



1922—2022

LLSVPs 与全球热点空间叠置性再分析

党牛^{1,2)}, 余星^{2,3)}, 胡航^{2,3)}, 许绪成²⁾, 何虎²⁾, 余娅娜²⁾

1) 福建师范大学地理科学学院, 福建福州, 350007;

2) 自然资源部海底科学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 浙江杭州, 310012;

3) 浙江大学海洋学院, 浙江舟山, 316021

内容提要:地震层析成像显示在非洲和太平洋之下的核幔边界处(~ 2800 km)存在两个大型低剪切波速省(LLSVPs), 分别被命名为 Tuzo 和 Jason, 指示温度或成分的异常。前人通过研究发现, 大火成岩省喷发的古位置以及现今活动热点位置多位于 LLSVPs 边界 $\pm 10^\circ$ 附近。由此, 基于空间相关性, 将 LLSVPs 狭窄的边界视为地幔热柱生成区, 广泛用于解释地幔柱与热点的成因。但是, 将一个深度 2800 km 的地球物理异常与地表热点建立联系, 仍存在诸多不确定性。而且 LLSVPs 作为全球尺度的异常区, 在地表的映射范围巨大, 不可避免地大量热点存在天然的空间叠置性, 这种空间关联的程度以及是否具有成因联系仍然未知。本文考虑随机状态下热点落入 LLSVPs 范围的概率, 对全球热点与 LLSVPs 边界重新进行空间分析, 判断两者之间的空间叠置性。统计结果显示, 全球热点与 LLSVPs 边界的空间相关性不及预期, Tuzo 和 Jason 之间存在较大差异, Jason 与热点缺乏空间位置相关性, 而 Tuzo 与热点空间相关性较强。热点的分布与成因可能并不完全受控于 LLSVPs。研究结果对普遍认为的 LLSVPs 与热点分布之间的强相关性提出质疑, 在具体的热点和地幔柱成因研究中, 不能盲目认为热点与 LLSVPs 有关, 而需要更加审慎的关注地质事实本身。

关键词: LLSVPs; 全球热点; 热柱生成区; 地幔柱; 空间相关性

大型低剪切波速省 (large low shear-wave velocity provinces, LLSVPs) 最先由 Dziewonski et al. (1977) 提出, 是指利用地震层析成像技术在非洲与太平洋底部核幔边界处发现的两个大型地震剪切波低速异常区 (Garnero et al., 2007; 贺日政等, 2010; 黄川, 2017)。Burke et al. (2004) 发现大火成岩省 (large igneous provinces, LIPs) 原始喷发位置多位于 LLSVPs 上部, 由此认为大火成岩省可能起源于 LLSVPs, 但结论也受到较多质疑 (Anderson et al., 2005)。Torsvik et al. (2006) 发现了深源热点与 LLSVPs 亦存在空间位置相关性, 并指出若以 SMEAN 模型 -1% 速度异常等值线作为 LLSVPs 的边界, 大多数 LIPs 与深源热点均位于 -1% 等值线 $\pm 10^\circ$ 范围内, 改变了之前认为地幔柱起源于 LLSVPs 内部的结论, 将深源热点与地幔

柱和 LLSVPs 边界联系起来。Burke et al. (2008) 将 LLSVPs 的 -1% 速度异常边界附近一定范围命名为热柱生成区 (plume generation zones, PGZs), 认为地幔柱和深源热点从此处产生, 并推测 LLSVPs 位置具有长期稳定性, 将非洲底部低速异常区命名为 Tuzo, 太平洋底部低速异常区命名为 Jason。

之后, LLSVPs 和 PGZ 假说被广泛应用于地幔柱和深源热点的成因研究中 (Deschamps et al., 2012; Cottaar et al., 2013; Burke et al., 2014; Torsvik et al., 2014; Tanaka et al., 2015; Huang Chuan et al., 2015, 2020; Niu Yaoling, 2018, 2020; Bono et al., 2019; Thomson et al., 2019; Heyn et al., 2020; Wei Bitian et al., 2020; 李献华, 2021; Jackson et al., 2021; Koppers et al.,

注: 本文为国家重点研发计划课题 (编号 2021YFF0501301)、国家自然科学基金项目 (编号 41872242, 42172231) 和自然资源部第二海洋研究所基本科研业务费专项 (编号 QNRC2202) 联合资助的成果。

收稿日期: 2022-06-30; 改回日期: 2022-09-27; 网络发表日期: 2022-12-23; 责任编辑: 李明。

作者简介: 党牛, 男, 1997 年生。博士研究生, 海洋地质专业。E-mail: dangniu@stu.cdut.edu.cn。通讯作者: 余星, 男, 1981 年生。研究员, 主要从事岩石大地构造学研究。E-mail: yuxing@sio.org.cn。

引用本文: 党牛, 余星, 胡航, 许绪成, 何虎, 余娅娜. 2022. LLSVPs 与全球热点空间叠置性再分析. 地质学报, 96(12): 4140~4148, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022304.

Dang Niu, Yu Xing, Hu Hang, Xu Xucheng, He Hu, Yu Yana. 2022. Reanalysis of the spatial correlations between LLSVPs and the global hotspots. Acta Geologica Sinica, 96(12): 4140~4148.

