

同位素热源热冲击入水试验方法

王易君¹, 胡宇鹏¹, 鲁亮¹, 向延华¹, 张怡晨¹, 朱长春¹, 唐显², 胡绍全¹

(1.中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2.中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: **目的** 针对空间同位素热源异常事故场景入水过程的热冲击安全性问题, 研究热冲击入水试验方法。**方法** 通过对同位素热源入水事故场景分析, 基于热边界等效、热量等效原则, 研究空间同位素热源热冲击入水的试验条件和方法, 明确试验样品的加载温度、人工海水体积、浓度、温度以及试验转移时间等, 提出热冲击入水试验流程和试验装置要求。**结果** 样品的加载温度为空间同位素热源的运行温度, 人工海水需要完全淹没样品, 且体积在样品的20倍以上, 人工海水的温度以10~30℃为宜, 热冲击入水试验样品转移时间小于1 min。**结论** 建立的热冲击入水方法可对同位素热源的安全性评估提供支撑, 也可供其他产品的热冲击入水评估提供参考。

关键词: 深空探测; 同位素热源; 核安全; 热冲击; 温度冲击; 入水; 试验方法

中图分类号: TL76

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0049-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.008

Analyszs and Design the Thermal Shock Test of Radioisotope Heater Unit

WANG Yi-jun¹, HU Yu-peng¹, LU Liang¹, XIANG Yan-hua¹, ZHANG Yi-chen¹,
ZHU Chang-chun¹, TANG Xian², HU Shao-quan¹

(1.Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2.China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

ABSTRACT: The purpose is to investigate the safety of Radioisotope Heater Unit (RHU) when it fall into the sea and to study the methods of thermal shock test. First, some space application accidents is conducted. Then, the condition and the methods of thermal shock test are analyzed by the principle of thermal boundary equivalent and thermal equivalent. The condition of thermal shock test include the heating temperature, the volumes and the temperature of sea water, the transfer time ans so on. Finally, the test procedures is discussed. The thermal shock test conditions are identified: the heating temperature of the sample is (1100±10) °C, the temperature of the artificial seawater is 10~30 °C, and the volumes of artificial seawater is more than 20 times

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-11

Received: 2021-03-29; Revised: 2021-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51706213); 民用航天技术预先研究项目(D020216)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51706213); Civil Space Technology Pre-research Project of China Project(D020216)

作者简介: 王易君(1986—), 女, 工程师, 主要研究方向为装备环境试验技术。

Biography: WANG Yi-jun(1986—), Female, Engineer, Research focus: environmental testing technology of equipment.

通讯作者: 胡宇鹏(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为武器热安全、装备环境工程。

Corresponding author: HU Yu-peng(1987—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: thermal safety of weapons and equipment environmental engineering.

引文格式: 王易君, 胡宇鹏, 鲁亮, 等. 同位素热源热冲击入水试验方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 049-054.

WANG Yi-jun, HU Yu-peng, LU Liang, et al. Analyszs and design the thermal shock test of radioisotope heater unit[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 049-054.

compared to the sample, the transfer time of the sample through the heating furnace to the artificial seawater is less than 1 min. The technology of the thermal shock test for RHU is developed to provide the techniques support for risk assessment of RHU.

KEY WORDS: deep space exploration; radioisotope heater unit (RHU); nuclear safety; thermal shock; temperature shock; water entry; test method

同位素热源系统是深空探测领域最重要的能源来源,发展此类研究工作,对我国空间探测研究具有重要意义^[1-3]。为保证应用于深空探测的核电源系统在储存、运输、正常使用及异常环境下的功能性及安全性,采用大量地面模拟环境试验进行考核。美国、俄罗斯已开展了大量地面环境试验研究,并制定了严格的安全条件测试项目^[4-5],针对空间核动力源在事故下再入大气层及高速撞击海面的事故场景,开展了系列试验^[6-7]。近年来,我国在同位素热源环境试验技术方面亦开展了相关工作^[8-10]。

