

Optimization for parameters of 5.0T pseudo continuous arterial spin labeling MRI of whole brain

LI Dongxue¹, FAN Xiaoyuan¹, HAN Hualu², CHEN Shuo², SUN Wei¹,
YOU Hui¹, LI Mingli¹, FENG Feng^{1*}

(1. Department of Radiology, Translation Medicine Center, Peking Union Medical College Hospital,
Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100730, China;
2. United Imaging Healthcare, Shanghai 201807, China)

[Abstract] **Objective** To explore the optimization for parameters of 5.0T pseudo continuous arterial spin labeling (pCASL) MRI of whole brain. **Methods** Nine healthy adults were prospectively enrolled, and single-delay pCASL scanning was performed based on a 5.0T MR scanner with 3 sets of labeling gradients: Group A, average gradient (G_{avg}) = 1 mT/m and the ratio of maximum gradient (G_{max}) to G_{avg} (G_{ratio}) = 10, group B, G_{avg} = 0.6 mT/m and G_{ratio} = 10, group C, G_{avg} = 0.3 mT/m and G_{ratio} = 9. The labeling efficiency and cerebral blood flow (CBF) of 3 groups were compared to screen the best labeling gradient group. **Results** When the marked average blood flow velocity was 40 cm/s, the gradient field tolerance of group C was better than that of group A and B at the situation of reduced B1+ and larger B0 offset frequency range. Under the gradient field of group C, the level of labeled artery B1 ranged from 54.19% to 75.36%, with an average of 64.71%. The labeling efficiencies of group C were all $\geq 85\%$, and all $\geq 90\%$ at the average B1 level (64.71%). In the whole gray matter and almost all brain regions, CBF on pCASL under gradient field of group C was significantly higher than that of group A and B (all $P < 0.05$). **Conclusion** Low G_{avg} and low G_{max} were the optimal parameters for 5.0T whole brain pCASL MRI.

[Keywords] brain; arterial spin labeling; magnetic resonance imaging; image quality; prospective studies

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.002

5.0T 全脑准连续动脉自旋标记 MRI 参数优化

李冬雪¹, 范晓媛¹, 韩华璐², 陈硕², 孙伟¹, 有慧¹, 李明利¹, 冯逢^{1*}

(1. 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院 协和转化医学中心放射科, 北京 100730;
2. 上海联影医疗科技股份有限公司, 上海 201807)

[摘要] **目的** 探讨 5.0T 全脑准连续动脉自旋标记(pCASL)MRI 参数优化。**方法** 前瞻性招募 9 名健康成人, 利用 5.0T MR 仪行单延迟 pCASL 扫描, 设置 3 组标记梯度: A 组, 平均梯度(G_{avg}) = 1 mT/m, 最大梯度(G_{max})与 G_{avg} 比值(G_{ratio}) = 10; B 组, G_{avg} = 0.6 mT/m, G_{ratio} = 10; C 组, G_{avg} = 0.3 mT/m, G_{ratio} = 9。比较 3 组标记效率及脑血流量(CBF); 筛选最佳标记梯度组。**结果** 标记血流平均速度为 40 cm/s、B1+ 降低和 B0 偏移频率较大时, C 组梯度场容纳度优于 A、B 组。C 组梯度场下, 标记动脉 B1 水平为 54.19%~75.36%、平均 64.71%; 该组标记效率均 $\geq 85\%$ 平均 B1 水平(64.71%) 下标记效率均 $\geq 90\%$ 。C 组梯度场下 pCASL 采集的全脑灰质和几乎所有脑区的 CBF 明显高于 A、B 组(P 均 < 0.05)。 **结论** 低 G_{avg} 及低 G_{max} 为 5.0T 全脑 pCASL MRI 最佳参数。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(82071899、82371946)、中国医学科学院医学与健康科技创新工程(2021-I2M-1-025)、北京市自然科学基金(7222131)。

[第一作者] 李冬雪(1997—), 女, 河北承德人, 本科, 技师。研究方向: 中枢神经系统磁共振成像技术。E-mail: mancy97@163.com

[通信作者] 冯逢, 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院 协和转化医学中心放射科, 100730。E-mail: ffeng@pumch.cn