2021)。但是将一个 2800 km 深度的地球物理异常与地表热点建立联系,存在诸多不确定性。在层析成像剖面图上,除了少数深源热点能够直接联系 LLSVPs 和地表特征外,大部分热点并未显示有从地表到核幔边界的连续层析成像异常。换言之,即使空间上相关,两者也未有直接的地球物理证据显示其垂向连通性。此外,LLSVPs 边界 $\pm 10^\circ$ 的缓冲区占地球表面积的 32%,即热点与 LLSVPs 的基础重叠率达 32%,不容忽视。因此,热点与 LLSVPs 的空间重叠性及成因关联性仍有待深入的研究,而空间叠置性是所有假说的前提,需要更多的统计学工作检验(Anderson et al., 2005; Austermann et al., 2014)。Austermann et al. (2014)和 Davies et al. (2015)基于蒙特卡洛统计检验认为 LIPs 与 LLSVPs 空间相关性不大,且 Tuzo 和 Jason 两个区存在明显差别,Tuzo 区与热点相关性较好的原因与 Tuzo 扁长的几何形态有关。本文避繁就简,采用最直接的点与面的空间拓扑关系分析,考虑随机状态下热点落入 LLSVPs 范围的概率,重新分析了全球热点与 LLSVPs 区域及边界的空间相关关系,认为二者的相关程度并没有预想的置信度高,对于热点与 LLSVPs 关系的研究仍有待新的观测技术和资料的补充。

1 数据来源

地幔柱活动相关的地表证据包括 LIPs、热点及金伯利岩等(Torsvik et al., 2008, 2010, 2016),而其中的活动热点是最直接的证据,代表了现今地下某一深度的地幔异常,包括温度异常或物质组成异常。LIPs 和金伯利岩绝大部分为地质历史时期的产物,需要古地理恢复到其原始喷发位置,才能与相应的深部地幔柱相匹配(Zhao Dapeng, 2001)。为避免古地理恢复的不确定性和多解性,仅选取活动热点数据与 LLSVPs 空间位置进行相关性分析。

1.1 热点数据来源

关于全球热点的分布,各统计数据略有差异。Wilson(1973)根据地形、地球化学和重力异常等数据,共识别出全球 66 个热点;Vogt(1981)在前人研究基础上,重点考虑非洲板块中部非克拉通区域的活动热点,最终数据集共包含 117 个热点;Steinberger(2000)排除了俯冲带与亚洲区域,热点个数为 44;Zhao Dapeng (2007)调查的热点与 Steinberger(2000)基本一致,另增加了亚洲区域热

点,最终数据集包含 60 个热点;Torsvik et al. (2006)考虑到研究对象是深部 2800 km 的 LLSVPs,为尽可能减少浅源热点和陆内减压熔融热点对分析结果的干扰,使用 Steinberger(2000)数据集,进行热点与 LLSVPs 空间位置关系分析。本文为了方便与前人研究结果进行对比,选择 Steinberger(2000)数据集进行空间叠置性分析,用 Zhao Dapeng(2007)的 60 个热点作对比参照(表 1, 图 1)。

1.2 LLSVPs 模型

Dziewonski et al. (1977)使用层析成像数据发现在核幔边界处存在大范围的地震波速异常,推测为横向尺度小于 5000 km 的异常体引起,这应当是 LLSVPs 概念的雏形(黄川, 2017)。后续 Dziewonski et al. (1984)和 Castillo(1988)的层析成像数据进一步证实了核幔边界大型低速异常区的存在。之后,各种全球层析成像模型不断涌现,如 NGRAND、S20RTS、SB4L18 等,对地球深部圈层结构进行更准确地约束(Ritsema et al., 1999; Kárasón et al., 2000; Ni Sidao et al., 2002; Romanowicz et al., 2002)。

但由于数据处理方式以及建模方法不同,不同模型的结果存在较大的差异,Becker et al. (2002)将 NGRAND、S20RTS 和 SB4L18 模型加权平均获得了综合的 SMEAN 模型,弱化了各模型间的差异,而汇集了各模型的优点,被后续研究广泛采用。Torsvik et al. (2006)将 SMEAN 模型的一 1% 速度等值线视为 LLSVPs 边界。本文为方便对比,采用 SMEAN 模型来指示 LLSVPs,利用一 1% 速度等值线作为 LLSVPs 边界(图 1)。

2 分析方法

基于全球热点数据和 LLSVPs 边界的 SMEAN 模型,利用 ArcGIS 软件提取 SMEAN 模型的一 1% 速度异常为 LLSVPs 边界,并建立其不同宽度的缓冲区(图 1)。前人常选择 $\pm 10^\circ$ 为 LLSVPs 边界的缓冲区范围(Torsvik et al., 2006, 2010; Burke et al., 2008, 2011),为方便对比,本研究重点讨论 $\pm 10^\circ$ (约 1000 km)的范围的 LLSVPs 边界与全球热点的空间相关性。另一方面, $\pm 10^\circ$ 范围的选择本身并不具有特别的地质意义,因此同时考虑了 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 的缓冲区情况。