热冲击入水试验是在地面模拟热源坠落至大海事故场景的一项安全性试验,目的是考核热源在高温条件下,经热冲击作用后,金属包壳保持完整、不泄漏放射性物质到环境中的能力。文中介绍了同位素热源热冲击试验技术的相关内容,并结合空间同位素热源再入后撞击水面的安全性要求,讨论了热冲击试验方法等内容,可为空间同位素热源以及空间核动力源热冲击入水安全性试验提供参考。

1 热冲击入水安全性

1.1 事故场景分析

1968年美国 Nimbus B-1 卫星发射时,因火箭发生故障,实施遥控自毁,在 30.48 km 上空爆炸,卫星上携带的 SNAP-19B2 的同位素电源 RTG 坠入 180 m 海底,结构完好无泄漏。1970 年阿波罗飞船发生爆炸,飞船再入大气层时, RHU/RTG 坠入 9000 m 深的太平洋底,监测无核泄漏。1996 年火星-96 探测器升空后爆炸,探测器残骸及 RTG 坠入太平洋^[11]。1983 年 2 月宇宙-1402 卫星(携带 45 kg 浓缩铀的核反应堆)失控坠入大西洋南部海域。1978 年,宇宙-954 卫星重返大气层时,再入解体过程中,释放了大量放射性碎片。2005 年 CryoSat 卫星发射,由于火箭故障,卫星未能进入预定轨道,火箭发射失败后,卫星坠入大海。2010 年俄罗斯发射 Glonass 导航卫星,由于火箭问题发射失败,导致卫星未能进入预定轨道,坠入太平洋海岸。2013 年 Zenit 3SL 火箭发射故障,导致其搭载的 Intelsat 27 通信卫星坠入距发射平台不远的太平洋里。在发射阶段,因火箭发射故障导致搭载的空间核动力源坠入大海的可能性较大,而再入阶段后也可能出现核动力源坠入海洋的情况。

空间同位素热源的设计、地面测试、地面试验、地面运输、发射、在轨运行等寿命周期内的活动所涉

及的安全性,均属于空间核安全的范围。针对核动力源在空间使用的安全性,美国、俄罗斯提出了空间核动力源安全性设计要求,即要求在任何事故下,核设计和结构在一切意外情况下无破损和放射性泄漏,并据此开展了核动力源安全性设计、分析和评价工作^[7]。针对放射性同位素热源、电源以及核反应堆等,制定了严格的安全认证条件,要求开展在固体推进剂火灾、再入大气高温、撞击(钢板、沙地、水面、土地、碎片等)以及在海水浸泡等安全性测试项目。针对发射和再入事故中的冲击和碰撞,开展了同位素热源高温冲击复合试验、高温高速撞击钢靶试验以及高温高速撞击数值模拟分析^[10,12],为开展同位素热源安全性能评价提供了支撑。

1.2 同位素热源

放射性同位素热源(Radioisotope Heater Unit, 简称 RHU)利用温差电材料的塞贝克效应,不断获得放射性同位素衰变释放的热能。采用 RHU、热电转换器和辐射散热器组成的同位素电源(Radioisotope Thermoelectric Generator, 简称 RTG)则能够同时输出电能和热能,是进行深空探测和执行空间任务不可替代的重要能源^[13]。同位素热源主要采用热源源芯加包壳的结构形式,源芯采用 $^{238}\text{PuO}_2$ 陶瓷芯块,包壳为多层包覆结构,由内至外依次为结构层、内密封层、隔热层和烧蚀层,起到防护和密封等作用。结构层为芯块的直接包覆层,是防止放射性泄漏的最后一道屏障。

1.3 载荷分析

同位素热源撞击水面时,除了承受水面流体对产品的撞击载荷之外,由于热源温度明显高于海水,热源会经历剧烈的温度冲击,因此其结构完整性经受撞击应力和温度冲击应力双重考验。由于高速撞击地面的应力载荷显著大于撞击水面的应力载荷,通过应力解耦,热源在撞击作用下的结构变形以及破坏效应通过撞击障碍物进行考核。热源撞击水面的载荷条件,更主要地从温度应力角度去考核热源的结构完整性和密封性能,可以参照温度冲击试验及其标准进行载荷分析,重点分析温度冲击的极值温度、冲击次数、介质类型、转换时间等。

