

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

Global observation of PKiKP and its coda, implying heterogeneous
structure of the inner core

作者姓名: _____ 龙鑫

指导教师: _____ 艾印双 研究员

学位类别: _____ 理学硕士

学科专业: _____ 固体地球物理学

研究所: _____ 中国科学院地质与地球物理研究所

2016 年 6 月

**Global observation of PKiKP and its coda, implying heterogeneous
structure of the inner core**

**By
Long Xin**

**A Dissertation/Thesis Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Science**

**Institute of Geology and Geophysics
Chinese Academy of Sciences**

June, 2016

关于学位论文使用权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经著作权人授权，不得将本论文转借他人并复印、抄录、拍照、或以任何方式传播。否则，引起有碍著作权人著作权权益之问题，将可能承担法律责任。

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院地质与地球物理研究所有关保存、使用学位论文的规定，即：中国科学院地质与地球物理研究所有权保留学位论文的副本，允许该论文被查阅；中国科学院地质与地球物理研究所可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签 名：

导师签名：

日 期：

关于学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：

导师签名：

日 期：

摘 要

从实际的稠密台阵中抽取各种几何形态和台间距不同的子台阵,运用 PWS 等标准台阵叠加技术,比较不同类型的子台阵对与内核相关的一系列弱震相 (如前临界 PKiKP、PKIIKP 和 PKJKP 等) 提取的效果;然后通过理论模拟各种不同台阵的情形,进行叠加,将理论模拟的最佳结果和使用实际资料叠加的结果进行比较。若能找到最优的配置方法,则对今后以观测与内核相关的弱相位为目的的地震台阵布设具有一定的指导作用。

关键词: 台阵; 叠加; PWS; 弱震相; 内核

Abstract

I collect global data set from short period IMS arrays, from which waveform quality of each station is relatively high and records last several decades for their nuclear detection purpose, and Hi-net which is extremely dense. I attempt to use those data and apply array stacking technique like PWS to detect and identify the inner core relevant weak phases. I also plan to figure out a best array configuration for the signal extraction, which is mainly affected by geometrical distribution of stations and slowness of a given phase using real data and theoretical stimulation, and consider to determine a proper array size that would be sufficient to provide a good SNR for the phase extraction. The result of this research would be a guidance for future devise of seismic array aimed to study the inner core properties using weak inner core phases.

Keywords: Array;Stack;PWS;Weak Phases;Inner Core

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
第一章 PKiKP/PcP Amplitude Ratio and CMB variation	1
1.1 Local intensive variation of CMB property	2
1.1.1 Varify CMB effects on Amplitude Ratio	3
参考文献	7

第一章 PKiKP/PcP Amplitude Ratio and CMB variation

利用 PKiKP 和 PcP 相位的振幅比可以约束 ICB 的密度变化和剪切波速度差等性质 (Koper and Pyle, 2004), 即认为 PcP 和 PKiKP 在地幔中的射线路径比较接近, 则地幔对振幅观测的影响效应可以大部分被消除, 同时也可以避免由于仪器造成的绝对振幅测量不准确的影响, 对振幅比异常的贡献主要来自与内核。但这其中隐含了使用幅比方法研究 ICB 的一个重要的假设, 即核幔边界的性质和结构能比较好的确定且其变化对 PKiKP/PcP 的振幅比不敏感。否则, 可能会观测到异常大或异常小的 PKiKP 和 PcP 振幅比, 这样就很难对 ICB 的性质进行约束。