[收稿日期] 2024-02-05 **[修回日期]** 2024-03-29

[关键词] 脑; 动脉自旋标记; 磁共振成像; 图像质量; 前瞻性研究

[中图分类号] R742; R445.2 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2024)05-0643-05

动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)MRI 可将磁化的动脉血中的水分子作为内源性示踪剂而无创定量脑灌注,但因动脉血中水分子的半衰期较短,所获图像信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)较低^[1]。准连续 ASL(pseudo continuous ASL, pCASL)的 SNR 和标记效率高于脉冲 ASL 和连续 ASL^[2],但对于显示皮层微小病变仍存在不足^[3-4]。超高场强下,ASL 成像的 SNR、分辨率和组织对比度更高,血液中氢质子的 T1 值更大,可更准确地定量脑血流量(cerebral blood flow, CBF)^[5];然而 7.0T 超高场强下颅脑下方 B1+ 场降低,可致标记射频(radio frequency, RF)脉冲反转效能不足,且受比吸收率(specific absorption rate, SAR)限制,标记 RF 脉冲序列、背景抑制及基于自旋回波读出方法中均无法使用较大翻转角(flip angle, FA),使标记效率下降、颅内灌注信号降低^[6-8]。5.0T MRI 的 SNR 高于 3.0T、SAR 低于 7.0T;近期多项研究^[9-11]已初步证实 5.0T MR 成像质量的优势,但 ASL 技术方面的探索仍有所不足。本研究探讨 5.0T pCASL MRI 参数优化。

1 资料与方法

1.1 研究对象 于 2023 年 10 月—11 月前瞻性招募 9 名健康成人,男 4 名、女 5 名,年龄 23~54 岁、中位年龄 27 岁。纳入标准:①年龄 ≥ 18 岁;②既往无神经精神疾病、心血管疾病及代谢疾病;③无 MR 检查禁忌证。排除标准:①无法配合完成 MR 扫描;②图像存在伪影。本研究通过院伦理委员会批准(I-23PJ2044),受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用联影 uMR Jupiter 5.0T MR 仪、2Tx/48Rx 头部线圈;行常规模式扫描时,将长时(6 min)SAR 阈值设为 10 W、短时(10 s)阈值设为 20 W。嘱受试者仰卧、头先进,扫描范围自小脑下缘至颅顶。分别进行三阶匀场和 B1 匀场,设定 3 组标记梯度:A 组,平均梯度(average gradient, G_{avg})=1 mT/m,最大梯度(maximum gradient, G_{max})与 G_{avg} 比值(the ratio of G_{max} to G_{avg} , G_{ratio})=10;B 组, G_{avg} =0.6 mT/m, G_{ratio} =10;C 组, G_{avg} =0.3 mT/m, G_{ratio} =9;采用 Bloch 仿真模拟比较标记效率。针对男、女各 4 名受试者(1 名女性受试者未接受相关扫描)以 turbo 快速小角度激发(fast low angle shot, FLASH)读出预处理 RF 脉冲,测量标记层面 B1 场图^[12]。基

于时间飞跃法(time of flight, TOF)血管成像定位图像测量标记动脉 4 个体素(双侧颈内动脉、双侧椎动脉)的平均 B1 水平,用于数值模拟流动驱动反转,以评估 3 组标记梯度的反转效能和图像质量。相关参数:pCASL, TE 16.3 ms, TR 6 485 ms,分辨率 2.5 mm \times 2.5 mm \times 4 mm,FOV 200 mm \times 200 mm \times 128 mm,标记时间 1 800 ms,标记后延迟时间 1 800 ms,平均次数 4,扫描时间 2 min 56 s,读出方式为三维梯度自旋回波(gradient and spin echo, GRASE);TOF, TE 3.1 ms, TR 18.1 ms,分辨率 1.37 mm \times 1.03 mm \times 1 mm,层间插值 2,FOV 230 mm \times 200 mm \times 120 mm,压缩感知因子 5,FA 15°,扫描时间 1 min 15 s;T1-磁化强度预备梯度回波(T1-magnetization prepared rapid acquisition gradient echo, T1-MPRAGE)序列, TE 3.4 ms, TR 9.4 ms, TI 1 050 ms,分辨率 0.7 mm \times 0.7 mm \times 0.7 mm,FOV 256 mm \times 220 mm \times 182 mm,FA 9°,人工智能辅助压缩感知(assisted compression sensing, ACS)因子 3,扫描时间 4 min 7 s。