通过统计全球热点与缓冲区的空间叠置性,分析热点与 LLSVPs 边界是否存在空间相关性。落

表 1 全球热点数据集
Table 1 The dataset of the global hotpots

热点	简称	经度(°E)	纬度(°N)	邻近 LLSVP 分区	热点与 LLSVPs 最短距离(km)	数据来源
Baja/Guadelupe	BJ	−113	27	Jason	3455.22	1/2
Bowie	BO	−135	53	Jason	5979.11	1/2
Caroline	CA	164	5	Jason	1164.71	1/2
Changbai	CB	128.1	42	Jason	5470.44	2
Cobb	CO	−130	46	Jason	5104.24	1/2
Datong	DT	113.3	40	Jason	6145.5	2
East Australia	AU	143	−38	Jason	3111.49	1/2
Easter	EI	−109.3	−27.1	Jason	47.36	1/2
Galapagos	GA	−91.5	−0.4	Jason	750.58	1/2
Hainan	HN	110.3	20	Jason	3802.8	2
Hawaii	HI	−155.3	19.4	Jason	55.05	1/2
Juan Fernandez	JF	−82	−33.5/−34	Jason	1806.26	1/2
Lord Howe	LH	159	−32/−33	Jason	1156.17	1/2
Louisville	LV	−138	−51	Jason	2407.03	1/2
MacDonald	MD	−140.2	−29	Jason	801.99	1/2
Marquesas	MQ	−138	−11	Jason	614.15	1/2
Pitcairn	PC	−130.1/−129	−25	Jason	510	1/2
Raton	RT	−104	37	Jason	4711.85	1/2
Samoa	SM	−168	−15	Jason	374.66	1/2
San Felix	SF	−80	−26	Jason	1432.07	1/2
Socorro	SI	−111	18.7	Jason	2514.19	1/2
Tahiti	TH	−148.1	−17.9	Jason	1548.51	1/2
Tasmania	TM	156	−39	Jason	2419.17	1/2
Tengchong	TC	98.5	25.3	Jason	5283.07	2
Wudalianchi	WC	126.1	48.7	Jason	6641.3	2
Yellowstone	YS	−110.5	44.6	Jason	5560.88	1/2
St Helena	SH	−10	−18	Tuzo	746.97	1
Afar	AF	42	12	Tuzo	1163.5	2
Amsterdam	AD	77.5	−38	Tuzo	171.6	2
Arnold	AR	−25	−18	Tuzo	555.91	2
Ascension	AS	−15	−8	Tuzo	177.42	2
Azores	AZ	−28.4	38.5	Tuzo	710.32	1/2
Balleny	BI	163.3	−66.8	Tuzo	3229.54	1/2
Bermuda	BM	−65	32	Tuzo	3268.2	2
Bouvet	BV	3.5	−54.5	Tuzo	505.19	2
Cameroon	CR	9.2	4.2	Tuzo	221.44	1/2
Canary	CY	−18	28	Tuzo	617.76	1/2
Cape Verde	CV	−24	15	Tuzo	4.55	1/2
Comores	CM	43.3	−11.8	Tuzo	785.36	1/2
Crozet	CT	52	−47	Tuzo	575.53	2
Darfur	DF	24	13	Tuzo	43.02	1/2
Discovery	DC	0	−42	Tuzo	651.89	2
East Africa	AF	34	6	Tuzo	165.17	1/2
Eifel	EL	7	50	Tuzo	1550.99	1/2
Fernando	FD	−32.5/−32	−4	Tuzo	1507.68	1/2
Hoggar	HG	6	23	Tuzo	386.66	1/2
Iceland	IL	−19	65	Tuzo	2127.52	1/2
Jan Mayen	JM	−8.2	71.1	Tuzo	2700.88	1/2
Kerguelen	KG	69	−49	Tuzo	780.37	1/2
Lake Victoria	LV	36	−3	Tuzo	109.82	2
Madeira	ME	−17	33	Tuzo	395.52	2
Marion	MI	37.8	−46.9	Tuzo	454.04	1/2
Meteor	MT	1	−52	Tuzo	289.11	1/2
Mt. Erebus	ME	167	−78	Tuzo	1948.75	2
New England	NE	−28/−32	30/28	Tuzo	204.48	1/2
Reunion	RU	55.7	−21.2	Tuzo	210.43	1/2
St. Mayen	SM	−6	−16	Tuzo	1194.66	2
Tibesti	TB	17	21	Tuzo	166.78	1/2
Trindade	TD	−28.8	−20.5	Tuzo	966.68	1/2
Tristan	TT	−14/−11	−37/−38	Tuzo	51.61	1/2
Vema	VM	8.5/4	−31.5/−33	Tuzo	1878.95	1/2

注:数据来源 1 表示来自 Steinberger(2000),2 表示来自 Zhao Dapeng(2007),1/2 表示共有;粗体表示深源热点;热点与 LLSVPs 最短距离为热点与低速异常区−1%速度等值线(映射到地表)的欧式距离,即地表最短直线距离。