通过对 265 对观测到 PKiKP 相位的事件和台阵对数据的挑选, 得到了这两个相位能同时被观测到的 111 对事件和 IMS 台阵的数据, 在这个数据集中, 两个相位的最大振幅都能较为可靠地被测量。同时, 为了探求是什么因素影响 PKiKP 和 PcP 是否同时被观测到, 对地震震源参数、震中距和 PcP 在 CMB 的反射点位置分布做了一些分析 (图 1.1、图 1.2)。从结果来看, 对于已有的全部数据, 不管是地震的震级、震源深度还是震中距都不会对这两个相位是否被同时观测到产生太大影响。5.0 级之上的事件都可产生清晰的 PcP 和 PKiKP, 这些事件基本集中在 0-100km 的浅源深度, 这也说明在最初对事件的选择不加太多限制是正确的, 较多的 5 级浅源地震保证了有效数据的数量。

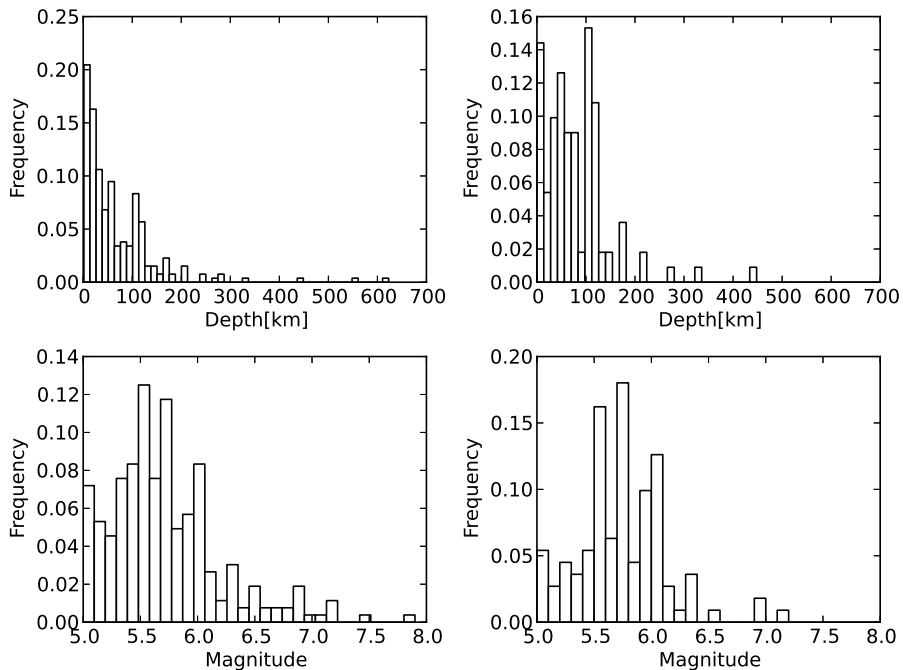


图 1.1 (a),(b) 分别为观测到 PKiKP 相位的事件和同时观测到 PcP 和 PKiKP 的事件随震源深度的分布;(c),(d) 分别为观测到 PKiKP 相位的事件和同时观测到 PcP 和 PKiKP 的事件随震级的分布。

