6 kGy
<i>D. humi</i>	2012	土壤	G ⁺ , 红色球菌, γ 辐射 D ₁₀ > 9kGy
<i>D. indicus</i>	2004	印度砷污染水样	G ⁻ , 红色杆菌, 抗砷与砷酸盐, UV 辐射 > (5.87J·m ⁻²)

续表 1

种 Species	分离时间 Isolated time	分离自 Sample	特性 Characteristics
<i>D. misasensis</i>	2008	日本放射性水样	G ⁺ , 红色或粉色杆菌, 具 UV 和 γ 辐射抗性
<i>D. roseus</i>			
<i>D. peraridilitoris</i>	2007	智利沿海沙漠土样	G ⁺ , 淡粉色球形或短杆菌, 对 γ 辐射 > 10kGy
<i>D. piscis</i>	2009	印度海鱼	G ⁺ , 淡粉色球菌 γ 辐射 D ₁₀ = 7.4kGy
<i>D. proteolyticus</i>	1973	动物粪便	G ⁺ , 橘红色球菌, 对 γ 辐射 > 15kGy
<i>D. radiodurans</i>	1956	灭菌的罐头	G ⁺ , 淡粉色球菌, γ 辐射 D ₁₀ > 4kGy
<i>D. radiophilus</i>	1976	印度龙头鱼	G ⁺ , 淡粉色球菌, 对 γ 辐射 > 10kGy
<i>D. radiopugnans</i>	1963	鳕鱼	G ⁺ , 淡粉色球菌, 对 γ 辐射 > 10kGy
<i>D. reticulitermitis</i>	2011	白蚁肠道	G ⁻ 红色球菌, UV 抗性 > 100J·m ⁻²
<i>D. wulumuqiensis</i> , <i>D. xibeiensis</i>	2010	中国新疆辐射污染区土样	G ⁺ , 淡粉色球菌, 抵抗 10.0kGy γ 辐射, 700J·m ⁻² UV 辐射
<i>D. xinjiangensis</i>	2009	中国新疆沙漠土样	G ⁺ , 淡粉色球菌对 UV 有抗性, 对 γ 辐射和干旱敏感
<i>D. yunweiensis</i>	2007	中国云南污染平板	G ⁻ 红色杆菌 γ 辐射 > 16kGy, UV 辐射 > 624 J·m ⁻²

1.2 其他属的原核耐辐射微生物

除了 *Deinococcus* 属的耐辐射微生物外, 陆陆续续

还有其他属的耐辐射微生物相继被发现, 其具体情况见下表:

表 2 已经报道的其他属的抗辐射微生物

Table 2 Reported radiation-resistant microbe of other genus

属 Genus	种 Species	分离时间 Isolated time	分离自 Sample	耐辐射特性 Characteristics
<i>Rubrobacter</i>	<i>Rubrobacter radiotolerans</i> ^[3]	1973	日本温泉	G ⁺ , 红色杆菌, 可耐受 25kGy γ 辐射
	<i>Rubrobacter xylanophilu</i> ^[4]	1996	工业热废水	G ⁺ , 红色杆菌, 可耐受 16kGy γ 辐射
	<i>Rubrobacter taiwanensis</i> ^[5]	2004	台湾温泉	G ⁺ 粉色杆菌或球菌可耐受 18kGy γ 辐射
<i>Kineococcus</i>	<i>Kineococcus radiotolerans</i> ^[6]	2002	核废料	G ⁺ , 橘色球菌 γ 辐射 D ₁₀ > 3.5kGy
<i>Bacillus</i>	<i>Bacillus megaterium</i> ^[7]	2009	温泉	G ⁺ 白色状菌可耐受 22kGy γ 辐射
<i>Acinetobacter</i>	<i>Acinetobacter radioresistens</i> ^[3]	1988	土样	G ⁻ 黄色球杆菌, γ 辐射 D ₁₀ = 2.2kGy
<i>Methylobacterium</i>	<i>Methylobacterium radiotolerans</i> ^[8]	1971	大米	G ⁻ 红色杆菌 D ₁₀ = 1.4kGy
<i>Truepera</i>	<i>Trueperaradiovictrix</i> ^[9]	2005	葡萄牙温泉	G ⁺ 球菌, 可耐受 > 5kGy γ 辐射
<i>Microbacterium</i>	<i>Microbacterium radiodurans</i> ^[10]	2010	辐射污染区	G ⁺ 红色短杆菌具耐 UV 辐射特性
<i>Lysobacter</i>	<i>Lysobacter xinjiangensis</i> ^[11]	2010	沙漠土样	G ⁻ 黄色杆菌, 可耐受热和碱, 具 UV 辐射
<i>Streptomyces</i>	<i>Streptomyces radiopugnans</i> ^[12]	2007	辐射污染区	G ⁺ 白色链球菌, 可耐受 > 15kGy γ 辐射
	<i>Thermococcus gammatolerans</i> ^[13]	2003	海底喷烟口	G ⁺ 粉色球菌, 可耐受 > 30kGy γ 辐射
<i>Thermococcus</i>	<i>Thermococcus marinus</i> ^[14]	2003	海底喷烟口	G ⁺ 粉色球菌可耐受 > 20kGy γ 辐射
	<i>Thermococcus radiotolerans</i> ^[14]	2003	海底喷烟口	G ⁺ 粉色球菌可耐受 > 30kGy γ 辐射
	<i>Hymenobacter</i>	<i>Hymenobacter xinjiangensis</i> ^[15]	2007	沙漠土样
	<i>Hymenobacter actinosclerus</i> ^[16]	2000	辐射的猪肉	G ⁻ , 红色短杆菌. 抗 γ 辐射 D ₁₀ > 3 ~ 4.5kGy