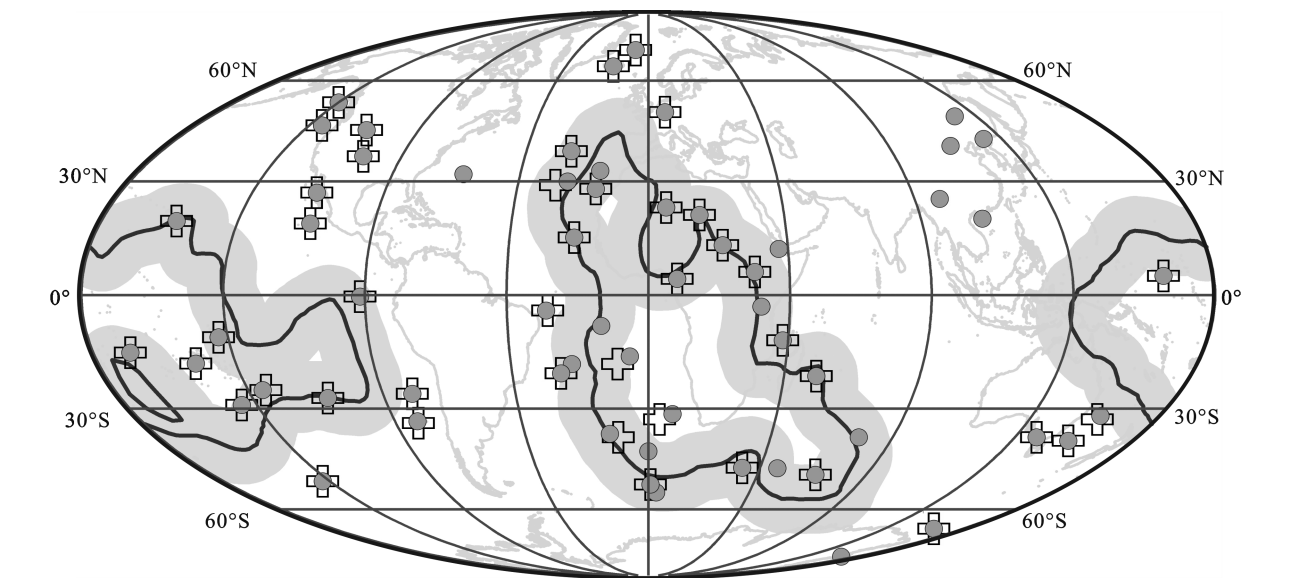


图 1 全球热点与 LLSVPs 空间位置分布图

Fig. 1 The locations of the global hotspots and LLSVPs

黑色粗曲线指示 SMEAN 模型-1%速度异常等值线(LLSVPs 边界),灰色阴影区域指示±10°缓冲区范围,灰色圆点表示 Zhao Dapeng (2007)热点数据,白色十字指示 Steinberger(2000)热点数据,投影方式为 Mollweide

The thick black line indicates the -1% contour of velocity anomaly of SMEAN model, i. e. the margins of LLSVPs; the shaded grey area indicates the ±10° buffer zones of the LLSVPs' margin; the grey dots show the location of hotspots from Zhao Dapeng (2007), the white crosses indicate the location of hotspots from Steinberger (2000); projection in Mollweide

入缓冲区的热点数占全部热点数的比例为“重叠率”,当重叠率>60%时,认为可能存在相关性,而反之则排除两者的相关性。但 LLSVPs 是全球尺度的地幔异常体,两个 LLSVPs±10°缓冲区的地表投影面积之和约 $1.62\times10^8\text{ km}^2$,约占据全球表面积的 32%。即在随机条件下,32%的热点也可能会出现缓冲区内。考虑热点与缓冲区的空间相关性强度时,需要充分考虑随机条件下的基础重叠率(LLSVPs 缓冲区面积与地球表面积的比值)。去除基础重叠率的影响,可以使用“叠置指数”来评估二者的相关性公式(1)。

叠置指数=重叠率-基础重叠率 (1)

叠置指数值越大,表明扣除基础重叠率外,依然有较多热点与缓冲区重叠,热点与 LLSVPs 空间相关性较强。反之,则空间相关性不明显。对于±10°缓冲区,若叠置指数大于 0.32,即热点与缓冲区的实际重叠率达到基础重叠率的两倍,表明两者的空间相关性较强。

此外,针对热点起源深度的不同,在分析全球热点的基础上,着重分析了深源热点与 LLSVPs 的空间叠置情况。同时,对太平洋和非洲两个 LLSVPs 分区 Jason 和 Tuzo 分别进行了空间叠置分析。

3 结果

3.1 热点与 LLSVPs 边界空间相关性

基于 Steinberger 热点数据,24 个热点位于 LLSVPs 边界±10°缓冲区内,重叠率为 55%,叠置指数 0.23(表 2),重叠率和叠置指数均小于预期(>60%,>0.32),因此相关性强度一般。基于 Zhao 热点数据的统计结果与此类似。

若以 LLSVPs 边界±2°、±5°为缓冲区,重叠率在 18%~35%,明显小于 60%,相关性较差。以±15°为缓冲区时,重叠率虽然均大于 60%,但移除基础概率 44%后,叠置指数为 0.21~0.26,明显小于预期,与随机分布相差不大(图 2)。

表 2 全球热点与 LLSVPs 边界缓冲区重叠率

Table 2 The overlap rate between global hotspots and the buffer zones of LLSVPs' margin

热点数据源	评估指标	缓冲区范围			
		±2°	±5°	±10°	±15°
Steinberger (2000)热点 (n=44)	重叠率	18%	34%	55%	70%
	叠置指数	0.11	0.17	0.23	0.26
Zhao Dapeng (2007)热点 (n=60)	重叠率	22%	35%	52%	65%
	叠置指数	0.15	0.18	0.20	0.21

注:±2°、±5°、±10°、±15°缓冲区的基础重叠率分别为 7%,17%,32%,44%。

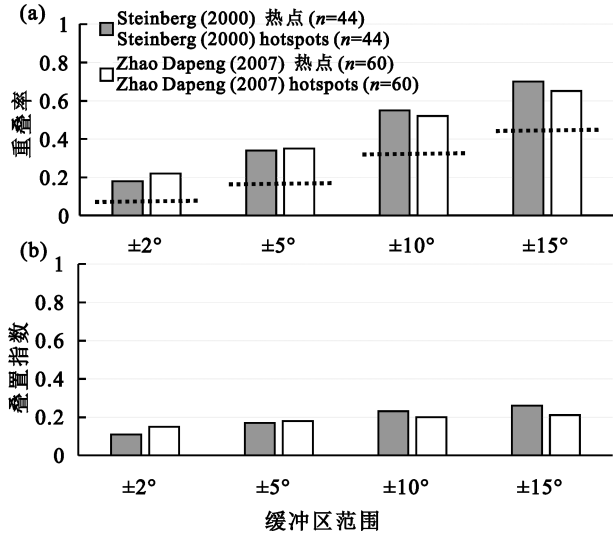


图 2 全球热点与 LLSVPs 边界的重叠率及叠置指数

Fig. 2 Spatial correlation between global hotspots and the different buffer zones of LLSVPs' margin
虚线为各缓冲区基础重叠率

The dashed line is the basic overlapping rate of each buffer zone

3.2 深源热点与 LLSVPs 空间位置相关性

Steinberger 深源热点共有 11 个(图 3),其中 8 个位于 LLSVPs 边界 $\pm 10^{\circ}$ 缓冲区内部,重叠率为 73%,叠置指数 0.41(表 3),重叠率和叠置指数均较好($>60\%$, >0.32),相关性较强。但作为对照组