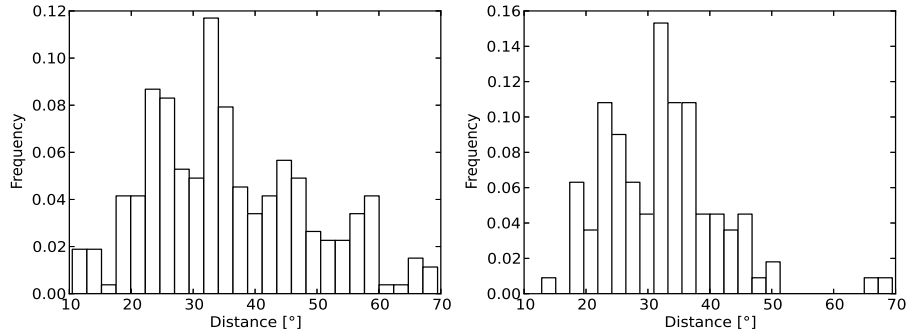


图 1.2 (a),(b) 分别为观测到 PKiKP 相位的事件和同时观测到 PcP 和 PKiKP 的事件随震中距的分布。

由于震源深度并不对 PKiKP 和 PcP 的可观测性产生较大影响, 因此可以很大程度上排除未观测到 PcP 但观测到 PKiKP 是上地幔结构的影响, 比如上地幔低速带对 PcP 振幅的衰减作用。这就更加强烈的暗示了核慢边界的性质是影响 PcP 相位观测的主要因素, 也说明了 CMB 结构对 PKiKP/PcP 振幅比也可能产生巨大影响。从观测和未观测到的 PcP 在 CMB 反射点的分布来看 (图 1.3), 即使在某个区域内, CMB 的性质也可能发生强烈变化 (即图中蓝色和红色的交替出现)。

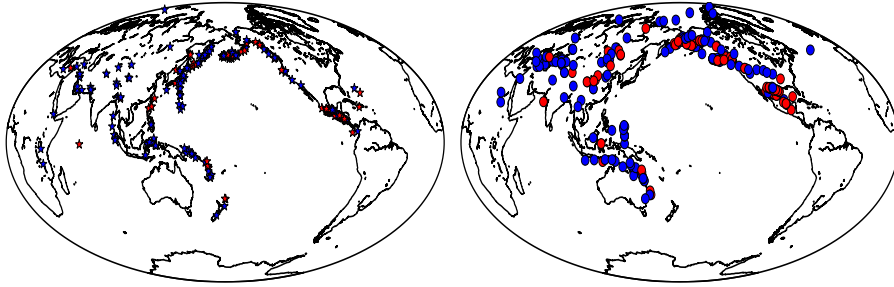


图 1.3 左图为地震事件的分布, 红色五角星表示同时观测到 PKiKP 和 PcP 的事件, 蓝色五角星表示仅观测到 PKiKP 的事件; 右图为 PcP 在 CMB 上的反射点分布, 红色圆圈表示同时观测到 PKiKP 和 PcP, 蓝色圆圈表示仅观测到 PKiKP 的反射点。

1.1 Local intensive variation of CMB property

之前的观测已经表明 CMB 的横向变化会产生异常大的 PKiKP/PcP 振幅比 (Koper and Pyle, 2004), 且是理论预期的振幅比的数倍。产生异常大的振幅比是因为 PcP 的振幅异常小, 即在由 CMB 反射的 PcP 的振幅受到很大的损失。可能的解释有 (1) 下地幔底部存在超低速带; (2) 核慢边界存在厚的转换带 (Garnero and Jeanloz, 2000)。当转换带的厚度接近入射波的波长的时候, 反射系数会剧烈减小 (Richards, 1972); (3) 核慢边界的地形起伏。地形起伏产生的聚焦和散焦效应会产生异常的 PcP 振幅 (Neuberg and Wahr, 1991)。很难用只用这三种解释中的一种来解释与理论振幅比相差达到十倍的观测数据, 因此异常的 PcP 振幅很可能是多种因素的共同的结果。图 1.4 和图 1.5 显示了 NVAR 台阵和

PDAR 台阵观测的 PK iKP/PcP 振幅比分别与 PcP、PKiKP 振幅的关系。NVAR 台阵数据中, PKiKP/PcP 震幅比和 PcP 的振幅显示出强烈的负相关, 而与 PKiKP 振幅则没有明显关系, 表明在 NVAR 数据采样到的 CMB 区域可能存在强烈的横向变化; 而对于 PDAR 台阵, 振幅比与 PcP 的相关性则略小, 但振幅比则普遍较 NVAR 台阵偏高, 可能在这部分数据采样的 CMB 性质横向变化较弱, 且采样区域可能位于低速带中。