温度冲击试验用于考核产品对周围环境急剧变化的适应性,其中 GJB 150.5A 对温度上限和下限可根据面临的最严酷的环境温度和预期情况进行剪裁,但其介质仅限于空气^[14]。GB/T 2423.22 中 Nc 试验使

用的介质可以为液体,具体的介质取决于实际遇到的介质类型^[15]。同时温度冲击试验也是考核放射源结构的最重要指标之一^[16]。参照上述标准,热源热冲击试验采用空气、水 2 种介质,试验件位于介质内的极值温度根据其事故场景中遭遇的温度进行确定。温度冲击的次数由暴露在冲击环境(由空气中高温到水中常温)中的次数进行规定,。试验的转换时间应符合真实场景,在地面环境试验进行模拟时,需要结合实施可行性进行剪裁。

1.4 热冲击试验条件

由于同位素热源真实样品具有放射性,在鉴定试验中,选择具有相同结构、材料、密封工艺的非放射性结构模拟件作为试验样品。为了使模拟试件具有与真实产品同样的热边界条件,在地面鉴定环境试验中,需要对模拟试件进行适当的热加载。²³⁸PuO₂ 燃料形式的同位素热源的运行温度大多在 1090 °C 左右,模拟试验件的加载温度不应低于运行温度,且温度允差控制在±10 °C 以内。模拟试验件由常温进行加热,其加热升温速率应远低于入水冲击过程中的温度变化速率。

由于非放射性的模拟试验件本身不会像真实产品那样具有热源,在入水转移过程中,因向环境辐射及空气对流,易被冷却至目标温度以下。为了降低在转移过程中的温度变化,采取 2 种方式:1)适当提高热加载温度,使得模拟试验件入水时温度与真实产品的热边界条件相同;2)严格控制入水转移时间,降低转移过程中的热量损失。前者加载温度超过运行温度,可能出现过考核情况;后者通过数值仿真,要使模拟试件结构层温度边界与真实件保持热边界条件一致,热冲击入水转移时间不能超过 2 min^[17]。在转移最初的 1 min 内,模拟试验件最外层的温度迅速下降,表面降温速率最高可达 500 °C/min,因此转移时间需要小于 1 min。

海洋面积占地球表面 90% 以上,各地区海洋成

分、温度各不相同。海水中主要成分包括 NaCl、MgCl₂、Na₂SO₃、CaCl₂ 等,天然海水的含盐量为 3.5% 左右^[18]。因此人工海水使用淡水溶解矿物盐制成,其中盐的质量分数为 3.5%。为保证试验件入水后完全被浸没,与人工海水实现充分的热交换,且使得试验件入水后升温在 15 °C 以内,根据热量估算,人工海水质量应至少为试验件的 20 倍。尽管海水温度与地区、月份、水深以及大气环境等相关,参照相关资料^[19-20],海水温度范围设置为 10~30 °C。当海水温度不能满足条件时,需如实记录温度后,进行热冲击试验。

将同位素热源置于加热炉中,以低于 100 °C/min 的速率将热源模拟件加热到运行温度后,至少保持 30 min,使热源试验件温度稳定。然后在 1 min 内,将试验件浸入温度为 10~30 °C 的人工海水中。

2 热冲击入水试验方法

2.1 试验设备和仪器

同位素热源热冲击入水试验装置主要由高温实验炉、人工海水槽、温度测试系统、同位素热源模拟试件以及计时器等组成。其中高温实验炉温度范围需覆盖试热加载温度;人工海水槽的高度必须大于试验件的柱高,以满足模拟试件全部被水淹没的要求;水槽内容积须大于 20 倍模拟试件的体积,以实现水量不小于 20 倍试件的要求;测温系统由 K 型热电偶和数据采集器组成,热电偶布置在水槽内进行水温测试;计时器用于记录试验件由高温实验炉转移至人工海水槽中的时间。主要仪器设备见表 1。