的 Zhao 深源热点,重叠率仅为 43%,叠置性指数为 0.11,二者相关性较弱(表 3)。这可能与两者对深源热点的判别标准不同有关。

若以 LLSVPs 边界 $\pm 2^{\circ}$ 、 $\pm 5^{\circ}$ 和 $\pm 15^{\circ}$ 为缓冲区,移除基础重叠率后,Steinberger 热点的叠置指数在 0.29~0.41 之间,而 Zhao 热点仅为 0.11~0.22 之间,两者差异明显(图 4)。因此深源热点与 LLSVPs 的相关性也存在很大争议。

表 3 深源热点与 LLSVPs 边界缓冲区重叠率

Table 3 The overlapping rate between deep origin hotspots and the buffer zones of LLSVPs' margin

热点数据源	评估指标	缓冲区范围			
		$\pm 2^{\circ}$	$\pm 5^{\circ}$	$\pm 10^{\circ}$	$\pm 15^{\circ}$
Steinberger(2000)	重叠率	36%	55%	73%	82%
	叠置指数	0.29	0.38	0.41	0.38
Zhao Dapeng (2007)	重叠率	29%	29%	43%	64%
	叠置指数	0.22	0.12	0.11	0.2

3.3 Jason 和 Tuzo 分区与热点的空间相关性

LLSVPs 的两个分区 Jason 和 Tuzo 与邻近的热点具有明显不同的空间叠置关系。Jason 边界的 $\pm 10^{\circ}$ 缓冲区内部,热点重叠率仅为 27%~33%,叠置指数-0.05~0.01(表 4)。其他 $\pm 2^{\circ}$ 、 $\pm 5^{\circ}$ 、 $\pm 15^{\circ}$ 缓冲区的情形相似,表明热点与 Jason 分区不具有

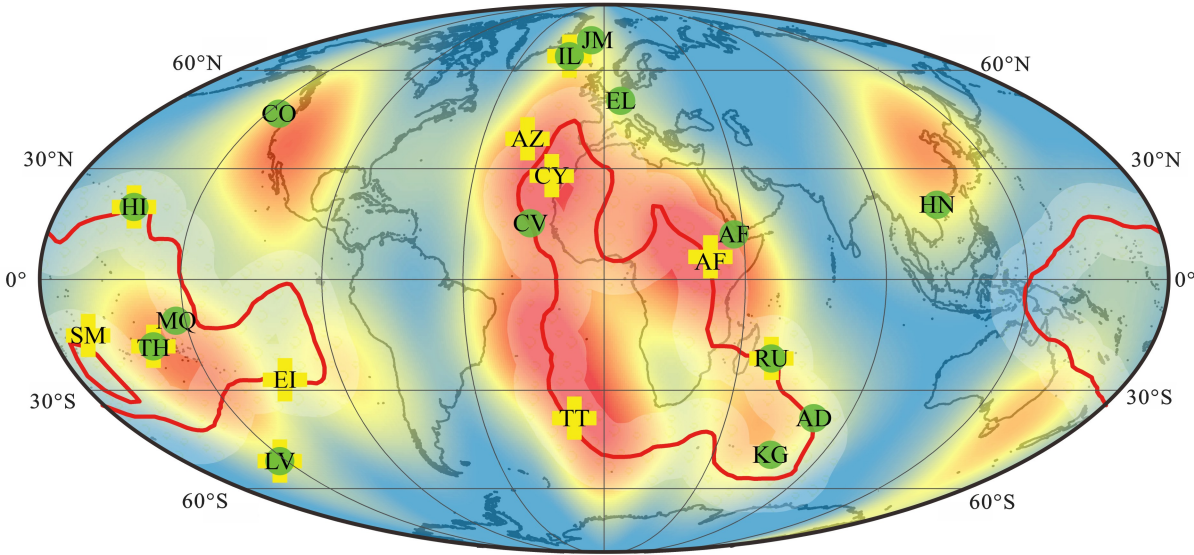


图 3 深源热点与 LLSVPs 边界 $\pm 10^{\circ}$ 缓冲区关系图

Fig. 3 The spatial correlation of the deep origin hotspots and $\pm 10^{\circ}$ buffer zone of LLSVPs' margin

红色实线为 LLSVPs 边界,灰色区域为缓冲区范围,黄色十字图标表示 Steinberger(2000)深源热点位置,绿色圆形图标表示 Zhao Dapeng (2007)深源热点位置;字母缩写表示热点名称,详见表 1;底图为表 1 全部热点密度图,红色为热点高密度区,蓝色为低密度区

The red line indicates the LLSVPs' margin. The grey area indicates the buffer zones of the margin. The yellow crosses indicate the location of deep origin hotspots from Steinberger(2000), while the green circles indicate those from Zhao Dapeng(2007); the abbreviations for the hotspots can be found in Table 1; the background is the density map of global hotspots, in which the red indicates the high density, and the blue is low

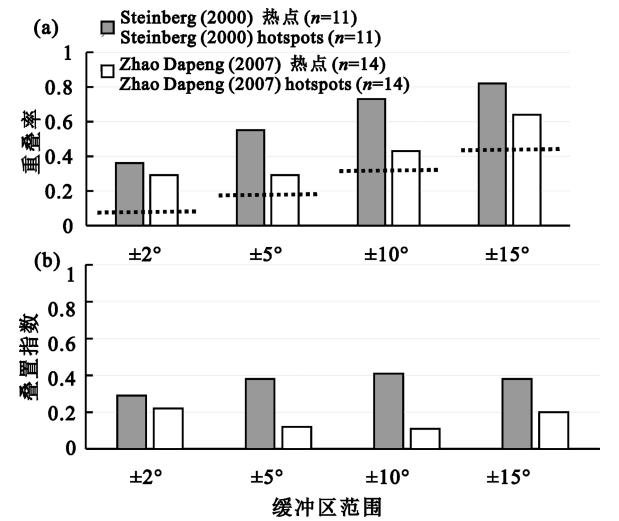


图 4 深源热点与 LLSVPs 边界的重叠率及叠置指数
Fig. 4 Spatial correlation between deep origin hotspots and the different buffer zones of LLSVPs' margin
虚线为各缓冲区基础重叠率
The dashed line is the basic overlapping rate of each buffer zone