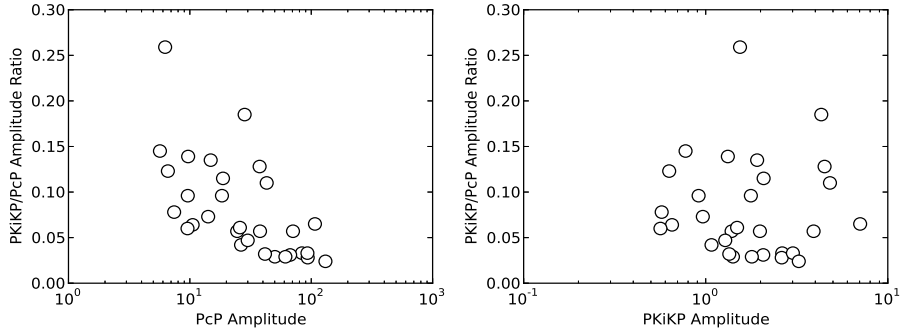


图 1.4 NVAR 台阵观测到的 PKiKP/PcP 振幅比和 PcP 振幅的关系, 其中 PcP 的振幅用对数坐标表示。

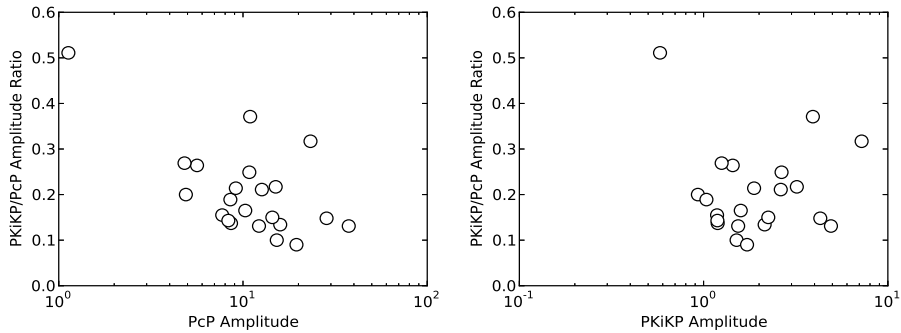


图 1.5 PDAR 台阵观测到的 PKiKP/PcP 振幅比和 PcP 振幅的关系, 其中 PcP 的振幅用对数坐标表示。

1.1.1 Varify CMB effects on Amplitude Ratio

在 111 对同时观测到较清晰的 PcP 和 PKiKP 的事件-台阵数据集中, 有 22 个地震事件被一个以上的 IMS 台阵记录到, 这就为检验核慢边界横向变化对 PKiKP/PcP 振幅比的影响提供了绝佳的条件。还是以 NVAR 和 PDAR 两个台阵为例, 在 22 个事件中由这两个台阵同时观测到的就有 10 个, 震中距都在 25° 以上, 且其中 7 个都在 $31-34^\circ$ 之间, 这些事件全都来自墨西哥—危地马拉的地震带, 震源位置都比较接近, 震源深度的差别也不是很大。这十个事件见表 1.1。通过对比可以发现, 不同台阵观测到的 PKiKP/PcP 振幅比可以有巨大的差别, 对有的事件 NVAR 和 PDAR 两个台阵观测到的振幅比差别竟然能达到 10 倍之多, 而且在后面的讨论中可以看出这绝不是偶然的情况, 在相同的观测频率下 (1-2Hz), 如此大的差别很难想象是由除 CMB 横向变化之外的其他因素所造成, 因为两个台阵到事件的震中距差别不大, NVAR 和 PDAR 也只相距 1000 公里, 同一事件在内