2.2 试验流程

热冲击入水试验流程如图 1 所示。

1)将水槽内装入不少于试验件质量 20 倍的去离子水,按质量分数为 3.5% 加入海盐后,搅拌至海盐溶化。

表 1 主要仪器设备及其主要指标

Tab.1 Main equipment and instruments and their indicators

序号	名称	型号	主要技术指标
1	高温箱式实验炉	SX2-12-16A	内空间: 200 mm×160 mm×400 mm 温度范围: 室温~+1650 °C 温度偏差: ±10 °C 测量通道: 20
2	FLUKE 数据采集器	2640A	温度测量范围: 0~1450 °C 测量误差: ±1.5 °C或±0.01 t
3	热电偶 ^注	K 型	误差: ±1 °C
4	远控计算机	K42A/T8100	—
5	运动秒表	JS-506	测量精度: 0.01 s (30 min 内)
6	水槽	—	容积: φ450 mm×420 mm (66.7 L)

2) 水槽中布置 1 支 K 型热电偶后, 连接温度测量系统, 设置采样频率为 1 Hz。

3) 将试验件置于高温实验炉内, 逐步提升到 1100 °C。

4) 保持 30 min, 使试验件温度稳定。

5) 启动水槽内温度测试系统, 打开实验炉, 将试验件取出后, 放入人工海水槽。

6) 通过温度监测水槽内温度稳定后, 取出试验件。

7) 待试验件冷却后, 对试验件进行外观、尺寸、密封性检查和检测。

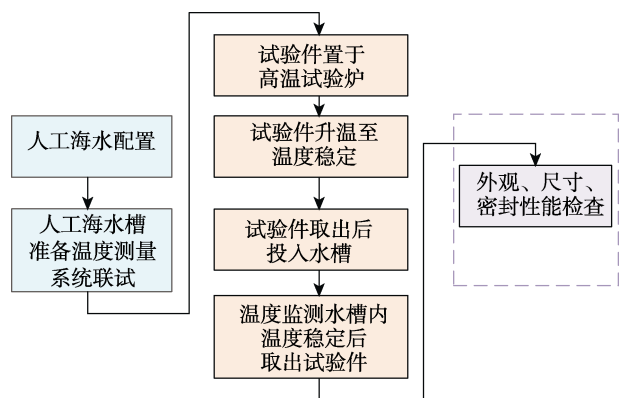


图 1 热冲击入水试验流程
Fig.1 Process of the thermal shock test

2.3 热冲击入水试验方法验证

采用非放射性的模拟源芯和多层结构作为试验件, 模拟热源外形、结构、质量。试验具体条件: 试验件在高温试验炉内平均升温速率约为 20 °C/min, 热加载温度为(1100±10)°C, 水槽人工海水体积为 52.5 L, 现场环境温度为 7.5~9.7 °C。由于试验件体积质量较小, 采用夹持的方式取放转移试验件, 操作过程如图 2 所示。

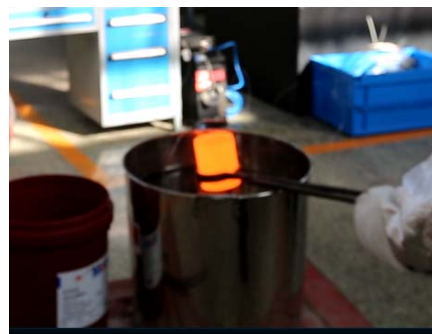
热冲击试验高温实验炉恒温阶段控制曲线如图 3 所示, 实验炉内温度波动在允差范围内。打开实验炉取出试件时, 炉温明显下降, 转移时间约为 30 s, 满足转移时间小于 1 min 的要求。试件入水后, 热电偶和试件距离约 90 mm, 所测水温的曲线如图 4 所示。减小在转移过程中的热损失, 可使试验件表面温度在入水前保持较高温度。为了更接近真实场景, 减小水槽内温度变化, 人工海水体积可以进一步增加。