1.3 图像处理 基于联影 uOmnispace. MR 后处理平台,设置血液 T1 值为 1 850 ms、组织 T1 值为 1 500 ms、标记效率为 72%,血脑分离系数为 0.9;之后,于 MATLAB 平台上采用 SPM12 将 CBF 图和 3D T1WI 配准到标准蒙特利尔神经研究所空间,将 3D T1WI 分割为灰质(gray matter, GM)概率图和白色质概率图;提取 GM CBF 图,并分割额叶、顶叶、颞叶、枕叶、边缘系统和深部 GM ROI,计算不同梯度场下全脑 GM 及各 ROI 的 CBF。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 25.0 和 Prism Graphpad 9.0 统计分析软件。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验分析计量资料的正态性,以 $\bar{x} \pm s$ 表示符合正态分布者,采用配对样本 t 检验进行组间比较。根据 Bloch 模拟结果绘制等高线图,比较 3 组不同梯度场的标记效率。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模拟标记效率 假设标记血流平均速度为 40 cm/s, B1+ 降低和 B0 偏移频率较大时, C 组梯度场容纳度优于 A、B 组。C 组梯度场下,标记动脉 B1 水平为 54.19%~75.36%、平均 64.71%;标记效率均 $\geq 85\%$,平均 B1 水平(64.71%)下标记效率均 $\geq 90\%$ 。见图 1。

2.2 CBF C 组梯度场下 CBF 信号强度高于 A、B 组 (图 2); 且除枕叶外, C 组梯度场下全脑 GM 及各 ROI CBF 明显高于 A、B 组 (P 均 < 0.05 , 表 1)。

3 讨论

本研究实现了 5.0T 场强下覆盖全脑 pCASL 成像, 并对比不同梯度场组合, 以优化成像参数, 发现

$G_{avg} = 0.3 \text{ mT/m}$ 及 $G_{ratio} = 9$ 下标记效率较高。

超高场 MRI 易受 SAR 限制和场不均匀性影响, 使 ASL 技术临床应用受限。pCASL 的 SNR 高于脉冲 ASL, 故临床常用于 1.5T 或 3.0T MR 扫描; 而在 7.0T 场强下, 由于连续标记 RF 脉冲可致 SAR 较高, 故较少应用 pCASL 技术, 一定程度上导致图像 SNR