核的反射点在内核表面的距离也小于它们对应于 CMB 反射点的距离；对某些事件，两个台阵的观测的振幅比则极为接近，可能这部分事件的数据采样到 CMB 性质相近的区域。

n	Date	Hour	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude
1	2003/08/25	06:28:34.9	13.9932	-91.1255	99.5	5.9
2	2007/07/23	22:30:09.2	14.465	-90.906	115	5.5
3	2009/11/26	19:08:10.4	13.4767	-89.9617	48.5	5.9
4	2009/04/27	16:46:27.5	16.9557	-99.5717	31.7	5.8
5	2009/05/03	16:21:46.4	14.6199	-91.2025	113.9	6.3
6	2009/08/15	13:22:43.1	18.0998	-100.6157	61.2	5.5
7	2012/06/27	06:30:59.8	13.834	-89.967	132.6	5.7
8	2012/11/15	09:20:21.9	18.346	-100.382	53	6.1
9	2013/07/08	02:52:42.6	13.2316	-89.1292	55	5.7
10	2014/01/11	13:10:51.1	14.6437	-92.0592	78	5.5

表 1.1 同时观测到 PKiKP 和 PcP 的事件—台阵对数据中同时被 NVAR 和 PDAR 台阵观测到的 10 个事件。

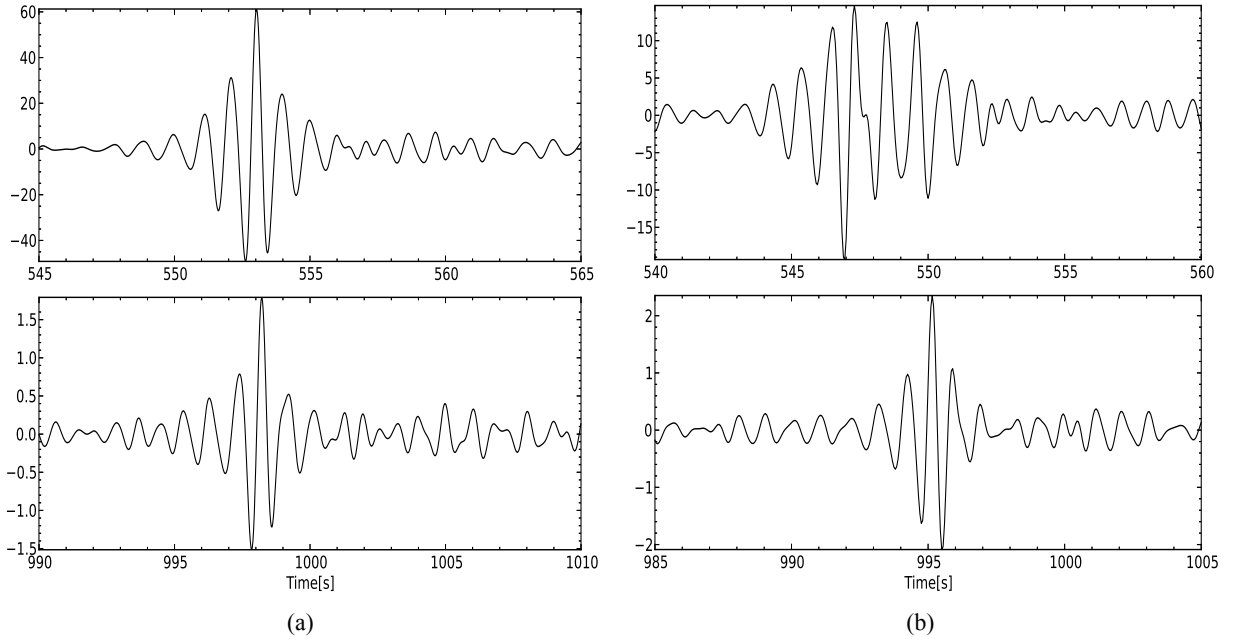


图 1.6 NVAR 和 PDAR 记录到的表 1.1 中事件 10 产生的 PKiKP 和 PcP 信号对比。波形均为每个台阵所有台站记录到的对应相位的最大振幅叠加后的结果。(a) 为 NVAR 台阵的记录，上为 PcP，下为 PKiKP；(b)PDAR 台阵的记录，上为 PcP，下为 PKiKP。