综上所述, 大多数耐辐射微生物都是分离自比较恶劣的环境中, 比如: 沙漠、高热、核试验区域等等, 有的是革兰氏阳性菌, 有些革兰氏阴性菌, 有些是杆菌, 有些是球菌, 而且它们中的很多成员都具有红色或者粉红色的色素。在这些耐辐射微生物中, *Deinococcus*, *Thermococcus* 和 *Rubrobacter* 的成员显示了较高水平的辐射抗性, 有些菌株能够耐受高于 30kGy 的 γ 辐射。而其他属的耐辐射微生物, 如 *Acinetobacter radioresistens*, *Hymenobacter actinosclerus*, *Kineococcus radiotolerans*, *Microbacterium radiotolerans*, *Methylobacterium radiotolerans*, 只能抵抗较低剂量的辐射。

2 有关的应用研究

耐辐射微生物大多数都有极强的抗电离辐射, 抗氧化, 抗干旱的生物功能, 随着对这类微生物的研究逐渐深入, 人们越来越关注这类抗逆性很强的微生物应用研究, 研究表明, 这类微生物在环境工程、工业、农业、医药、化妆品等方面的有广泛的应用前景。

2.1 在环境工程方面的应用

2.1.1 污染环境的生物修复 很多耐辐射微生物本身就能对一些污染物进行生物降解, 邻苯二甲酸酯是广泛用于化妆品、香水、增塑剂的一类酞酸酯化合物,

由于广泛使用,该化合物在污水、污泥等环境中都能检测到。很多国家认为该化合物是内分泌干扰物,研究发现 *Deinococcus radiodurans* 可以降解该类化合物^[17],预示着耐辐射微生物在环境治理应用有广阔的前景。

随着对一些耐辐射微生物测序工作的完成,人们对其遗传背景有了更深入的了解。许多研究表明耐辐射微生物的基因组具有非常大的可塑性,可以复制、表达插入其基因组中的外源 DNA 片段,而有的微生物虽然有去除毒性有机污染物的作用,但是对辐射非常敏感,不能用于既存在放射性核素污染,又存在有机污染物的场所。这样,可以将具有多种不同生物修复功能的基因系统引入到耐辐射微生物细胞中,构建的新生物细胞可以安全地应用于辐射污染环境的生物修复。

汞、铬和铅是环境中常见的重金属污染物,人们构建了一系列编码这些金属抗性的基因载体,并且在耐辐射球菌中进行试验。例如,有研究者将大肠杆菌中的编码汞离子还原酶(MerA)^[18]的 merA 基因克隆到耐辐射球菌细胞中,可以将高毒性的、硫醇反应活性的汞离子 Hg(II),还原为毒性较小的、几乎是惰性的挥发性元素汞 Hg(0)。而将肠炎沙门菌亚属编码非特异性酸性磷酸酶(PhoN)基因,导入耐辐射球菌可沉淀重金属,有效处理辐射污染的重金属的污染^[19]。