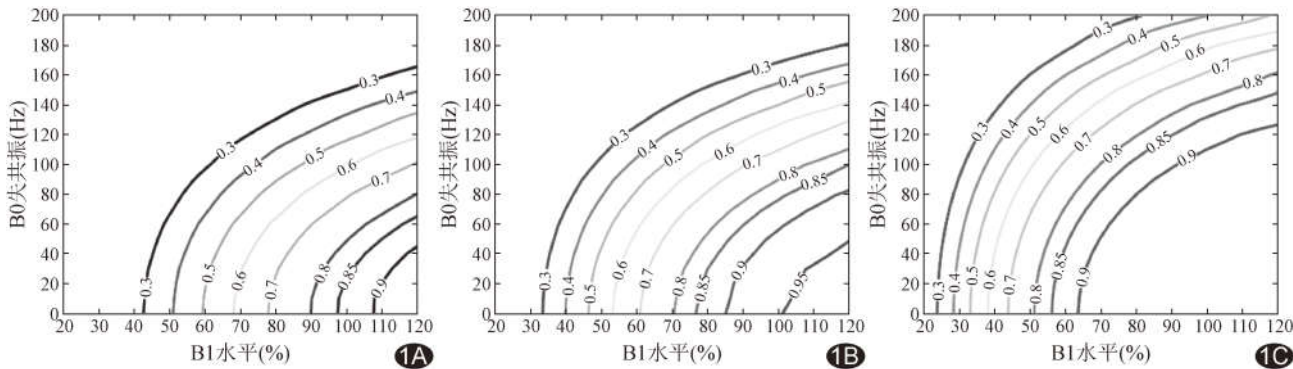


图 1 标记血流平均速度 40 cm/s 时的标记效率仿真 B1+和 B0 等高线图 A. A 组; B. B 组; C. C 组

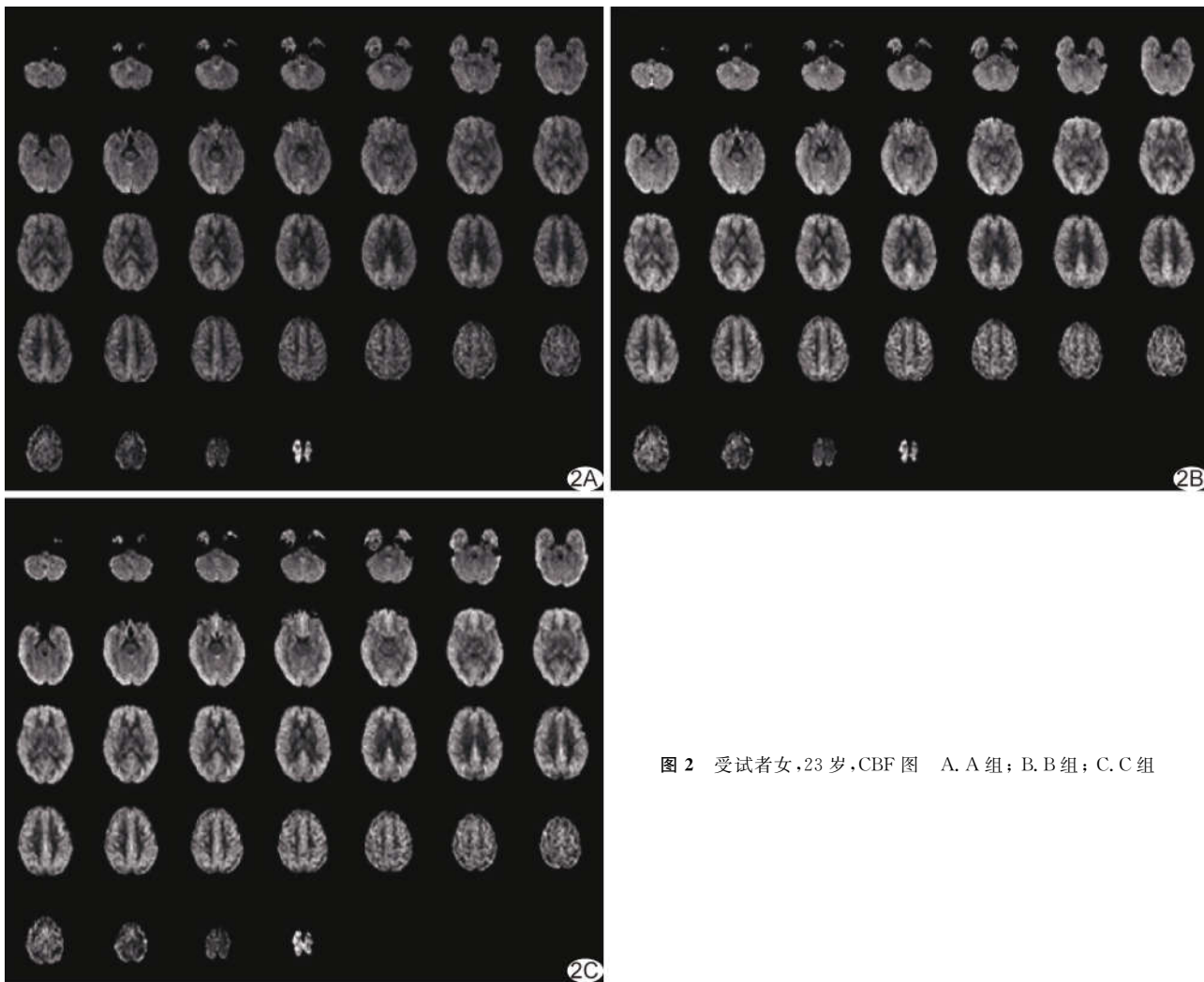


图 2 受试者女, 23 岁, CBF 图 A. A 组; B. B 组; C. C 组

表 1 不同标记梯度下全脑 GM 和不同 ROI 的 CBF 比较

组别	CBF[ml/(100 g · min)]						
	全脑 GM	额叶	颞叶	枕叶	顶叶	边缘系统	深部 GM
A 组	49.90±6.24	49.64±7.14	51.32±6.66	52.43±6.40	49.23±6.61	49.32±6.57	38.61±5.19
B 组	56.56±6.87	55.97±7.56	59.22±6.89	59.71±8.35	55.98±7.72	54.49±6.06	42.51±5.90
C 组	60.98±5.17	62.24±5.83	65.11±5.63	59.59±7.49	59.14±5.37	59.72±4.38	47.34±3.45
t 值*	-4.537	-4.035	-5.318	-3.358	-4.466	-3.148	-3.143
P 值*	0.002	0.004	0.001	0.010	0.002	0.014	0.014
t 值#	-3.728	-5.339	-4.287	0.069	-2.396	-4.027	-4.036
P 值#	0.006	0.001	0.003	0.947	0.043	0.004	0.004
t 值★	-6.580	-6.624	-6.969	-3.307	-6.159	-6.425	-6.717
P 值★	<0.001	<0.001	<0.001	0.011	<0.001	<0.001	<0.001

注：*：A 组 vs. B 组；#：B 组 vs. C 组；★：A 组 vs. C 组

较低^[13]。通过缩短标记时间、增加标记 RF 脉冲的时间间隔、利用小于最佳角度的 FA 及采用 VERSE 脉冲等方法可实现超高场 pCASL 成像，但同时可致标记效率降低^[14]。5.0T MRI 的 SAR 低于 7.0T，利用常用标记参数有望获得较高标记效率。

