

# 利用三维 GPR 探测 北极夏季海冰厚度及下表面形态特征分析

王帮兵<sup>1</sup>, 孙波<sup>2</sup>, 田钢<sup>3</sup>, 郭井学<sup>1</sup>, 汪大立<sup>2</sup>

( 1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026 ; 2. 中国极地研究中心, 上海 200129 ; 3. 浙江大学理学院地球科学系, 浙江 杭州 310027 )

**摘 要:** 海冰在全球气候系统中扮演着重要角色。在中国第二次北极科学考察中, 使用 3D 雷达探测结合冰钻进行海冰测量。雷达剖面上可清楚识别冰-水界面, 与冰钻测量结果较好地吻合。雷达 3D 图像清晰显示了冰底界面在 3D 方向的起伏变化以及冰内构造的空间展布情况。对三维探测区域内海冰厚度统计显示, 所测冰盘的平均厚度为 4.15 m, 较厚的区域位于左下角, 最大厚度约为 6.4 m, 较薄的区域是在中央和左上角区域, 最小的厚度小于 3.0 m。经过进一步计算可提供如海冰上下表面面积、海冰体积等参数, 为遥感和数值模拟提供地面校核数据, 也为海冰形成机制和动力作用过程研究提供佐证和依据。

**关键词:** 北极海冰; 探地雷达 (GPR); 三维勘探; 偏移处理

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2007)03-0189-04

海冰作为北极气候系统的重要组成部分备受人们的关注。通过各种反馈作用, 海冰不仅是气候变化的指示器, 而且是气候变化的放大器<sup>[1-5]</sup>。多年观测数据和气候模拟结果显示, 下一个十年的全球气候变暖将首先对北极地区产生显著影响, 导致海冰加速融化<sup>[6-8]</sup>, 由此带来的反馈作用对北极气候系统产生的影响正逐渐显现, 导致诸如极涡减弱、地面气压降低、气旋活动加强、北冰洋向中、低纬度输出的高密度冷水大量减少等现象的出现, 从而进一步影响全球系统的变化。因此海冰厚度是了解海冰演化、物质平衡和模拟冰-海水-气相互作用过程的关键参数。海冰下表面(冰-水界面)形态是海水与海冰相互作用的结果。海冰的厚度和形态决定着海-气能量与水汽的交换过程和速率, 主导着海冰的物理力学特征, 影响海冰的运动形变及其冻结与消融过程, 因此国际上对海冰厚度和形态特征的研究十分重视。

目前, 观测海冰厚度和下表面形态特征主要采用仰视声纳、潜艇和锚系声纳等方法<sup>[9-10]</sup>, 即在水下采用仰视声纳装置向上观测, 通过声纳图像提取由吃水深度反演的海冰厚度和由冰脊龙骨产生的下表面形态数据。尽管声纳方法可给出精确的厚度数据, 但它只能提供有限的时空覆盖范围。冰钻的低效率难以满足大尺度的海冰调查要求。随着空间技

术的发展, 利用卫星和航空对地观测技术获取海冰遥感资料, 再通过模型算法得出海冰厚度与形态特征已成为新的途径, 然而遥感方法的探测精度还非常有限。电磁感应方法是近年引入的有效的海冰厚度探测方法<sup>[11-13]</sup>, 轻便快捷, 可搭载在船或飞机上测量, 适合于大范围探查以及与遥感资料的比对。其物理基础是假定被探测介质为两层水平层状模型, 测量结果是水平方向 5 m 范围内电导率的平均值, 无法反映多年海冰复杂的内部结构和下表面形态的剧烈变化。

