



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.020

张宝森, 张防修, 刘滋洋, 等. 黄河河道冰层雷达波特征图谱的现场实验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 121-125. ZHANG Bao sen, ZHANG Fang xiu, LIU Zi yang, et al. Field experimental study of the characteristics of GPR images of Yellow River ice[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 121-125. (in Chinese)

# 黄河河道冰层雷达波特征图谱的现场实验研究

张宝森<sup>1</sup>, 张防修<sup>1</sup>, 刘滋洋<sup>2</sup>, 韩红卫<sup>3</sup>, 李志军<sup>3</sup>

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 郑州甄臻勘探技术有限公司, 郑州 450003;  
3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 2013年-2014年冬季, 利用RIS K2型探地雷达在内蒙古头道拐水文站黄河河道断面开展冰层厚度探测试验。试验使用不同频率天线探测冰厚, 并与钻孔实测冰厚对比。结果显示200 MHz频率天线可探测到冰下更深部位的状况, 并能够识别出冰花层。利用雷达探测图谱中电磁波传播时间和实测冰厚得到盛冰期雷达电磁波在冰内的实际传播速度为16.3 cm/ns; 而融化期雷达电磁波在冰内的实际传播速度小于15.0 cm/ns。雷达探测结果还显示垂直于河道断面方向的冰层厚度分布不均匀。主流区是以热力学生长的颗粒冰和柱状冰为主, 最大冰厚约为60 cm; 而非主流区是以冰花冰为主, 最大冰厚约为70 cm。另外, 雷达图谱也可以确定冰层裂缝的具体位置、走向。

**关键词:** 冰层; 探地雷达; 雷达图谱; 实验分析; 黄河

**中图分类号:** TV 698.2; TN 959.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0121-05

## Field experimental study of the characteristics of GPR images of Yellow River ice

ZHANG Bao sen<sup>1</sup>, ZHANG Fang xiu<sup>1</sup>, LIU Zi yang<sup>2</sup>, HAN Hong wei<sup>3</sup>, LI Zhi jun<sup>3</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. Zhenzhen Exploration Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Radar measurement experiments were performed with a RIS K2 at the Toudaoguai Hydrological Station section in the winter of 2013-2014. The experiments detected ice thickness using radar with different frequency antenna and compared the detected thickness with measured thickness by drilling. The results showed the 200-MHz antenna can detect deeper depth below river ice and identify the frazil ice layer. The radar transmission speed in ice was determined based on the propagation time of radar electromagnetic wave and measured ice thickness. The radar transmission speed was about 16.3 cm/ns in the freezing period and less than 15.0 cm/ns in melting period. The GPR images showed that the thickness of the ice layer was not uniform along the section perpendicular to the course of river. In the main flow area between Pile No. 400 and No. 520, the maximum ice thickness was about 60 cm and the ice was mainly made up of granular ice and columnar ice created by thermodynamic growth. In the non-main flow area between Pile No. 520 and No. 740, the maximum ice thickness was about 70 cm and the ice was mainly made up of frazil ice. In addition, The GPR images can be used to locate the position and direction of the ice cracks in ice layer.

**Key words:** ice layer; ground penetrating radar (GPR); radar images; experimental analysis; Yellow River

收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-09-22 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0931.012.html>

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953901); 国家自然科学基金项目(51409112; 51579028; 51509099); 基本科研业务费项目(HKY-JBYW-2016-34)

**Fund:** Global Change Research Programme of China (2015CB953901); National Natural Science Foundation of China (51409112; 51579028; 51509099); Fundamental Research Funds(HKY-JBYW-2016-34)

作者简介: 张宝森(1965-), 男, 河南洛阳人, 高级工程师, 主要从事防汛减灾及冰凌预报研究。E-mail: zbsnzz@163.com

通讯作者: 李志军(1960-), 男, 河北崇礼人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事冰物理和力学性质研究。E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn

我国东北、西北及青藏高原地区的冬季均存在河流湖泊结冰现象。河湖冰的存在对其包围的结构物构成威胁,如河中流冰对桥墩的撞击<sup>[1]</sup>,融冰期湖冰热膨胀应力对护坡的破坏<sup>[2]</sup>;另外冰作为一种天然材料可以利用,如冰上汽车通行和冰上飞机起降<sup>[3-4]</sup>。也可以作为冰灯艺术的材料<sup>[5]</sup>。无论是冰的防治,还是冰的利用,冰厚度均是一个关键参数。因此,冰厚度在冰凌成因分析及预报<sup>[6]</sup>、冰工程<sup>[9]</sup>中是至关重要的因子之一。它对南水北调工程中的冰盖膨胀力<sup>[6]</sup>和输水能力<sup>[7]</sup>有直接贡献。目前有多种方法获得冰厚度,其中最直接的方式是原位钻孔测量和热电阻丝接触式测量<sup>[10]</sup>。这两种方法虽然简单,但是效率偏低,很难实现大范围冰厚度调查;冰下超声测距仪(测量距离为 150 cm,设计精度为 1 mm,数据分辨率为 0.01 mm)可以实现定点高精度连续测量冰厚,在北极海冰<sup>[11]</sup>、国内大庆水库冰<sup>[10]</sup>、青藏高原北麓河热融湖塘冰<sup>[12]</sup>厚度测量中得到应用。另外用磁致位移传感器,在冰层的底面和表面均结合机械运动磁环,获得过高精度定点接触式测量冰厚<sup>[13]</sup>。而海冰厚度测量注重观测范围大,它利用激光高度计卫星(ICESat)和合成孔径雷达(SAR)对海冰大区域观测。其中 ICESat 原理为通过测量海水与海冰之间的高度差(干舷),然后根据冰在水中的浮力原理计算海冰厚度<sup>[14-17]</sup>,而这种方法无法消除冰上积雪的影响。当表面积雪越厚,观测所得海冰厚度的误差越大。SAR 使用主动微波传感器,与被动微波传感器相比其精度有所提高,研究表明 SAR 具有探测海冰厚度的潜力<sup>[18-20]</sup>。

目前黄河冰厚测量方式主要是人工测量,它只有在河流封冻且工作人员在冰上能够自由活动才能实现测量。另外,黄河部分位置的宽度均是百米级,给同量级的卫星遥感带来挑战。另外河冰下存在的冰花,发生的冰塞影响到定点测量技术的推广。因而寻求非接触式高效测量是必然趋势,其中无人机悬挂探地雷达探测,能够解决不稳定冰层厚度探测。对于初冰期、融冰期和冰塞冰坝期的冰厚度探测具有快速安全特点。本文使用的探地雷达技术是原位冰面测量,它具有无损、连续、快速、高效、高精度、实时成像探测等特点,在淡水冰<sup>[21]</sup>、海冰<sup>[22]</sup>、冰川冰<sup>[23]</sup>均有应用。是发展非接触探测的雏形。通过定期对比同一河道断面冰层探测图像,可准确确定冰层厚度和结构变化<sup>[24]</sup>,能够及时发现异常,为解译冰层厚度变化和结构变化提供科学判据。

本文以黄河头道拐为依托,于 2013 年 - 2014

年度冬季对河道断面开展反复雷达探测,获得了一批雷达测试冰层厚度数据。同时取样测试冰晶体结构和密度等参数。在此介绍冰层雷达图谱,以期为淡水冰雷达测厚技术提供参考和经验积累。

## 1 雷达探测河道冰层方法

由于冰、纯水、底层沉积物介电常数分别为 3~4, 81 和 5~40,根据电磁波传播理论,电磁波在材料内的传播速度只与介电常数有关。因此探地雷达的电磁脉冲波在三种介质中的传播速度不同,接收到的信号可反映出不同介质界面间的位置。探地雷达测量冰层厚度时,假设雷达波到达冰-水界面和返回接收端的时间相同,因此计算冰厚时只用到双程走时的一半。

$$H = \frac{V \cdot \Delta T}{2} = \frac{c \cdot \Delta T}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

式中: $H$  为冰层厚度(cm); $\Delta T$  为双程用时(ns); $\epsilon$  为冰的介电常数; $V$  为雷达波在冰内传递速度,其计算公式如下:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

式中: $c$  为电磁波在真空中的传播速度(30 cm/ns)。

当实际冰的介电常数不确定时,可以根据实际冰厚反演得到冰的等效介电常数。本试验所用的雷达是意大利 IDS 公司生产的 RIS K2 型探地雷达。它包括主机、天线和处理软件三部分。

## 2 雷达探测黄河河道冰层结果

以黄河头道拐水文站水文断面附近为试验场。将雷达天线紧贴冰面,以步行方式拖动雷达。边行走,边显示雷达电磁波图像,边记录。每条测线记录均独立编写文件号,所有正式探测过程中如果遇随机情况且在雷达波图谱上出现异常时,则在现场重复观测。测量模式采用实时测量和距离测量模式。设置完毕后还需在冰面上拖动雷达对雷达进行增益处理,之后开展断面探测。在断面探测中采用垂直于河道和平行于河道两种方式,以便后期建立河道内冰层内部组构和厚度的三维分布状态。