表 1.1 中的事件 10 产生的 PcP 在 NVAR 和 PDAR 台阵的记录中存在很大差别，而对于 PKiKP 相位两台阵之间的差别则很小(图 1.6)，使得两个台阵观测到的 PKiKP/PcP 振

幅比分别为 0.03 和 0.15；图 1.7 中则显示，对于事件 6，两台阵记录到相似的 PcP 和 PKiKP 波形，振幅比也很接近，分别为 0.145 和 0.143。

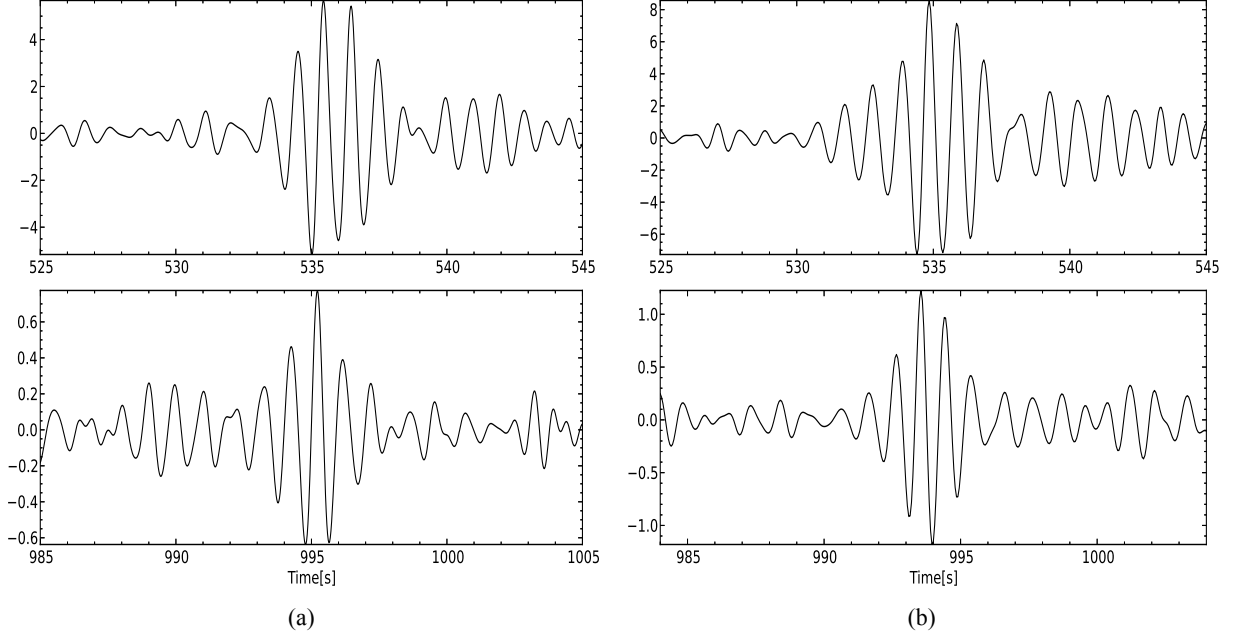


图 1.7 NVAR 和 PDAR 记录到的表 1.1 中事件 6 产生的 PKiKP 和 PcP 信号对比。波形均为每个台阵所有台站记录到的对应相位的最大振幅叠加后的结果。(a) 为 NVAR 台阵的记录，上为 PcP，下为 PKiKP；(b) PDAR 台阵的记录，上为 PcP，下为 PKiKP。