对于研究海冰地球物理特性而言, GPR 方法已显示出巨大潜<sup>[14-16]</sup>。2D 雷达探测剖面可以反映海冰内部结构和冰底与海水界面水平方向和垂向变化, 3D 雷达成像则能够反映海冰内部结构和冰底与海水界面在 3D 空间的展布情况。在 2003 年 7 月 9 日~9 月 26 日, 中国第二次北极科学考察期间, 我们采用 3D GPR 方法来探测北极盛夏季节海冰厚度, 目的是要确定 GPR 方法测量海冰厚度和下表面形态的探测精度。

## 1 研究区域和工作方法

本次考察设计了 7 个工作区域(断面), 分别位于白令海、白令海峡、楚科奇海和加拿大海盆。白令海 17 个站位, 北冰洋 84 个站位。在其中的 IS1、IS3、

IS5、IS13 和 CNIS7 站位布置了 2D 雷达剖面工作, 累计长度 4.576 km, 另在 P 区的长周期海冰站上选择一块表面平整的海冰开展海冰 3D 雷达探测( 见文后彩图 1 中编号 4 的位置)。雷达探测试验均选择在表面平坦、溶水坑较少的冰盘上进行, 避免因冰脊发育、海冰堆积叠加、冰面地形起伏和表面融池对雷达波的干扰。

探测设备选用加拿大 SSI 公司生产的 pulseEKKO 100A 增强型探地雷达系统。在中国第一次北极科学考察期间( 1999 年 7 ~ 9 月), 孙波等进行过雷达天线频率与探测深度以及分辨率试验研究<sup>[16]</sup>, 分别选用 50、100 和 200 MHz 天线与冰钻作对比试验。研究表明: 对于北冰洋夏季海冰, 由于融化和多年冰成分来源的复杂性( 降雪和海水冻结), 冰内含盐度增大, 电磁波衰减快, 有效探测深度明显变浅, 与冰钻对比发现 200 MHz 天线有较高的分辨率, 但未能穿透海冰( 4 ~ 6 m); 50 MHz 天线可清楚识别出冰水界面, 但分辨率较低; 100 MHz 天线能兼顾分辨率和探测深度。本次工作引用此试验成果, 选用 100 MHz 天线进行 3D 雷达测量工作。

3D 雷达数据是按照测线顺序进行采集。探测方式采用剖面法, 即发射和接收天线保持一定间距, 整体沿测线移动测量, 每条测线为 1 个时间剖面记

录, 这样就得到测线剖面上地下 2D 信息, 多条 2D 测量数据组成 1 个 3D 数据集。在 CNIS7 站位 4 号区域共布置了 51 条测线, 每条测线长度 100 m, 测线间隔 2 m, 组成 100 m × 100 m 的探测区域。所有测线采用相同的天线中心频率( 100 MHz)、天线间距( 1 m)、时窗长度( 300 ns) 和步距( 1 m)。

## 2 资料处理

我们使用多种雷达和地震数据处理软件包来处理本次雷达测量数据。先使用 WinEKKO 软件作 De-wowling 滤波、时间零点校正并使用自动增益控制( AGC) 来补偿雷达衰减雷达信号以增强深部反射, 然后将数据导入 Sandmeier's REFLEXW 软件进行 F-K 偏移处理。

使用 F-K 偏移可提高反射信号的连续性并改善底部形态的探测精度。由于雷达波速度对偏移效果影响较大, 速度的选取至关重要。经过与冰钻测量的冰厚数据作对比计算, 得到最佳拟合速度 0.145 26 m/ns, 用此速度对雷达剖面作 2D 偏移处理。图 2 所示为偏移前后雷达时间剖面, 从中可看出偏移处理可有效改善图像质量, 压制绕射波, 提高有效波的连续性。