既往研究^[8,15]通过高阶匀场或“预扫描”校准解决 MRI B0 偏移问题。本研究发现三阶 B0 匀场可使失共振较小，故推荐于 5.0T pCASL 扫描前先行三阶匀场。超高场强下 B1 场不均匀问题较突出^[15-16]，尤其在大脑下方，B1+减小可致标记效率明显降低，故在 7.0T 场强下需提高标记层面位置以改善标记效率，但因此可致成像范围不足而难以覆盖全脑^[17]。本研究结果显示，5.0T MRI 可实现覆盖全脑的超高场 ASL 成像，并获得更为全面的脑灌注信息。

ZHAO 等^[5]通过优化成像参数、采用 OPTIM BS 脉冲和加速后的 3D Turbo FLASH 读出方式而实现了 7.0T 场强下覆盖全脑高分辨率 pCASL 成像并对比 7.0T 场强下 3D Turbo FLASH 与 GRASE 读出方式所测 CBF 的可重复性，发现前者可重复性更佳但图像清晰度和 SNR 更低，而 GRASE 序列对场不均匀性的敏感度较低^[1]。本研究据此采用 GRASE 作为 5.0T pCASL 的读出方式。

ZHAO 等^[2]以不同梯度场行 3.0T 场强下 pCASL 成像，发现 G_{avg} 较低时高速血流标记效率较高，且较低的 G_{ratio} 可容纳更宽的共振频率范围。本研究根据 B0 和 B1 场分布图对 G_{avg} 和 G_{max} 标记参数进行优化，以在不缩小成像范围的前提下尽可能提高标记效率和图像 SNR；结果显示，5.0T MR 扫描中， $G_{avg} = 0.3$ mT/m、 $G_{ratio} = 9$ 时的标记效率高于 $G_{avg} = 1$ mT/m、 $G_{ratio} = 10$ 及 $G_{avg} = 0.6$ mT/m、 $G_{ratio} = 10$ ，与上述 3.0T 研究结果大致相符。

综上所述，低 G_{avg} 、低 G_{max} 为 5.0T 全脑 pCASL MRI 最佳参数。但本研究样本量有限，有待后续进一步观察。

利益冲突：全体作者声明无利益冲突。

作者贡献：李冬雪查阅文献、撰写和修改文章；范晓媛研究设计和实施、统计分析、修改文章；韩华璐、陈硕数据分析、图像处理和分析；孙伟研究实施；有慧研究设计、修改文章；李明利、冯逢审阅文章、经费支持。

[参考文献]

[1] ALSOP D C, DETRE J A, GOLAY X, et al. Recommended implementation of arterial spin-labeled perfusion MRI for clinical applications: A consensus of the ISMRM perfusion study group and the European consortium for ASL in dementia [J]. Magn Reson Med, 2015, 73(1):102-116.