利用基因重组技术,可以构建具有降解毒性有机污染物的耐辐射球菌菌株,例如,将假单胞菌的甲苯双加氧酶基因(TDO)可以在耐辐射球菌细胞中有效地表达。在慢性辐照下,这些菌株可以降解氧化甲苯、氯代苯以及 3,4-二氯-1-丁烯^[19]。另外也可以通过功能基因组学和基因工程操作技术,将耐辐射球菌的一系列遗传操作技术移用于该属其他菌株改变基因表达,例如耐辐射球菌最适生长温度是 50℃,将耐辐射球菌的一系列遗传操作技术移用于 *Deinococcus geothermalis*,可以使这个嗜热菌在地下泄漏池等温度较高的辐射环境发挥生物修复功能^[20]。耐辐射微生物 *Deinococcus indicus* 除了抗辐射外,还有较强的抗砷能力。据报道,世界各地的地面水均不同程度地受到了砷污染,可以利用其处理被污染的水源。

一些耐辐射微生物的产物因为其特殊性质也可用于其他污染环境的生物治理。原油污染成为日益受到重视的环境问题,能够在原油污染的环境生长、繁殖且具有降解碳氢化合物作用的微生物,在该污染环境的生物治理上有重要作用,但是原油中的一些成分因溶解度低所以造成生物利用率非常低,严重影响了生物治理的效率。1995年,Navon-Venezia 等^[21]在研究中发现耐辐射不动杆菌(*Acinetobacter radioresistens* KA53)

富集培养时会产生一种分泌于胞外的乳化剂 Alasan,它可以稳定多种水包油乳状液,包括 10 碳或 10 碳以上的烷烃,研究发现该乳化剂可以增加多环芳香烃的溶解性和生物降解率。在出现 500mg·L⁻¹的 Alasan 时菲类、蒽、芘的溶解度分别增加了 6.6、25.7 和 19.8 倍^[22]。将该菌和降解碳氢化合物的微生物一起培养,可以利用 *Acinetobacter radioresistens* KA53 产生的乳化剂 Alasan 增加疏水或不溶解的物质的表面积,从而增加它的生物利用率,达到增加降解碳氢化合物细菌生长和生物治理的效率的目的^[23]。

2.1.2 污染环境的监测 利用耐辐射微生物对于高辐射环境的耐受性,可以将其改造为可以监测辐射环境的生物传感器,用于检测辐射环境污染的情况。

浙江大学的范陆通过对耐辐射球菌(*Deinococcus radiodurans* R1)的遗传改造,构建了一个实时全细胞生物传感器,该系统以可受 DNA 损伤诱导调控的关键基因——*recA* 基因的启动子作感受因子,以加强型绿色荧光蛋白(eGFP)作报告因子,利用大肠杆菌与耐辐射球菌的穿梭质粒作载体,导入到宿主菌耐辐射球菌获得生物传感器菌株 DRG300。该菌株可以在 *recA* 基因启动子的引发下表达 eGFP 蛋白,从而在 488nm 紫外线激发下发出绿色荧光。根据耐辐射球菌活细胞中荧光强度和 eGFP 蛋白表达量之间的相关性,发现在 DRG300 菌株中荧光强度同 DNA 损伤因子,比如 γ 射线和丝裂霉素 C(MMC)之间,在一定范围之内存在很显著的剂量正相关性,可以用这个菌株来检测高放射性环境中的放射性物质和遗传毒物^[24]。

2.2 在医学方面应用

2.2.1 抗氧化药物的开发 众所周知,耐辐射微生物有很强的抗氧化系统,因此能免受活性氧介导的损伤。目前已经在耐辐射球菌里鉴定出了各种抗氧化酶,例如 Mn 或 Fe 的超氧歧化酶、Cu/Zn 超氧歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶等等。Daly^[25]研究表明非酶类的 Mn(II)的复合物在耐辐射球菌的抗氧化过程中,起着关键作用,这也意味着小分子抗氧化剂在辐射抗性中的重要作用。这一发现不仅为揭示辐射抗性机理带来了新的曙光,而且也意味着从辐射菌中提取物质进行抗氧化药物将成为可能。

2.2.2 疫苗的开发应用 在呼吸道合胞体病毒(respiratory syncytial virus, RSV)疫苗的研制中,发现从耐辐射球菌中提取的多种磷脂糖脂中,有些具有免疫原性,以此作为疫苗的脂质体载体可以增强疫苗的免疫效果^[26]。

2.2.3 保健品的开发 耐辐射微生物的抗辐射产物还可用于肿瘤治疗中病人的保健及健康细胞的保护。

这些研究表明耐辐射微生物在医学方面有广泛的应用前景,对于其应用研究具有重大意义。

2.3 在农业方面的应用前景

中国每年有 3133 万 hm^2 农田受旱灾威胁,受灾农田中大约有 533 万 hm^2 盐渍化土地。几乎所有的农作物均为盐敏感植物,在渍化土壤中生长极差。而通过比较基因组学研究,我们发现辐射微生物中的一些基具有抗旱、抗盐等抗逆作用,如耐辐射球菌中的 *irrE* (*pprI*) 基因,为一全局调控基因,将其转入油菜可以提高油菜对盐和干旱的耐受性^[27]。