对 3D 雷达数据, 先使用 REFLEXW 对每条测

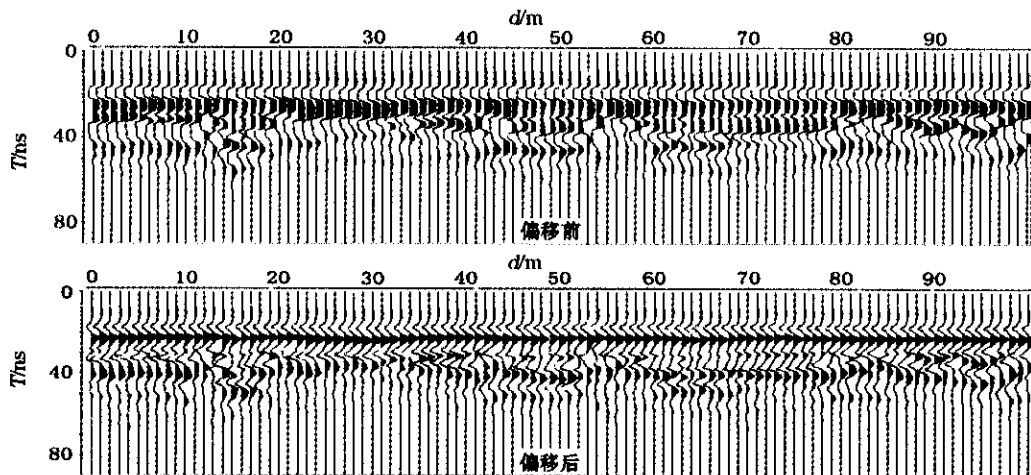


图 2 偏移处理效果对比时间剖面

线分别做 F-K 偏移, 然后导入 GSSI 公司的 Radan 软件显示 3D 雷达探测结果, 同时对各剖面分别作时深转换, 最后用 SURFER 软件绘制由 3D 雷达探测得到的冰厚等值线图并计算出探测区域内海冰总体积。

## 3 结果分析

### 3.1 速度分析

由于海冰冻结和消融是一个动态过程, 冰内物质的来源复杂( 降雪和海水冻结), 使得海冰( 特别

是多年冰) 速度变化较大。Kavas 等曾对北冰洋海冰雷达传播速度进行分析和计算, 得出传播速度在 0.138 ~ 0.160 m/ns 范围内。中国第一次北极科考中, 孙波等得出北极盛夏海冰速度是 0.142 ~ 0.154 m/ns。

为了获得偏移处理和时深转换所需的雷达波速度, 我们选择 18 个有冰钻控制的雷达测点, 读取雷达图像上冰底界面的双程旅行时  $T$  以及对应位置冰钻测得的海冰厚度  $H$  (图 3)。

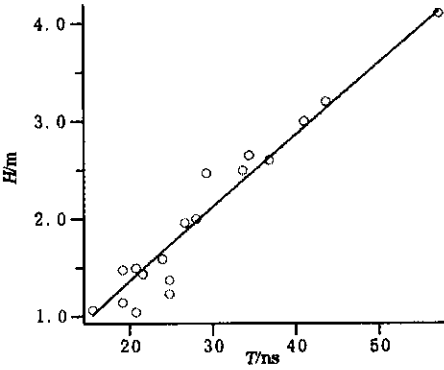


图3 双程旅行时和海冰厚度关系

从雷达波传播的运动学规律可知,雷达波传播的双程旅行时  $T$  和介质厚度  $H$  (假定为两层均匀介质) 存在以下关系

$$(Tv/2)^2 = H^2 + (x/2)^2, \tag{1}$$

其中  $v$  是雷达波速度,  $x$  是发射和接收天线间距,对于 100 MHz 天线,  $x = 1$  m。将  $x$  代入公式(1)并进行适当转换得到下式

$$H = \sqrt{(v/2)^2 T^2 - 1/4}, \tag{2}$$

将 18 个点的  $H$  和  $T$  之间以式(2)为拟合函数,求出最佳拟合速度  $v = 0.145\,26$  m/ns,拟合曲线(图3中斜线所示)为  $H = \sqrt{0.005\,275T^2 - 0.25}$ 。在后续处理和解释中皆引用此速度值。