由于冰的介电常数与冰的晶体组构和冰温有关。所以在每次探测冰厚时需要钻孔实测冰厚。根据实测冰厚反演探测时冰层的有效介电常数,然后再依据该参数修正当时整个断面的冰厚。另外,在典型河道位置,钻取冰芯并分析冰的晶体组构。

影响雷达探测冰厚精度的因素除了雷达波在冰

内的传播速度外,还与探测天线的频率有关<sup>[9]</sup>。前者由冰层的物理性质决定,后者由设备硬件决定。在2014年1月4日探测黄河河道冰层中,分别使用频率200、400、900和1500MHz天线对头道拐黄河垂直于河道和平行于河道断面的河道冰层进行探

测,表1给出了各频率天线测量冰厚与钻孔实测冰厚对比,可以看出各频率天线都能够满足冰层探测要求,但使用200MHz频率天线可探测到更深部位的冰-水状况,能够识别出冰花厚度。因此,选用200MHz频率天线对黄河冬季冰层进行探测。

表1 不同频率的雷达探测与人工实测冰厚汇总(2014年1月4日)

Tab. 1 Ice thickness detected by GPR method with different frequencies and measured by drilling (2014-1-4) cm

桩号	实测水深	人工冰厚	200 MHz 频率天线		400 MHz 频率天线		900 MHz 频率天线		1500 MHz 频率天线	
			冰厚	差值	冰厚	差值	冰厚	差值	冰厚	差值
420	90	32	32	0	40	8	35	3	35	3
	-6	80	36	37	1	40	4	32.5	-3.5	30
460	210	33	36	3	35	2	40	7	30	-3
480	290	40	40	0	35	-5	32.5	-7.5	40	0
500	300	40	39	-1	40	0	40	0	40	0
520	340	29	27	-2	40	11	30	1	35	6
540	390	33	30	-3	35	2	32.5	-0.5	35	2
560	390	38	37	-1	40	2	35	-3	30	-8
580	390	40	44	4	40	0	37.5	-2.5	35	-5
600	350	37	36	-1	35	-2	32.5	-4.5	35	-2
620	320	30	33	3	30	0	32.5	2.5	30	0
640	280	37	34	-3	40	3	37.5	0.5	35	-2
660	250	29	32	3	30	1	32.5	3.5	35	6
680	200	29	32	3	30	1	32.5	3.5	35	6
700	160	37	36	-1	40	3	35	-2	40	3
730	130	44	40	-4	50	6	45	1	50	6

图1是头道拐水文站黄河水文断面不同日期的冰厚断面分布。该冰厚断面在2014年2月中旬达到最大值。之后,冰层开始逐步消融,冰厚逐渐变薄。在同一时区,近岸冰较厚,非主流区次之,主流区冰厚较薄。在整个冰期断面桩号400~520为主流区,断面桩号520~740为非主流区,主流区的冰厚始终比非主流区的冰厚小10~20cm。在主流区流速较快,下层冰花少,主要以热力学生长的平整冰为主,最大冰厚约为60cm;而在桩号520~740为非主流区流速慢,冰花容易在冰层下堆积,水内冰花容易冻结成为冰花冰,最大冰厚约为70cm。冰晶体分析也证明桩号520~740的非主流区冰晶体类型为冰花冰,而桩号400~520的主流区冰晶体类型为粒状冰和柱状冰。

图2给出了雷达电磁波在冰内传播速度随冰期变化规律。由图可知,在2014年1月19日盛冰期时雷达电磁波在冰内传播速度约为16.3cm/ns;在2014年2月24日以后的融冰期时降低到15.0cm/ns以下。雷达电磁波在冰内传播速度减慢与冰内晶体结构和冰内温度升高后的融水增加有关。不同时期,由于冰晶体结构不同,雷达波在冰内传播速

度也不同;特别是在进入融冰期时,冰温度升高,晶体之间的融水增加,冰晶体的连接变得松软,甚至有冰水混合存在。冰融化引起冰内含水量增加同时,也引起雷达电磁波在水内传播速度降低;也可以认为是引起等效介电常数增加所产生的结果。