这一研究表明,若是将这些抗逆基因转移到农作物中,将会培育出具有抗辐射、抗旱、抗盐等特性的农作物,使这些转基因作物能够忍受更长时间的干旱胁迫和盐胁迫,在未来有极大的应用前景。

2.4 在其他领域的应用前景

抗辐射微生物还具有抗紫外线辐射的功能,将其抗紫外的产物提取出来可以用于防晒化妆品的开发及航空航天领域宇航服防辐射。此外它的一些蛋白因为特殊的结构还有其他方面的应用,如耐辐射球菌表面的 S 蛋白因为性质稳定,排列有序可用于电化学制造业中表面金属和氧化物纳米阵列的制造^[28]。

本文分别从耐辐射细菌的资源和应用等方面对耐辐射细菌的研究进行了一个综述。耐辐射微生物的研究在很多领域都非常有意义。尽管与该类微生物应用的许多研究未转化成为成型的工业生物技术,但不可否定它具有广阔的应用前景。随着分子生物学、基因工程学的深入开展及其各学科的交叉应用研究,耐辐射微生物将在更广泛的领域造福于人类。

参考文献:

- [1] Choppin G, Rydberg J, Liljenzin J O , Radiochemistry and nuclear chemistry, 2001 , Butterworth - Heinemann:481
- [2] Rew D A. Deinococcus radiodurans[J]. European Journal of Surgical Oncology,2003,29(6):557-558
- [3] Suzuki K , Collins M D , Iijima E , Komagata K. Chemotaxonomic characterization of a radiotolerant bacterium, *Arthrobacter radiotolerans*; Description of *Rubrobacter radiotolerans* gen. nov. , comb. nov.[J]. FEMS Microbiology Letter,1988,52(1-2):33-39
- [4] Carreto L , Moore E , Nobre M , Wait R , Riley P , Sharp R , DA COSTA M. *Rubrobacter xylanophilus* sp. nov. , a new thermophilic species isolated from a thermally polluted effluent[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,1996,46(2):460
- [5] Chen M Y , Wu S H , Lin G H , Lu C P , Lin Y T , Chang W C , Tsay S. S. *Rubrobacter taiwanensis* sp. nov. , a novel thermophilic, radiation - resistant species isolated from hot springs [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. ,2004,54(5):1849-1855
- [6] Phillips R W , Wiegel J , Berry C J , Fliermans C. , Peacock A. D. , White D. C. , Shimkets L. J. *Kineococcus radiotolerans* sp. nov. , a radiation - resistant, gram - positive bacterium [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2002,52(3):933-938
- [7] Yazdani M , Naderi - Manesh H , Khajeh K , Soudi M R , Asghari S M , Sharifzadeh M. Isolation and characterization of a novel gamma - radiation - resistant bacterium from hot spring in Iran [J] . Journal of Basic Microbiology,2009,49(1):119-127
- [8] Ito H , Iizuka H. Taxonomic studies on a radio - resistant *Pseudomonas* [J] . Agricultural and Biological Chemistry, 1971,35(10):1566-1571
- [9] Albuquerque L , Simoes C , Nobre M F , Pino N M , Battista J R , Silva M T , Rainey FA , da Costa M S. *Truepera radiovictrix* gen. nov. , sp. nov. , a new radiation resistant species and the proposal of *Trueperaceae* fam. nov [J] . FEMS Microbiology Letter, 2005, 247(2):161-169
- [10] Zhang W , Zhu H H. , Yuan M , Yao Q , Tang R , Lin M , Yang SZ , Li Z K , Chen M. *Microbacterium radiodurans* sp. nov. , a ultraviolet radiation - resistant bacterium isolated from radiation - polluted soil in China [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2010,60(11):2665-2670
- [11] Liu M , Liu Y , Wang Y , Luo X , Dai J , Fang C. *Lysobacter xinjiangensis* sp. nov. , a moderately thermotolerant and alkalitolerant bacterium isolated from gamma - irradiated sand soil sample [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2011, 61(2):433-437
- [12] Mao J , Tang Q , Zhang Z , Wang W , Wei D , Huang Y , Liu Z , Shi Y. , Goodfellow M. *Streptomyces radiopugnans* sp. nov. , a radiation-resistant actinomycete isolated from radiation - polluted soil in China [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2007,57(Pt 11):2578-2582
- [13] Jolivet E , L'Haridon S , Corre E , Forterre P , Prieur D. *Thermococcus gammatolerans* sp. nov. , a hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent that resists ionizing radiation [J] . International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology,2003,53(3):847-851
- [14] Jolivet E , Corre E , L'Haridon S , Forterre P , Prieur D. *Thermococcus marinus* sp. nov. and *Thermococcus radiotolerans* sp. nov. , two hyperthermophilic archaea from deep - sea hydrothermal vents that resist ionizing radiation [J] . Extremophiles,2004,8(3):219-227
- [15] Zhang Q , Liu C , Tang Y , Zhou G , Shen P , Fang C , Yokota A. *Hymenobacter xinjiangensis* sp. nov. , a radiation - resistant bacterium isolated from the desert of Xinjiang, China [J] International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2007,57(8):1752-1756