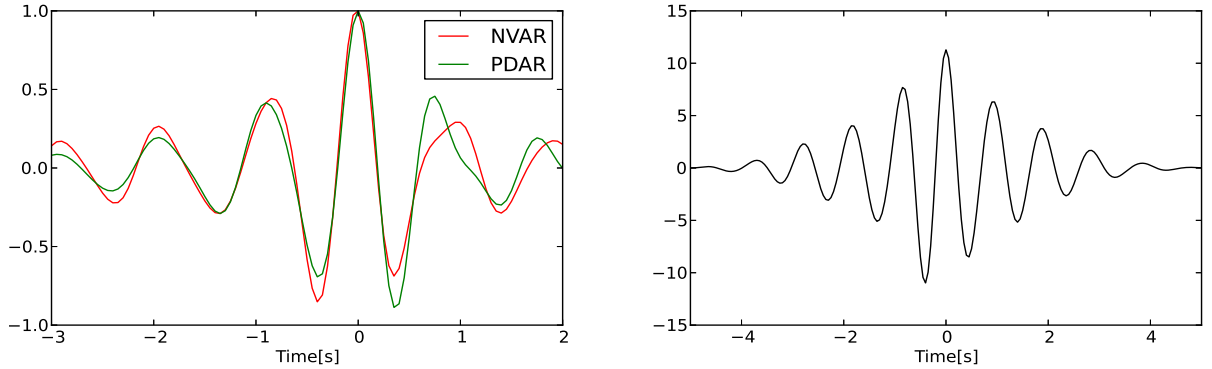


图 1.8 图 1.6 中的 PKiKP 波形比较，左边是将两个波形归一化后画在一起，按照各自的最大振幅对齐；右边是归一化后的 PKiKP 波形的互相关函数。可以看出两个台阵记录到的 PKiKP 波形相似度非常高，最大互相关值在两个波形的最大振幅处取得。

从图 1.6 中可以发现，NVAR 和 PDAR 记录到的 PKiKP 信号均很清晰，不仅振幅很接近，而且波形也很相似，由于是同一地震产生的同一震相，这也是完全符合预期的。但两台阵记录到的 PcP 信号却大不相同，NVAR 记录中的 PcP 清晰尖锐，和 PKiKP 具有相似性，图 1.8 是两个 PKiKP 波形的互相关；PDAR 记录中的 PcP 前半部分和 NVAR 记录到的 PcP 略有相似性，但后半部分还有别的信号成分，并且 PcP 振幅只有前者的五分之