3.2 二维 GPR 探测成果剖面

文后彩图 2 所示为 3D 区域 Line12 线雷达剖面。图像上部 2 组平直连续的水平波组为空气波和直达波,下部区域表现出雷达波强烈衰减和弱化现象,这与海水对电磁波的强烈吸收特性相一致,据此推断剖面上雷达波迅速衰减的界线即为冰水界面。从彩图 2 中可看出雷达图像可反映出冰底界面的起伏以及冰内结构的变化。图中 0 ~ 10、68 ~ 78 m 处冰内层相对平整,42 ~ 50、60 ~ 68 m 冰内层相对平整,底部冰脊发育,而 10 ~ 20、78 ~ 85、92 ~ 100 m 冰内层扭曲破碎,底部发育冰脊,明显受挤压等动力作用,20 ~ 40 m 处底部溶蚀作用强烈。

文后彩图 3 为深度 3.8 m 时的三维 GPR 切片。将 Line12 线放入整个三维面积(纵轴 24 m 处)上来看,从彩图 3a 可看出 42 ~ 50 m 冰脊属于北西-南东走向的冰脊一部分,10 ~ 20、78 ~ 85、92 ~ 100 m 属于环状冰脊(彩图 3b)的一部分,而这三部分冰内破碎扭曲明显,说明环状冰脊的形成受外部动力作用过程的控制,60 ~ 68 m 处冰脊属于孤立点,它们的形成和发育受洋流和水温的控制。3D 雷达探测有助于了解海冰的形成和演化规律以及冰-海水-气的相互作用关系。

3.3 三维 GPR 数据体和海冰下表面形态

文后彩图 3 是首次应用 GPR 测量以三维形式反映海冰下表面形态。3D 立体图揭示北极夏季海冰内部结构和下表面形态的空间分布特征,从图像上可清晰识别出冰-水界面。

为了定量描述海冰下表面形态,用速度分析得到的最佳速度进行时深转换,计算出 3D 雷达探测区域每个格点的海冰厚度值,再使用 Surfer 软件将海冰厚度、下表面形态及其等值线绘于图上(文后彩图 4)。对 3D 探测区域内海冰厚度统计结果显示,所测冰盘的平均厚度为 4.15 m,左下角区域较厚,厚度最大约为 6.4 m,而且比较薄的区域位于中央和左上角区域,最小的厚度小于 3.0 m。三维 GPR 探测结果所表现出的海冰底部的齿状和褶皱状起伏特征与北极海冰的演化规律非常吻合。在海冰演化过程中,洋流和风的长期作用使得海冰底部表面粗糙,同时随着海冰冻结和脱盐过程以及冰内成分和结构的变化,还有海冰演化过程中的融水渗滤、重力迁移等作用,海冰的下表面形态变得更复杂。3D 雷达探测结果可以进一步给出精确的海冰体积和上、下表面面积,这些都是海冰演化过程数值模拟中所需的关键参数,过去是通过遥感或其他探测资料获得,但精度非常有限。3D 雷达探测结果可以为遥感和数值模拟提供现场地面校核数据,也为海冰形成机制和动力作用过程研究提供佐证和依据。

4 讨论和结论

此次考察结果表明,雷达波能够穿透盛夏北冰洋海冰,在选用合适频率的天线条件下,雷达图像可清楚地显示冰-水界面的位置。由于海冰是一种复杂的介质,海冰的运动和变形可引起海冰内部成分、内部结构的不连续以及冰温的不一致,从而导致海冰雷达波速度出现一定的离散性。提高 GPR 探测精度最理想的方法是在每条雷达测线上有冰钻测厚数据,用实际计算得到的雷达波实现雷达数据时深转换。本次研究中,雷达探测是在冰表面作业,对于未来的卫星遥感和航空雷达探测来讲,仍有重要的参考价值。