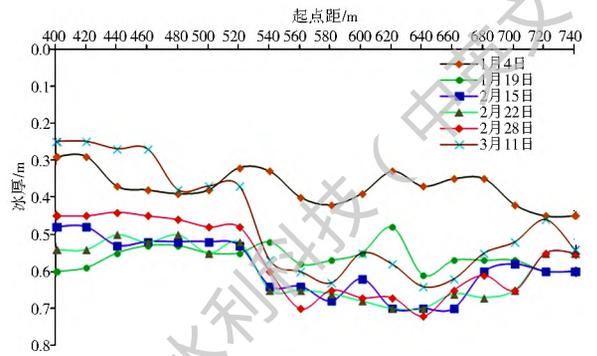


图1 黄河头道拐水文站水文断面不同时期冰厚分布

Fig. 1 Ice thickness distribution at Toudaoguai cross-section on the Yellow River

### 3 黄河河道现场典型冰层雷达图谱特征描述

#### 3.1 平整冰层

在平整冰层位置处,雷达图像的波形特征表现

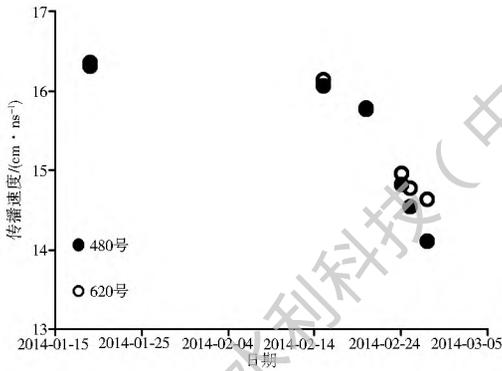


图 2 雷达电磁波在冰内传播速度

Fig. 2 The radar transmission speed in ice

为: 能量团分布均匀或仅在局部存在强反射细亮条纹; 电磁波能量衰减缓慢, 探测距离远且规律性较强; 一般形成低幅反射波组, 波形均匀, 无杂乱反射, 自动增益梯度相对较小。图 3 给出了黄河头道拐水文站平整冰层雷达图谱。

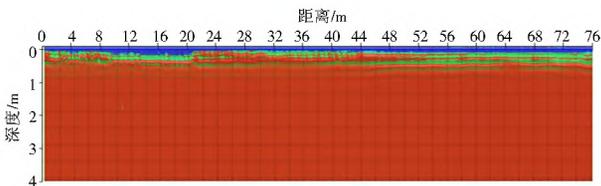


图 3 黄河头道拐水文站冰层雷达特征图谱

Fig. 3 The characteristics of GPR images at Toudaoguai cross section on the Yellow River

### 3.2 含破碎带和裂隙带冰层

河道水位发生变化时, 冰层将发生变形, 但受到河道边界约束, 冰层内部会发生挤压或断裂, 或在冰层内产生尺寸不同的裂缝。另外, 河冰在动力作用下, 冰层内也会产生破碎冰体。特别是在裂缝处会夹杂泥沙或水。这些破碎冰体、泥沙或水的介电常数同冰的介电常数差异大, 导致破碎带和裂缝带的雷达图谱和波形特征与平整冰层的有较大差异。一般在破碎带和裂缝带处雷达信号反射强烈, 反射面的振幅显著加强且变化剧烈; 还会表现出能量团分布不均匀, 在破碎带和裂缝带内常产生绕射和散射, 同相轴出现错断; 另外在深部甚至出现雷达图像模糊不清现象。通常在裂缝带会出现双曲线强反射波, 在破碎带处会出现多条双曲线强反射波。反射波同相轴的连线为破碎带或裂缝带的位置。图 4 给出含有破碎带和裂缝带的冰层雷达特征图谱。

### 3.3 冰花集聚区的冰层

黄河中上游在冬季除了冰封外, 其水流中还有冰花。由于冰花密度低于水的密度, 冰花会上浮聚集于冰层下方, 形成冰水混合状态。对应的等效介电常数有别于液态水, 所以探地雷达电磁波在冰花

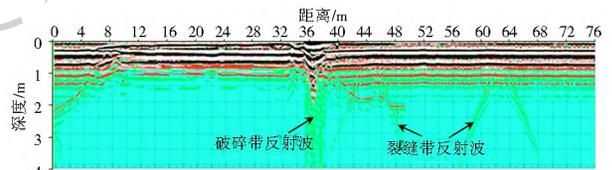


图 4 含有破碎带和裂缝带的冰层雷达特征图谱

Fig. 4 The characteristics of GPR images of ice layer containing fractured zone and fracture zone