空间相关性。深源热点的重叠率略有提升,但仍然低于预期,不能指示两者的相关性。

表 4 热点与 Jason 分区重叠率及叠置指数
Table 4 The overlapping rate of hotspots with Jason subdivision

热点类型	热点数据源	评估指标	缓冲区范围			
			±2°	±5°	±10°	±15°
全部热点	Steinberger(2000) (n=21)	重叠率(%)	10	19	33	52
		叠置指数	0.03	0.02	0.01	0.08
	Zhao Dapeng (2007) (n=26)	重叠率(%)	8	15	27	42
		叠置指数	0.01	0.01	-0.05	-0.02
深源热点	Steinberger(2000) (n=5)	重叠率(%)	40	60	60	80
		叠置指数	0.33	0.43	0.28	0.36
	Zhao Dapeng (2007) (n=6)	重叠率(%)	17	17	33	50
		叠置指数	0.1	0	0.01	0.06

注:Jason、Tuzo 分区分布于两个半球,面积基本相等,其±2°、±5°、±10°、±15°缓冲区的基础重叠率与全球 LLSVPs 相当,分别近似为 7%、17%、32%、44%。下同。

Tuzo 边界的±10°缓冲区内部,热点重叠率为 71%~74%,叠置指数 0.39~0.42(表 5)。若缓冲区扩大到±15°,则重叠率更高。不同缓冲区情况下,重叠效率均明显好于 Jason 分区,表明热点与 Tuzo 分区具有良好的空间相关性。深源热点与 Tuzo 的空间相关性同样显著(表 5)。

4 讨论

4.1 热点与 LLSVPs 的空间关系

研究结果表明,热点与 LLSVPs 的空间位置相关性存在诸多不确定性。根据已有的热点数据,其

表 5 热点与 Tuzo 分区重叠率及叠置指数
Table 5 The overlapping rate of hotspots with Tuzo subdivision

热点类型	数据数据源	评估指标	缓冲区范围			
			±2°	±5°	±10°	±15°
全部热点	Steinberger(2000) (n=23)	重叠率(%)	26	48	74	87
		叠置指数	0.19	0.31	0.42	0.43
	Zhao Dapeng (2007) (n=34)	重叠率(%)	32	50	71	82
		叠置指数	0.25	0.33	0.39	0.38
深源热点	Steinberger(2000) (n=23)	重叠率(%)	33	50	83	83
		叠置指数	0.26	0.33	0.51	0.39
	Zhao Dapeng (2007) (n=34)	重叠率(%)	38	38	50	75
		叠置指数	0.31	0.21	0.18	0.31

与 LLSVPs 边界的空间相关性明显小于预期,重叠率不足 60%,若考虑随机条件下的基础重叠率,两者的相关性更弱。深源热点总体上相关性略有提升,但仍然不及预期,并且对深源热点本身的定义和判别存在很大分歧。因此,简单的认为全球热点分布与 LLSVPs 空间相关的观点值得质疑。

Jason 和 Tuzo 作为 LLSVPs 的两个分区,与邻近热点具有明显不同的空间叠置关系。Jason 边界与热点不具有空间相关性,而 Tuzo 分区与热点相关性较强。Burke et al. (2004)认为太平洋板块的高速移动使部分 LIP 受到破坏,造成了 Jason 与 LIPs 之间空间相关性较弱。Davies et al. (2015)通过蒙特卡洛模拟发现,热点和 LIPs 与 Jason 并不具有空间相关性,而与 Tuzo 相关性较好。因此在进行 LLSVPs 相关研究中,应将 Tuzo 和 Jason 区别对待。

4.2 LLSVPs 边界选择的不确定性

目前较公认的 LLSVPs 范围是基于 SMEAN 层析成像模型,选择-1%速度异常等值线为边界(Burke et al. , 2004; Torsvik et al. , 2006)。而 SMEAN 模型是通过 NGRAND, S20RTS 和 SB4L18 三种全球层析成像模型的加权平均而得出(Becker et al. , 2002)。虽然加权计算突出了深部地幔的异常特征,但同时忽略了各模型间的细节差异,并且模糊了模型的地质意义。

Torsvik et al. (2006)根据速度异常变化率,选择-1%速度异常值作为 LLSVPs 边界,有一定的合理性,但-1%速度异常等值线与变化率极值并非完全对应。并且 SMEAN 模型的-1%速度异常本身所指征的地质意义仍有待进一步研究。

此外,在评判 LLSVPs 与热点空间关系时,其相关性强度与边界的缓冲区宽度有关。缓冲区宽度大,占据面积大,落入的热点数增多,则相关性较高;

而宽度缩小,则相关性减弱。因此,缓冲区宽度的选择对热点与 LLSVPs 相关性强度起了决定作用,降低了两者之间本身的统计意义。简单地讨论热点与某一特定宽度 LLSVPs 边界的相关性,不能让人信服,需要明确 LLSVPs 边界宽度的选择依据及地质意义。