使用 GPR 三维方法探测海冰底部形态的价值在于相比雷达 2D 数据更容易直观解释,减少不确定性,同时,其在冰面上的可操作性,是其他观测方法所不能替代的。此外,采用四维 GPR 和 GPS 方法联合监测海冰变化具有很好的应用前景,通过在固定的冰盘上按照一定的时间间隔以 3D 形式重复观

测来确定海冰厚度和冰底消融、冻结过程以及海冰的漂流轨迹,对于了解北极海冰的演化规律、运动规律以及动力过程具有重要意义。

未来的工作,拟在其它海域不同海冰类型区开展更多的 GPR 探测工作,丰富对海冰物理、化学特征影响电磁波传播速度的认识。此外,当冰底形态出现陡倾或起伏剧烈变化时,建议使用 3D 偏移处理方法,以提高数据处理精度。

感谢参加中国第二次北极科学考察的同事们。大连理工大学李志军教授提供了冰钻资料,在数据处理和解释过程中得到很多同志的热心帮助,在此一并表示感谢。

参考文献：

[ 1 ] Barry R G ,Serreze M C ,Maslanik J A ,et al. The Arctic sea ice-climate system :observations and modeling[ J ]. Rev Geophys ,1993 , 31( 4 ) 397.

[ 2 ] Dickson B. All change in the Arctic[ J ]. Nature ,1999 397 389.

[ 3 ] Comiso J C. A rapidly declining perennial sea ice covers in the Arctic[ J ]. Geophys Res Lett 2002 29( 17 ) :1.

[ 4 ] Rigor I G ,Wallace J M ,Colony RL. Response of sea ice to the Arctic Oscillation[ J ]. J Clim 2002 ,15 2648.

[ 5 ] Rothrock D A ,Zhang J. What explains its recent depletion[ J ]. J Geophys Res 2005 ,110( C01002 ) :1.

[ 6 ] Kerr R A. Will the Arctic Ocean lose all its ice[ J ]. Science ,1999 , 286 1828.

[ 7 ] Hilmer M ,Lemke P. On the Decrease of Arctic sea ice volume[ J ]. Geophys Res Lett 2000 ,27( 22 ) 3751.

[ 8 ] Holloway G ,Sou T. Has Arctic sea ice rapidly thinned[ J ]. J Clim , 2002 ,15 1691.

[ 9 ] Hudson R. Annual Measurement of sea-ice thickness using an upward-looking sonar[ J ]. Nature ,1990 344 135.

[ 10 ] Wadhams P. The underside of Arctic sea ice image by sidescan sonar[ J ]. Nature ,1988 333 161.

[ 11 ] Haas C ,Gerland S ,Eicken H ,et al. Comparison of sea ice thickness measurements under summer and winter conditions in the Arctic using a small electromagnetic induction device[ J ]. Geophysics , 1997 62 749.

[ 12 ] Haas C ,Eicken H. Interannual variability of summer sea ice thickness in the Siberian and Central Arctic under different atmospheric circulation regimes[ J ]. J Geophys Res 2001 ,106( C3 ) 4449.

[ 13 ] James E R ,WorbyzA P ,Vrbancich J ,et al. Shipborne electromagnetic measurements of Antarctic sea - ice thickness[ J ]. Geophysics 2003 68( 5 ) 1537.

[ 14 ] Kovacs A ,Morey R M. Sea ice thickness versus impulse radar time-of-flight data[ D ]. Cold Reg Sci Technol ,1990 ,18( 1 ) 91.

[ 15 ] Morey R M ,Kovacs A ,Cox G F N. Electromagnetic properties of sea ice[ D ]. Cold Regions Science and Technology ,1984( 9 ) 53.

[ 16 ] Sun B ,Jia J H ,He M B ,et al. Sea-ice thickness measurement and its underside morphology analysis using radar penetration in the Arctic Ocean[ J ]. Sci China( D ) 2003 46( 11 ) 1151.