聚集区内产生绕射和散射; 在穿过冰花聚集区时会产生一定规律的多次强反射。由冰花聚集区连续分布时, 雷达电磁波穿过时的反射波连续性较好, 波形相对均一。由于雷达探测冰层和冰花时雷达电磁波从高阻抗介质到低阻抗介质, 因而反射电磁波与入射电磁波相位相反, 以此可以判断冰层和冰花的界面位置。图 5 给出含有冰花层的雷达特征图谱。

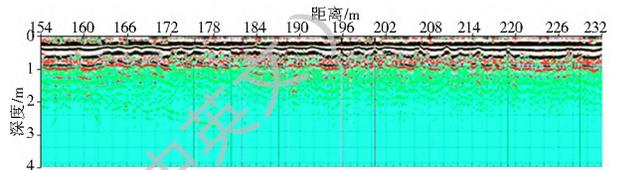


图 5 含有冰花层的雷达特征图谱

Fig. 5 The characteristics of GPR images containing frazil ice layer

## 4 结论

(1) 雷达波在冰内传播速度的变化是影响雷达探测冰厚准确性的决定因素。不同时期, 由于冰内部结构的差异, 冻结期的雷达波在冰内传播速度为 16.3 cm/ns, 融冰期的对应速度小于 15.0 cm/ns。

(2) 雷达探测黄河头道拐水文站不同时期的冰厚结果显示, 垂直于河道断面的冰厚不均匀。在桩号 400~520 的主流区, 以热力学生长的颗粒冰和柱状冰为主, 最大冰厚约为 60 cm; 而在桩号 520~740 的非主流区, 以冰花冻结形成的冰花冰为主, 最大冰厚约为 70 cm。

(3) 根据雷达探测冰层所得雷达图谱, 可以定性判断冰层的结构, 冰层的连续性; 冰层内部裂缝的具体位置和走向。

### 参考文献(References):

[1] 张宿峰. 流冰与桥墩的相互作用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014. (ZHANG Sufeng. Ice and the interaction of bridge piers [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese))

[2] 姜连杰, 卢永超, 韩红卫, 等. 红旗泡水库冰层变形及护坡破坏现象成因分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(7): 85-88. (JIANG Lianjie, LU Yongchao, HAN Hongwei, et al. Causal analysis on ice layer deformation and slope protection damage of