3 结语

针对放射性同位素热源入水安全性问题, 分析了同位素热源坠入大海的事故场景以及同位素热源热冲击温度应力载荷条件。建立了热冲击入水试验方法, 利用试验设备和仪器开展了方法验证, 可为评估



a 试验件取出



b 试验件投入水槽

图 2 热冲击入水试验过程

Fig.2 Procedure of the thermal shock test: a) take out the test piece; b) put the test piece into the water tank

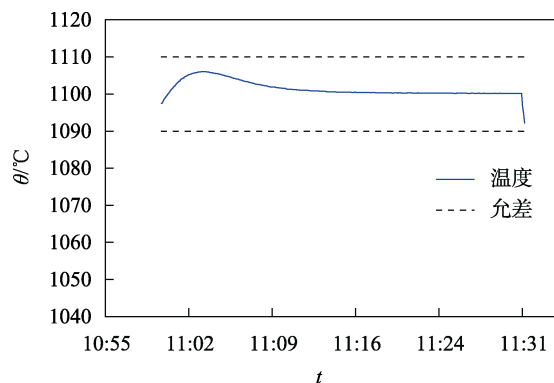


图 3 高温实验炉恒温阶段加载温度曲线

Fig. 3 Temperature curve of constant temperature stage in high temperature furnace

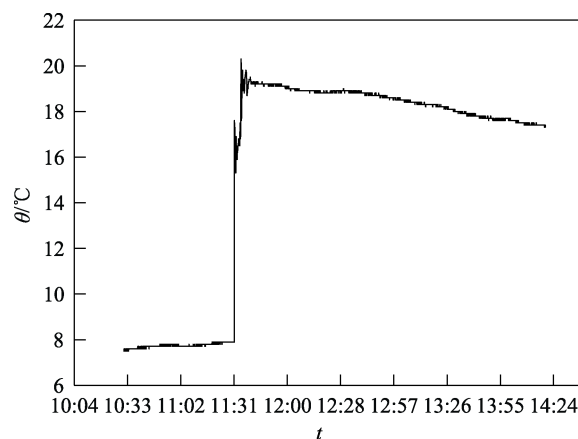


图 4 水槽内温度曲线

Fig. 4 Temperature curve in artificial seawater tank

同位素热源在坠入海水后面临的结构完整性风险以及核泄漏风险提供支撑。

参考文献:

- [1] 强文义, 赵广播. 关于我国发展空间核电源的建议[C]//中国核学会 2004 年学术会议论文集. 北京: 中国核学会, 2004.
QIAN Wen-yi, ZHAO Guang-bo. Suggestions on developing space nuclear power supply in China[C]// Proceeding of China Nuclear Society 2004 annual conference. Beijing: China Nuclear Society, 2004.
- [2] 郑文波, 黄志勇, 吴知非, 等. 放射性同位素热源与空间反应堆在深空探测领域的应用[C]// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第一届学术会议论文集. 哈尔滨: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2005: 324-329.
ZHENG Wen-bo, HUANG Zhi-yong, WU Zhi-fei, et al. Application of RHU and space reactor in deep space exploration[C]// Proceeding of the 1st academic conference on committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics. Harbin: Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics, 2005: 324-329.
- [3] 朱安文. 空间核电源技术的发展[C]// 新观点新学说学术沙龙文集 49. 北京: 中国科学技术协会学会学术部, 2010.
ZHU An-wen. Development of space nuclear power supply technology[C]// The 49th academic salon of new viewpoint and new theories. Beijing: Academic Department of Chinese Association of Science and Technology, 2010.
- [4] GRIGSBY C O. Comparison of general purpose heat source testing with the ANSI N43. 6-1997 (R1989) sealed source standard[M]. New Mexico: Los Alamos National Lab, 1998: 1-95.
- [5] CHANG Ya-le. Aerospace Nuclear Safety at APL: 1977-2006[J]. Johns hopkins APL technical digest, 2007, 27(3): 253-260.
- [6] REIMUS M A H, RINEHART G H, HERRERA A, et al. Light-weight radioisotope heater impact tests[R]. Albuquerque: Institute for Space and Nuclear Power Studies, 1998.
- [7] 周继时, 朱安文, 耿言. 空间核能源应用的安全性设计、分析和评价[J]. 深空探测学报, 2015, 2(4): 303-312.
ZHOU Ji-shi, ZHU An-wen, GENG Yan. Safety design, analysis and estimation for the use of nuclear power source in outer space[J]. Journal of deep space exploration, 2015, 2(4): 303-312.
- [8] 胡宇鹏, 鲁亮, 向延华, 等. 深空探测器同位素热源环境试验技术[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 138-141.
HU Yu-peng, LU Liang, XIANG Yan-hua, et al. Environment testing technology of radioisotope heat source for deep space exploration[J]. Journal of deep space exploration, 2017, 4(2): 138-141.
- [9] 胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 453-462.
HU Wen-jun, CHEN Hong-yong, CHEN Jun-hong, et al. Advances of safety research on nuclear space power sources[J]. Journal of deep space exploration, 2017, 4(5): 453-462.
- [10] 鲁亮, 胡宇鹏, 欧阳智江, 等. 同位素热源高温-冲击复合环境试验[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 466-470.
LU Liang, HU Yu-peng, OU YANG Zhi-jiang, et al. High temperature-impact composite environmental test on radioisotope heat source[J]. Journal of deep space exploration, 2017, 4(5): 466-470.
- [11] 吴伟仁, 王倩, 任保国, 等. 放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用[J]. 航天器工程, 2013, 2(2): 1-6.
WU Wei-ren, WANG Qian, REN Bao-guo, et al. Application of RHU/RTG in space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(2): 1-6.
- [12] 武伟名, 罗洪义, 李鑫, 等. 同位素热源高速撞击数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(1): 140-148.
WU Wei-ming, LUO Hong-yi, LI Xin, et al. Research on numerical simulation of radioisotope heat unit in high-speed impact[J]. Atomic energy science and technology, 2020, 54(1): 140-148.
- [13] 侯欣宾, 王立. 美国空间同位素能源装置发展现状[J]. 航天器工程, 2007, 16(2): 41-49.
HOU Xin-bin, WANG Li. Introduction of US space radioisotope power systems[J]. Spacecraft engineering, 2007, 16(2): 41-49.
- [14] GJB 150. 5A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第 5 部分: 温度冲击试验[S].
GJB 150. 5 A—2009, Military equipment Laboratory environmental test methods Part 5: Temperature shock test[S].
- [15] GB/T 2423. 22—2016, 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 N: 温度变化[S].
GB/T 2423. 22—2016, Environmental testing for electrical and electronic products Part 2: Test methods Test N: Temperature change[S].
- [16] GB 4075—2009, 密封放射源一般要求和分级[S].
GB 4075—2009, General requirements and classification of sealed radioactive sources[S].
- [17] 王易君, 胡宇鹏, 向延华, 等. 同位素热源热冲击试验及传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(12): 2789-2793.
WANG Yi-jun, HU Yu-peng, XIANG Yan-hua, et al. Study on thermal shock test of radioisotope heater unit

- and the heat transfer characteristics[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2018, 39(12): 2789-2793
- [18] 徐国葆. 我国沿海大气中盐雾含量与分布[J]. *环境技术*, 1994(3): 1-7.
- XU Guo-bao. Concentraion and distribution of salt fog in the coastal air of China[J]. *Environmental technology*, 1994(3): 1-7
- [19] 郭伟奇, 沙伟, 韦应新, 等. 东海沿岸海水表层温度的变化特征及变化趋势[J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 2-8.
- GUO Wei-qi, SHA Wei, WEI Ying-xin, et al. Characteristics and tend of SST variation in the coastal region of the east China sea[J]. *Acta oceanologica sinica*, 2005, 27(5): 2-8.
- [20] KHALIL L, ATKINSON P M, CHALLENOR P. Looking back and looking forwards: Historical and future trends in sea surface temperature(SST) in the Indo-Pacific region from 1982—2100[J]. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2016, 45(5): 14-26.