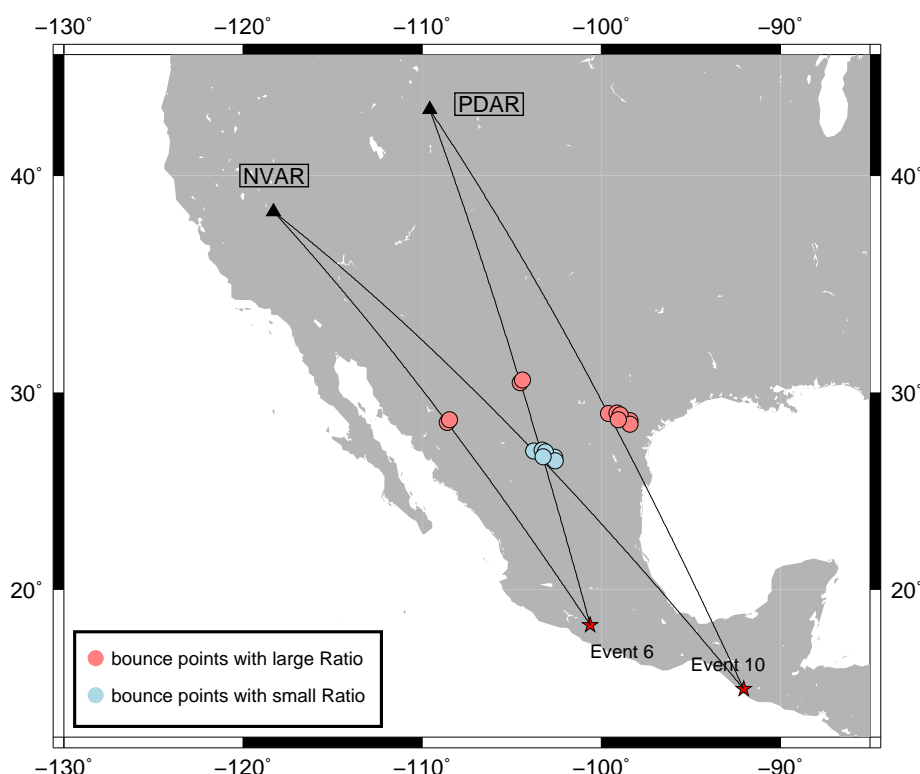


图 1.9 NVAR、PDAR 台阵和表 1.1 中所有事件的 PcP 的 CMB 反射点位置。事件仅画出 6 和 10，对于其余事件仅画出反射点。红色对应较大的 PKiKP/PcP 振幅，蓝色对应较小的 PKiKP/PcP 振幅。事件 10 的 PcP 在 CMB 反射点的距离约 245km，PKiKP 在 ICB 的反射点距离约 85km。

一左右。异常小的 PcP 振幅和复杂的 PcP 波形揭示了 PcP 在 CMB 反射点区域存在复杂的结构特征和强烈的横向变化。很早就有研究发现了来自核慢边界的 PKP 前驱波，这些前驱波被认为是来自核慢边界散射 (Bataille and Flatté, 1988)，散射体的来源可能有 (1) 热边界层；(2) 化学边界层，即比地幔密度大但比外核密度小的物质沉积在 CMB 上或在 CMB 附近地幔物质和外核物质发生了化学反应形成残留在 CMB 的不均匀体；(3) CMB 地形的不规则，正如之前提到的，CMB 地形的起伏也会减弱反射的 PcP 振幅。后续又有很多研究发现了支持 CMB 存在强烈散射的证据，比如 PKKP 前驱波的研究 (Rost and Earle, 2010) 等。图 1.6 中 PDAR 台阵记录到的复杂 PcP 波形可能是在 CMB 散射的结果。

再通过对比图 1.6 和图 1.7，它们对应的两个事件的震级相同均为 5.5，震源深度也仅差 10km，可以发现：(1) 对于两个事件，NVAR 记录到的 PcP 振幅则相差 10 倍，PKiKP 振幅只有两倍的差别；(2) 事件 6 的两个台阵记录的 PcP 振幅与 PDAR 记录到的事件 10 的 PcP 振幅相近。(3) 对于两个事件，PcP 在 CMB 的反射点距离在 200-250km 之间，PKiKP 在 ICB 的反射点只有 80-90km。综合这三点可以推测，对于事件 6，PcP 在核慢边界的反射点可能位于低速带内，虽然台阵到两个事件的震中距有所差别，且射线路径也不一样，但这些差别不足以解释观测到的巨大的 PcP 振幅差异和 PKiKP 振幅大小的相似性。

参考文献

- Bataille, K. and Flatté, S. M. (1988). Inhomogeneities near the core-mantle boundary inferred from short-period scattered PKP waves recorded at the Global Digital Seismograph Network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B12):15057–15064.
- Garnero, E. J. and Jeanloz, R. (2000). Fuzzy patches on the Earth's core-mantle boundary? *Geophysical Research Letters*, 27(17):2777–2780.
- Koper, K. D. and Pyle, M. L. (2004). Observations of PKiKP/PcP amplitude ratios and implications for Earth structure at the boundaries of the liquid core. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 109(B3).
- Neuberg, J. and Wahr, J. (1991). Detailed investigation of a spot on the core mantle boundary using digital PcP data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 68(1–2):132–143.
- Richards, P. G. (1972). *Seismic waves reflected from velocity gradient anomalies within the Earth's upper mantle*. publisher not identified.
- Rost, S. and Earle, P. S. (2010). Identifying regions of strong scattering at the core–mantle boundary from analysis of PKKP precursor energy. *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3–4):616–626.