THE APPLICATION OF THE 3D GPR METHOD TO MEASURING THE DEPTH OF ARCTIC SUMMER SEA ICE AND ANALYZING ITS UNDERSIDE MORPHOLOGY

WANG Bang-bing<sup>1</sup> ,SUN Bo<sup>2</sup> ,TIAN Gang<sup>3</sup> ,GUO Jing-xue<sup>1</sup> ,WANG Da-li<sup>2</sup>

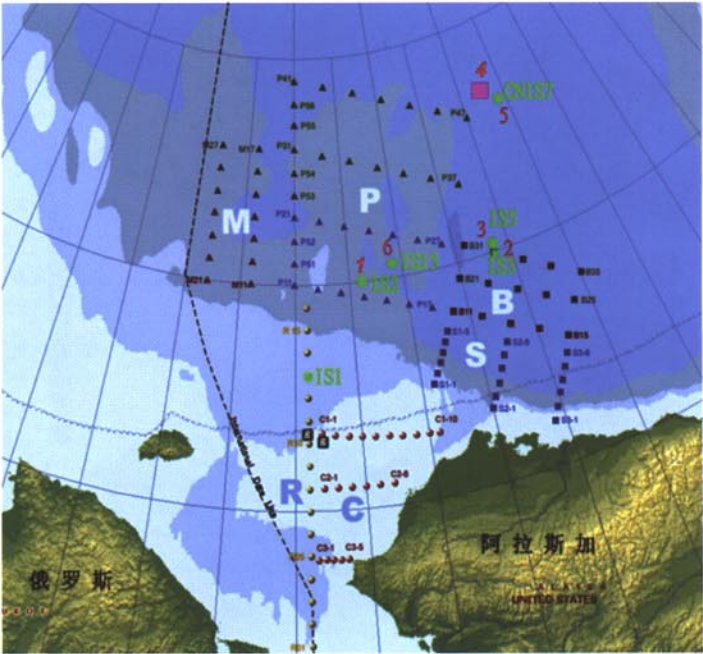
( 1. Department of Geophysics , Jilin University , Changchun 130026 ,China 2. Polar Research Institute of China , ShangHai 200129 ,China 3. Department of Earth Science , ZheJiang University , Hangzhou 310027 , China )

**Abstract** :Sea ice plays an important role in the global climate system. The authors combined 3D GPR with drilling during China's second national Arctic research expedition. The interface of ice and sea water can be recognized clearly from the GPR section , consistent with the drilling result. 3D GPR Cube illustrates distinctly the underside morphology and the spatial spreading of inner structure of the Arctic sea ice. After additional calculation , some parameters , such as the upper and bottom surface areas and the volume of sea-ice , can be figured out and then serve as on-the-spot checkout data for the remote sensing and the data simulator. These data also provide the evidence and proof for the study of the formation mechanism and the course of dynamic effect of the sea ice.

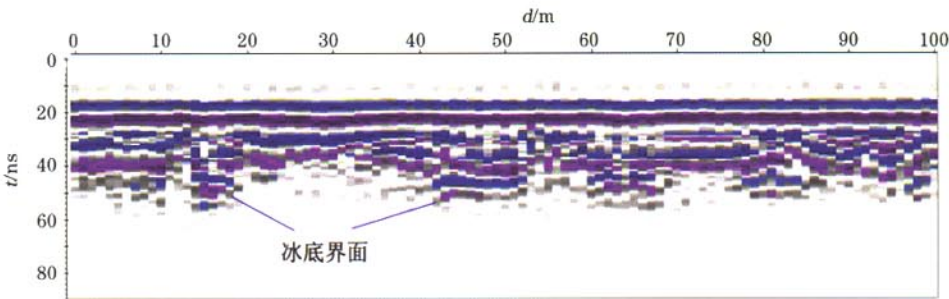
**Key words** : Arctic sea-ice ; ground penetrating radar ; two and three dimension exploration ; migration