- [16] Collins M D, Hutson R A, Grant I R, Patterson M F. Phylogenetic characterization of a novel radiation - resistant bacterium from irradiated pork: description of *Hymenobacter actinosclerulus* sp. nov [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2000, 50 (2) : 731 - 734
- [17] Liao C S, Chen LC, Chen B S, Lin S. H. Bioremediation of endocrine disruptor di - n - butyl phthalate ester by *Deinococcus radiodurans* and *Pseudomonas stutzeri* [J]. *Chemosphere*, 2010, 78 (3) : 342 - 346
- [18] Appukuttan D, Rao A S, Apte S. K. Engineering of *Deinococcus radiodurans* R1 for bioprecipitation of uranium from dilute nuclear waste [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 2006, 72 (12) : 7873 - 7878
- [19] Lange C C, Wackett LP, Minton KW, Daly M J. Engineering a recombinant *Deinococcus radiodurans* for organopollutant degradation in radioactive mixed waste environments [J]. *Nature Biotechnology*, 1998, 16 (10) : 929 - 933
- [20] Brim H, Venkateswaran A, Kostandarithes H M, Fredrickson J K, Daly M. J. Engineering *Deinococcus geothermalis* for bioremediation of high - temperature radioactive waste environments [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 2003, 69 (8) : 4575 - 4582
- [21] Navon - Venezia S, Zosim Z, Gottlieb A, Legmann R, Carmeli S, Ron E, Rosenberg E. Alasan, a new bioemulsifier from *Acinetobacter radioresistens* [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1995, 61 (9) : 3240
- [22] Barkay T, Navon - Venezia S, Ron E, Rosenberg E. Enhancement of solubilization and biodegradation of polyaromatic hydrocarbons by the bioemulsifier alasan [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1999, 65 (6) : 2697
- [23] Toren A, Orr E, Paitan Y, Ron E, Rosenberg E. The active component of the bioemulsifier alasan from *Acinetobacter radioresistens* KA53 is an OmpA - like protein [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2002, 184 (1) : 165
- [24] 范陆. 基于耐辐射球菌的生物传感器的构建以及耐辐射球菌 *draSNF2* 基因的研究 [D] 杭州: 浙江大学. 2008
- [25] Daly M. J. The emerging impact of genomics on the development of biological weapons. Threats and benefits posed by engineered extremophiles [J]. *Clinics in Laboratory Medicine*, 2001, 21 (3) : 619 - 629
- [26] Huang Y, Anderson R. Enhanced immune protection by a liposome - encapsulated recombinant respiratory syncytial virus (RSV) vaccine using immunogenic lipids from *Deinococcus radiodurans* [J]. *Vaccine*, 2002, 20 (11 - 12) : 1586 - 1592
- [27] Pan J, Wang J, Zhou Z, Yan Y, Zhang W, Lu W, Ping S, Dai Q, Yuan M, Feng B, Hou X, Zhang Y, Ma R, Liu T, Feng L, Wang L., Chen M, Lin M. IrrE, a global regulator of extreme radiation resistance in *Deinococcus radiodurans*, enhances salt tolerance in *Escherichia coli* and *Brassica napus* [J]. *PLoS ONE*, 2009, 4 (2) : e4422
- [28] Presenda A, Allred D B, Baneyx F, Schwartz D T, Sarikaya M. Stability of S - layer proteins for electrochemical nanofabrication [J]. *Colloids and Surfaces Biointerfaces*, 2007, 57 (2) : 256 - 261