- Hongqipao Reservoir [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42 (7): 85-88. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.07.024
- [3] Gold L W. Use of Ice Covers for Transportation [J]. *National Research Council of Canada*, 1971, 8 (2): 170-181. DOI: 10.1139/t71-018
- [4] 徐伯孟, 于生清, 卢兴良. 嫩江冰上交通 [J]. *冰川冻土*, 1992, 14 (4): 374-380. (XU Bormeng, YU Shengqing, LU Xinglaing. Traffic and transport on ice cover in Nenjiang River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14 (4): 374-380. (in Chinese))
- [5] Dewar K, Meyer D, and Li W. Harbin, Lanterns of Ice, Sculptures of Snow [J]. *Tourism Management*, 2001, 22: 523-532. DOI: 10.1016/S0261-5177(01)00007-3
- [6] 周庭正, 赵新, 黄焱. 南水北调中线工程渡槽结构冰盖温度膨胀力研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10 (3): 7-11. (ZHOU Tingzheng, ZHAO Xin, HUANG Yan. Ice thermal expansive pressure acting on aqueduct structure of Middle Route Scheme of SNWDP [J]. *South to North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2012, 10 (3): 7-11. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.03007
- [7] 赵新, 张雅卓, 王旭. 加厚冰盖渗流对渠道输水能力的影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10 (4): 7-9. (ZHAO Xin, ZHANG Yanzhuo, WANG Xu. Impact analysis of seepage flow in thickened ice cover on the water diversion capacity in canal [J]. *South to North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2012, 10 (3): 7-9. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.04007
- [8] 霍世青, 温丽叶, 范旻昊, 等. 2014-2015 年度黄河宁夏河段凌情及气象成因 [J]. *人民黄河*, 2016, 38 (2): 16-18, 23. (HUO Shiqing, WEN Liye, FAN Minhao, et al. Analysis of ice flood characteristics and meteorological causes at Ningxia Inner Mongolia reach of Yellow River in year 2014-2015 [J]. *Yellow River*, 2016, 38 (2): 16-18, 23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.02.005
- [9] 刘诗华, 侯树强. 寒区核电厂取水口防冰设施设计研究 [J]. *人民黄河*, 2015, 37 (5): 112-115. (LIU Shihua, HOU Shuqiang. Research on ice preventing facility schemes of water intake in a nuclear power plant in cold regions [J]. *Yellow River*, 2015, 37 (5): 112-115. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.05.029
- [10] 李志军, 杨宇, 彭旭明, 等. 黑龙江红旗泡水库冰生长期现场观测数据的剖析 [J]. *西安理工大学学报*, 2009, 25 (3): 270-27. LI Zhijun, YANG Yu, PENG Xuming, et al. The analysis of the field observation data of fresh ice growing process in Hongqipao Reservoir of Heilongjiang [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25 (3): 270-27. (in Chinese)
- [11] Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Investigation of the Thermodynamic Processes of a Floe lead System in the Central Arctic during later Summer [J]. *Advances in Polar Science*, 2011, 22 (1): 42-48. DOI: 10.3724/SP.J.1085.2011.00010
- [12] Huang Weifeng, Li Zhijun, Han Hongwei, et al. Structural Analysis of Thermokarst Lake Ice in Beiluhe Basin, Qinghai Tibet Plateau [J]. *Cold Region Science and Technology*, 2012, 72: 33-42. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.11.005
- [13] Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Yairfeng, et al. A New Apparatus for Monitoring Sea Ice Thickness Based on the Magnetostriuctive delay line Principle [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26 (4): 818-827. DOI: 10.1175/2008JTECHO613.1
- [14] Zwally H J, Yi D, Kwok R, et al. ICESat Measurements of Sea Ice Freeboard and Estimates of Sea Ice Thickness in the Weddell Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (C2): C02S15. DOI: 10.1029/2007JC004284, 2008
- [15] Kwok R, Cunningham G F. ICESat over Arctic Sea Ice: Estimation of Snow Depth and Ice Thickness [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (C8): C08010. DOI: 10.1029/2008JC004753, 2008
- [16] Farrell S L, Laxon S W, McAdoo D C, et al. Five Years of Arctic Sea Ice Freeboard Measurements from the Ice, Cloud and Land Elevation Satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (C4): C04008. DOI: 10.1029/2008JC005074, 2009
- [17] Price D, Rack W, Haas C, et al. Sea Ice Freeboard in McMurdo Sound, Antarctica, Derived by Surface Validated ICESat Laser Altimeter Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118 (3634-3650). DOI: 10.1002/jgrc.20266, 2013
- [18] Nakamura K, Wakabayashi H, Naoki K, et al. Observation of Sea ice Thickness in the Sea of Okhotsk by Using Dual-frequency and Fully Polarimetric Airborne SAR (Pr-SAR) Data [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2005, 43 (11): 2460-2469. DOI: 10.1109/TGRS.2005.853928
- [19] Nakamura K, Wakabayashi H, Uto S, et al. Observation of Sea ice Thickness Using ENVISAT Data from L-tzow-Holm Bay, East Antarctica [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2009, 6 (2): 277-281. DOI: 10.1109/LGRS.2008.2011061
- [20] Kwok R, Nghiem S V, Yueh S H, et al. Retrieval of Thin Ice Thickness from Multifrequency Polarimetric SAR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51 (3): 361-374. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00017-H
- [21] Li Zhijun, Jia Qing, Zhang Baosen, et al. Influences of Gas Bubble and Ice Density on Ice Thickness Measurement by GPR [J]. *Applied Geophysics*, 2010, 7 (2): 105-113. DOI: 10.1007/s11770-010-0234-4
- [22] 王帮兵, 孙波, 田钢, 等. 利用三维 GPR 探测北冰夏季海冰厚度及下表面形态特征分析 [J]. *物探与化探*, 2007, 31 (3): 189-192. (WANG Bangbing, SUN Bo, TIAN Gang, et al. The application of the 3D GPR method to measuring the depth of arctic summer sea ice and analysis its underside morphology [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31 (3): 189-192. (in Chinese))
- [23] 王宁练, 蒲健辰, 祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析 [J]. *冰川冻土*, 2009, 31 (3): 431-435. (WANG Ninglian, PU Jianchen. Ice thickness, sounded by ground penetrating radar, on the Bayi Glacier in the Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31 (3): 431-435. (in Chinese))
- [24] 戴长雷, 于成刚, 廖厚初, 等. 寒区水科学及国际河流研究系列丛书 3 冰情监测与预报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (DAI Changlei, YU Chenggang, LIAO Hourchu, et al. Research on water science in frigid zone and international rivers 3 survey and forecast of river ice [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))