作者简介：王帮兵( 1968 - ) 男,1992 年 7 月毕业于成都地质学院应用地球物理专业,2004 年 9 月考入吉林大学地球探测科学与技术学院攻读博士学位。主要从事近地表地球物理方法研究,特别是浅层地震和探地雷达勘探技术。现在中国极地研究中心从事极地地球物理方法研究,已发表多篇论文。

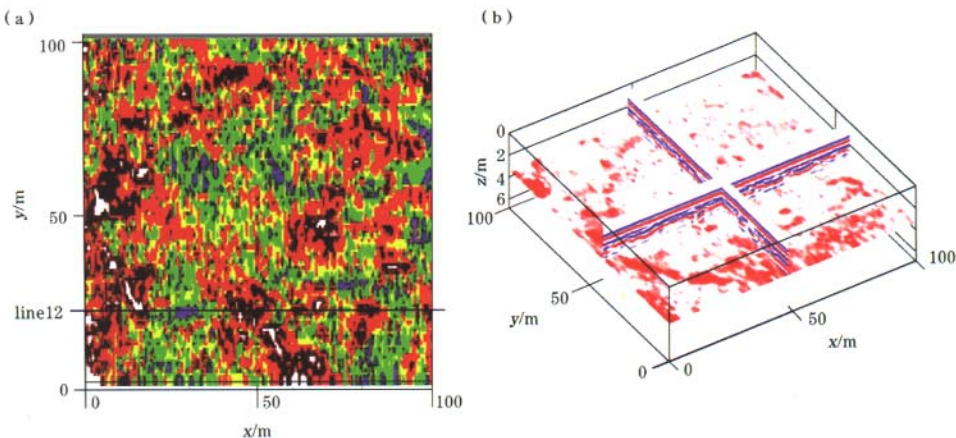
彩图1~3文字说明见P189:利用三维GPR探测北极夏季海冰厚度及下表面形态特征分析（王帮兵,孙波,田钢，等）