4.3 深部异常与地表响应

LLSVPs 是地震层析成像揭示的核幔边界大型低速异常区,位于 2800 km 深度,而热点和 LIPs 是地幔柱在地表的岩浆表现。将一个深度 2800 km 的地球物理异常与地表热点建立联系,本身存在诸多不确定性。

理论上,如果所有地幔柱起源于核幔边界,则热点与 LLSVPs 存在相关性的概率将增大。但事实上,很多热点并未显示有从核幔边界到地表的连续层析成像异常(Zhao Dapeng, 2007; He Yumei et al., 2009)。这为讨论热点与 LLSVPs 的相关性提出了挑战。

另一方面,即使空间位置上存在一定的相关性,如 Tuzo 分区及其附近的热点,但仍缺少证据支持两者之间的成因联系。需要借助更多的深部观测数据和地表探查资料,来证实地表与深部的直接联系。

5 结论

在考虑随机状态热点落入 LLSVPs 范围的基础概率后,重新判断全球热点与 LLSVPs 边界的空间关联性及置信度。结果显示,热点与 LLSVPs 边界的空间相关性强度一般,Tuzo 和 Jason 之间存在较大差异,Jason 与热点缺乏空间位置相关性,而 Tuzo 与热点空间相关性较强。总体上,热点的分布与 LLSVPs 之间的相关性远不及预期,两者之间的相关性并未得到充分的论证。因此,在具体的热点和地幔柱成因研究中,不能盲目认为热点与 LLSVPs 有关,而需要更加审慎的关注地质事实本身。另外,SMEAN -1%速度异常的地质意义以及如何联系深度 2800 km 的地球物理异常与地表热点等问题,仍有待进一步研究。

致谢:感谢中国科学院海洋研究所张国良老师、广州地球化学研究所杨阳老师在地球系统科学会议上给予的相关问题的讨论和建议,感谢评审专家对本文提出的宝贵修改意见。

References

Anderson D L, Natland J H. 2005. A brief history of the plume

- hypothesis and its competitors: concept and controversy. *Special Papers-Geological Society of America*, 388:119~174.
- Austermann J, Kaye B T, Mitrovica J X, Huybers P. 2014. A statistical analysis of the correlation between large igneous provinces and lower mantle seismic structure. *Geophysical Journal International*, 197(1): 1~9.
- Becker T W, Boschi L. 2002. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(1): 2001GC000168.
- Bono R K, Tarduno J A, Bunge H P. 2019. Hotspot motion caused the Hawaiian-Emperor Bend and LLSVPs are not fixed. *Nature Communications*, 10(1): 3370.
- Burke K. 2011. Plate Tectonics, the Wilson Cycle, and mantle plumes: geodynamics from the top. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1): 1~29.
- Burke K, Torsvik T H. 2004. Derivation of Large Igneous Provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(3): 531~538.
- Burke K, Steinberger B, Torsvik T H, Smethurst M A. 2008. Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core-mantle boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(1): 49~60.
- Burke K, Matthew C J. 2014. Plume-plate interaction. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(3): 208~221.
- Castillo P. 1988. The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle. *Nature*, 336(6200): 667~670.
- Cottaar S, Romanowicz B. 2013. Observations of changing anisotropy across the southern margin of the African LLSVP. *Geophysical Journal International*, 195(2): 1184~1195.
- Davies D, Goes S, Sambridge M. 2015. On the relationship between volcanic hotspot locations, the reconstructed eruption sites of large igneous provinces and deep mantle seismic structure. *Earth and Planetary Science Letters*, 411: 121~130.
- Deschamps F, Cobden L, Tackley P J. 2012. The primitive nature of large low shear-wave velocity provinces. *Earth and Planetary Science Letters*, 349: 198~208.
- Dziewonski A M. 1984. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 89(B7): 5929~5952.
- Dziewonski A M, Hager B H, O'connell R J. 1977. Large-scale heterogeneities in the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, 82(2): 239~255.
- Garnero E J, Lay T, McNamara A. 2007. Implications of lower-mantle structural heterogeneity for the existence and nature of whole-mantle plumes. *Special Papers-Geological Society of America*, 430: 79~101.
- He Rizheng, Gao Rui, Zheng Hongwei, Guan Ye, Li Qiusheng, Li Wenhui, Xiong Xiaosong, Deng Gong. 2010. Progress in seismic tomography. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 840~846 (in Chinese with English abstract).
- He Yumei, Wen Lianxing. 2009. Structural features and shear-velocity structure of the "Pacific Anomaly". *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 114: B02309.
- Heyn B H, Conrad C P, Trønnes R G. 2020. How thermochemical piles can (periodically) generate plumes at their edges. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 125(6): e2019JB018726.
- Huang Chuan. 2017. The summary, mechanism and evolution history of LLSVPs as well as their possible origins. Doctoral dissertation of University of Science and Technology of China (in Chinese with English abstract).
- Huang Chuan, Leng Wei, Wu Zhongqing. 2015. Iron-spin transition controls structure and stability of LLSVPs in the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 423: 173~181.
- Huang Chuan, Leng Wei, Wu Zhongqing. 2020. The continually stable subduction, iron-spin transition, and the formation of LLSVPs from subducted oceanic crust. *Journal of Geophysical*

Research: Solid Earth, 125(1): e2019JB018262.

Jackson M, Becker T, Steinberger B. 2021. Spatial characteristics of recycled and primordial reservoirs in the deep mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(3): e2020GC009525.

Kárason H, Van Der Hilst R D. 2000. Constraints on mantle convection from seismic tomography. *Geophysical Monograph*, 121: 277~288.

Koppers A A, Becker T W, Jackson M G, Konrad K, Müller R D, Romanowicz B, Steinberger B, Whittaker J M. 2021. Mantle plumes and their role in Earth processes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(6): 382~401.