[2] ZHAO L, VIDORRETA M, SOMAN S, et al. Improving the robustness of pseudo-continuous arterial spin labeling to off-resonance and pulsatile flow velocity [J]. Magn Reson Med, 2017, 78(4):1342-1351.

[3] ALMEIDA J R C, GREENBERG T, LU H, et al. Test-retest reliability of cerebral blood flow in healthy individuals using arterial spin labeling: Findings from the EMBARC study [J]. Magn Reson Imaging, 2018, 45:26-33.

[4] LIU M, CHEN Z, MA L. Test-retest reliability of perfusion of the precentral cortex and precentral subcortical white matter on three-dimensional pseudo-continuous arterial spin labeling [J]. J Int Med Res, 2018, 46(9):3788-3795.

[5] ZHAO C, SHAO X, SHOU Q, et al. Whole-cerebrum distortion-free three-dimensional pseudo-continuous arterial spin labeling at 7T [J]. Neuroimage, 2023, 277:120251.

[6] DURY R J, FALAH Y, GOWLAND P A, et al. Ultra-high-field

- arterial spin labelling MRI for non-contrast assessment of cortical lesion perfusion in multiple sclerosis[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(4):2027-2033.
- [7] WANG K, SHAO X, YAN L, et al. Optimization of adiabatic pulses for pulsed arterial spin labeling at 7 tesla: Comparison with pseudo-continuous arterial spin labeling[J]. *Magn Reson Med*, 2021, 85(6):3227-3240.
- [8] HERNANDEZ-GARCIA L, ARAMENDÍA-VIDAURRETA V, BOLAR D S, et al. Recent technical developments in ASL: A review of the state of the art[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 88(5):2021-2042.
- [9] LIN L, LIU P, SUN G, et al. Bi-ventricular assessment with cardiovascular magnetic resonance at 5 Tesla: A pilot study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9:913707.
- [10] SHI Z, ZHAO X, ZHU S, et al. Time-of-flight intracranial MRA at 3 T versus 5 T versus 7 T: Visualization of distal small cerebral arteries[J]. *Radiology*, 2023, 306(1):207-217.
- [11] WEI Z, CHEN Q, HAN S, et al. 5T magnetic resonance imaging: Radio frequency hardware and initial brain imaging[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(5):3222-3240.
- [12] CHUNG S, KIM D, BRETON E, et al. Rapid B1+ mapping using a preconditioning RF pulse with Turbo FLASH readout[J]. *Magn Reson Med*, 2010, 64(2):439-446.
- [13] IVANOV D, GARDUMI A, HAAST R A M, et al. Comparison of 3T and 7T ASL techniques for concurrent functional perfusion and BOLD studies[J]. *Neuroimage*, 2017, 156:363-376.
- [14] TONG Y, JEZZARD P, OKELL T W, et al. Improving PCASL at ultra-high field using a VERSE-guided parallel transmission strategy[J]. *Magn Reson Med*, 2020, 84(2):777-786.
- [15] SAÏB G, KORETSKY A P, TALAGALA S L. Optimization of pseudo-continuous arterial spin labeling using off-resonance compensation strategies at 7T[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 87(4):1720-1730.
- [16] MEIXNER C R, EISEN C K, SCHMITTER S, et al. Hybrid B1+1-shimming and gradient adaptations for improved pseudo-continuous arterial spin labeling at 7 Tesla[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 87(1):207-219.
- [17] WANG K, MA S J, SHAO X, et al. Optimization of pseudo-continuous arterial spin labeling at 7T with parallel transmission B1 shimming[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 87(1):249-262.