彩图1 中国第二次北极科学考察雷达工作布置及雷达3D测线布设原则示意



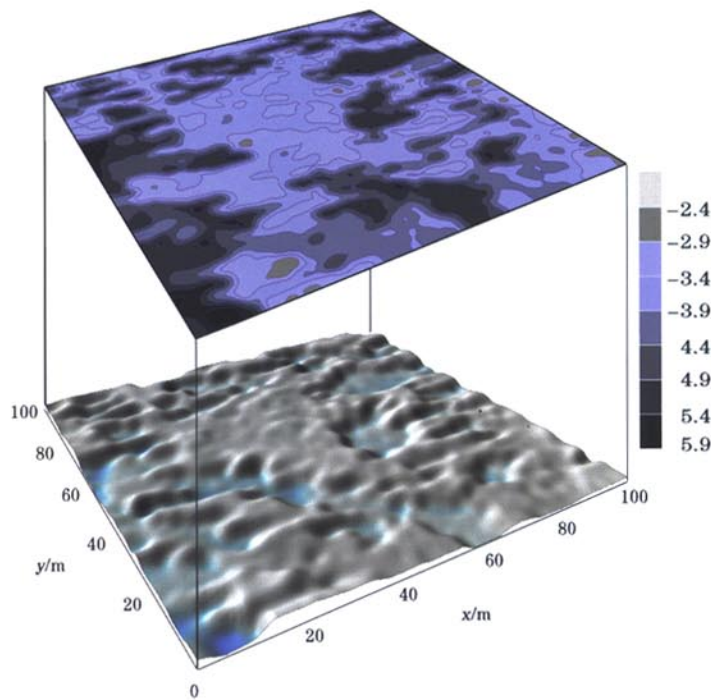
彩图2 Line12线雷达时间剖面



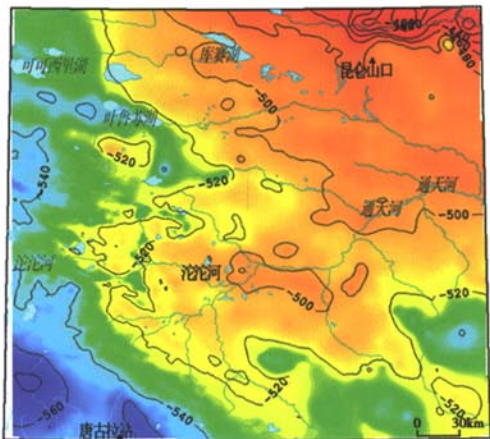
a—深度为3.8 m的水平切片；b—深度为3.8m的水平切片加十字垂直切片

彩图3 三维GPR切片

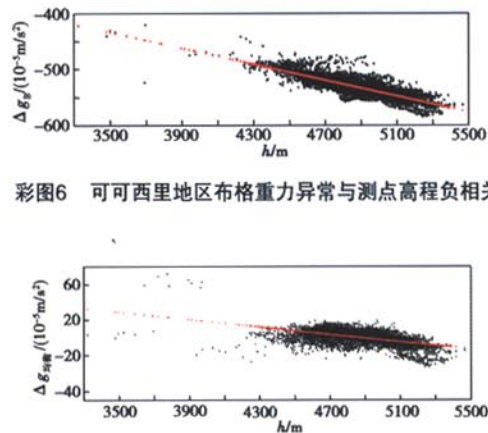
彩图4文字说明见P189:利用三维GPR探测北极夏季海冰厚度及下表面形态特征分析（王帮兵,孙波,田钢,等）  
彩图5~9文字说明见P236:青藏高原重力异常与地形高程的负相关校正（张春灌）



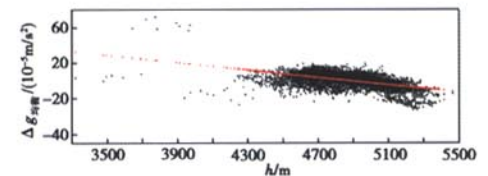
彩图4 海冰底部形态及其等深线平面(纵横比例15:1)



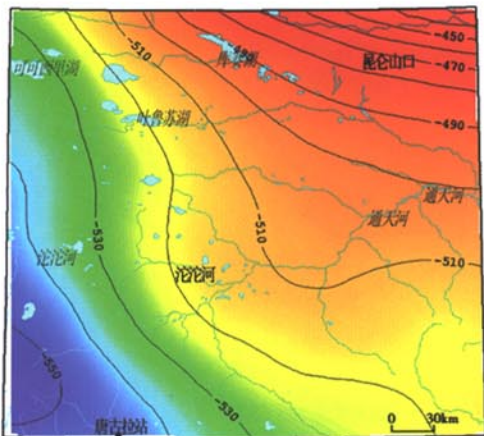
彩图5 可可西里地区布格重力异常



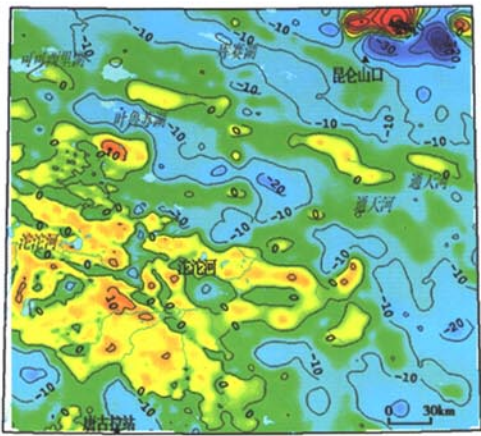
彩图6 可可西里地区布格重力异常与测点高程负相关



彩图8 可可西里地区均衡重力异常与测点高程负相关



彩图7 可可西里地区均衡重力异常



彩图9 可可西里地区经地形残余负相关校正的均衡重力异常