Li Xianhua. 2021. The major driving force triggering breakup of supercontinent: mantle plumes or deep subduction? *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 20~31 (in Chinese with English abstract).

Ni Sidao, Tan E, Gurnis M, Helmberger D. 2002. Sharp sides to the African superplume. *Science*, 296(5574): 1850~1852.

Niu Yaoling. 2018. Origin of the LLSVPs at the base of the mantle is a consequence of plate tectonics—a petrological and geochemical perspective. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1265~1278.

Niu Yaoling. 2020. On the cause of continental breakup: a simple analysis in terms of driving mechanisms of plate tectonics and mantle plumes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 104367.

Ritsema J, Van Heijst H J, Woodhouse J H. 1999. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, 286(5446): 1925~1928.

Romanowicz B, Gung Y. 2002. Superplumes from the core-mantle boundary to the lithosphere: implications for heat flux. *Science*, 296(5567): 513~516.

Steinberger B. 2000. Plumes in a convecting mantle: models and observations for individual hotspots. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(B5): 11127~11152.

Tanaka S, Kawakatsu H, Obayashi M, Chen Y J, Ning J, Grand S P, Niu F, Ni J. 2015. Rapid lateral variation of P-wave velocity at the base of the mantle near the edge of the Large-Low Shear Velocity Province beneath the western Pacific. *Geophysical Journal International*, 200(2): 1052~1065.

Thomson A, Crichton W A, Brodholt J P, Wood I G, Siersch N C, Muir J, Dobson D P, Hunt S A. 2019. Seismic velocities of CaSiO₃ perovskite can explain LLSVPs in Earth's lower mantle. *Nature*, 572(7771): 643~647.

Torsvik T H, Smethurst M A, Burke K, Steinberger B. 2006. Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle. *Geophysical Journal International*, 167(3): 1447~1460.

Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L, Burke K. 2008. Longitude: linking Earth's ancient surface to its deep interior. *Earth and Planetary Science Letters*, 276: 273~282.

Torsvik T H, Burke K, Steinberger B, Webb S J, Ashwal L D. 2010. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. *Nature*, 466(7304): 352~355.

Torsvik T H, Van D, Doubrovine P V, Burke K, Steinberger B, Ashwal L D, Tronnes R G, Webb S J, Bull A L. 2014. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(24): 8735.

Torsvik T H, Steinberger B, Ashwal L D, Doubrovine P V, Tronnes R G. 2016. Earth evolution and dynamics—a tribute to Kevin Burke. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11): 1073~1087.

Vogt P. 1981. On the applicability of thermal conduction models to mid-plate volcanism: comments on a paper by Gass et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B2): 950~960.

Wei Bitian, Yang Xingfeng, Cheng Xin, Domeier M, Wu Hanning, Kravchinsky V A, Zhou Yanan, Jiang Nan, Wu Yiying, Huo Feifei. 2020. An absolute paleogeographic positioning of the early Permian Tarim large igneous province. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5): e2019JB019111.

Wilson J T. 1973. Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*, 19(2): 149~164.

Zhao Dapeng. 2001. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 251~265.

Zhao Dapeng. 2007. Seismic images under 60 hotspots: search for mantle plumes. *Gondwana Research*, 12(4): 335~355.

参 考 文 献

贺日政, 高锐, 郑洪伟, 管烨, 李秋生, 李文辉, 熊小松, 邓攻. 2010. 地震波速层析成像方法研究进展. *地质学报*, 84(6): 840~846.

黄川. 2017. LLSVPs 的概况、成因、演化史及可能物质来源. 中国科学技术大学博士学位论文.

李献华. 2021. 超大陆裂解的主要驱动力——地幔柱或深俯冲?. *地质学报*, 95(1): 20~31.

Reanalysis of the spatial correlations between LLSVPs and the global hotspots

DANG Niu^{1,2)}, YU Xing^{* 2,3)}, HU Hang^{2,3)}, XU Xucheng²⁾, HE Hu²⁾, YU Yana²⁾

1) School of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2) Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

3) Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China

* Corresponding author: yuxing@sio.org.cn

Abstract

Seismic tomographic images show that there are two large low shear-wave velocity provinces (LLSVPs) beneath Africa and Pacific Ocean at the Earth’s core-mantle boundary, named Tuzo and Jason, respectively. It implies the anomalies in temperature or composition of the deep mantle. Previous studies have found that the reconstructed eruption sites of large igneous provinces and current active hotspots are mostly located near the LLSVPs margins with a tolerance of $\pm 10^\circ$. Based on spatial correlations the narrow margins of LLSVPs are regarded as the mantle plume generation zone and is widely used to explain the genesis of mantle plumes and hotspots. However, there are still many uncertainties in connecting the surface hotspots to a deep geophysical anomaly 2800 km beneath. Moreover, LLSVPs, as a global-scale anomalies, are huge in extent if projected on the Earth’s surface, and will inevitably be overlapping with a large number of hotspots. Whether the two components are genetically connected remains unknown. Here, we consider the random probability of a hotspot falling into the LLSVPs ranges, and reanalyze the spatial correlation between LLSVPs’ margins and global hotspots to determine the confidence level of the potential correlation. The statistical results show that the spatial correlation between global hotspots and LLSVPs’ margins is not significant as proposed. There are great differences between Tuzo and Jason in their relationships to the hotspots. The Tuzo is considered well correlated with hotspots, while the Jason don’t. Thus, the distribution and genesis of hotspots may not be fully controlled by LLSVPs. The result challenges the generally accepted strong correlation between LLSVPs and hotspots. We should not take it for granted that hot spots are related to LLSVPs, but should be more careful in study of the genesis of hot spots and mantle plumes, with more attention to the geological facts and observations.

Key words: LLSVPs; global hotspots; plume generation zones; mantle plume; spatial correlation