

综述

儿童脑肿瘤氨基酸PET显像的研究进展

刘子豪, 唐文芳, 王 辉

上海交通大学医学院附属新华医院核医学科, 上海 200092

[摘要] 脑肿瘤是儿童肿瘤中最常见的实体肿瘤, 也是儿童肿瘤致死的首要原因。常规磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)在儿童脑肿瘤的诊断、治疗管理及预后评估等方面存在一定的不足。正电子发射断层显像(positron emission tomography, PET)是反映肿瘤生物学特征的成像技术, 利用特定放射性药物的生物学分布特征, 可以提供肿瘤的不同功能代谢信息, 与常规MRI的形态学信息进行互补。氨基酸PET显像利用放射性核素标记的各种氨基酸在人体内的代谢情况, 进行肿瘤的功能显像。氨基酸PET显像在儿童脑肿瘤的诊断与分级、活检计划制订、预后评估、复发监测与疗效评估等方面具有重要的作用。该文就近年来氨基酸PET/CT与PET/MRI在胶质瘤、神经上皮肿瘤等儿童脑肿瘤中的临床应用进行综述。

[关键词] 儿童; 脑肿瘤; 正电子发射断层显像/计算机断层扫描(PET/CT); 正电子发射断层显像/磁共振成像(PET/MRI); L-甲基-¹¹C-甲硫氨酸(¹¹C-MET); ¹⁸F-乙基酪氨酸(¹⁸F-FET); ¹⁸F-二羟基苯丙氨酸(¹⁸F-DOPA)

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2021.07.016 **[中图分类号]** R445.6 **[文献标志码]** A

Research progress in amino acid PET imaging of pediatric brain tumors

LIU Zi-hao, TANG Wen-fang, WANG Hui

Department of Nuclear Medicine, Xinhua Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China

[Abstract] Brain tumor is the most common solid tumor in pediatric tumors with the highest rate of mortality. Conventional magnetic resonance imaging (MRI) indicates some limitations in diagnosis, surgical management and prognosis for pediatric brain tumors. Positron-emission tomography (PET) is an imaging technology that reflects the biological characteristics of tumors. By using the biological distribution of specific radiopharmaceuticals, PET can provide different metabolic information of the tumor and complement the morphological information of conventional MRI. Amino acid PET imaging uses the metabolism of radiolabeled amino acids in human to perform functional imaging of tumors. The benefits of amino acid PET imaging include diagnosis and grading, biopsy planning, prognosis, recurrence monitoring, and efficacy evaluation. This paper reviews the application of amino acid PET/CT and PET/MRI to pediatric brain tumors.

[Key words] pediatric; brain tumor; positron emission tomography/computer tomography (PET/CT); positron emission tomography/magnetic resonance imaging (PET/MRI); L-[methyl-¹¹C]methionine (¹¹C-MET); O-(2-[¹⁸F] fluoroethyl)-L-tyrosine (¹⁸F-FET); ¹⁸F-fluoro-L-dihydroxy-phenylalanine (¹⁸F-DOPA)

脑肿瘤是儿童肿瘤中最常见的实体肿瘤, 发病率为5.74/10万, 也是儿童肿瘤死亡的首要原因, 死亡率为0.72/10万^[1]。儿童脑肿瘤的分类有很多, 主要包括髓母细胞瘤、生殖细胞肿瘤、颅咽管瘤和原始神经外胚层肿瘤等。《2016年WHO中枢神经系统肿瘤分类总结》引入分子学特征, 使儿童脑肿瘤分型从组织学延伸到分子亚型, 对儿童脑肿瘤的临床诊断、治疗和预后有着深远影响^[2-3]。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)是目前临床最常用的诊断儿童脑肿瘤的成像技术, 提供了儿童脑肿瘤的形态学和解剖学特征。由于这些影像学特征不具有特异性, 一些良性病变也会出现相同的影像

学特征, 因此限制了MRI对儿童脑肿瘤的诊断效能。

正电子发射断层显像(positron emission tomography, PET)是反映肿瘤生物学特征的成像技术, 利用放射性药物的生物学分布, 可以提供肿瘤的功能代谢信息, 与常规MRI的形态学信息进行互补。¹⁸F-脱氧葡萄糖(¹⁸F-fluorodeoxyglucose, ¹⁸F-FDG)是临床最常用的PET显像剂, 对高代谢肿瘤的检测有重要的临床价值。但是由于脑组织对葡萄糖的代谢率较高, 导致低代谢肿瘤与周围正常脑组织的对比差异较小, 容易造成假阴性和假阳性, 限制了¹⁸F-FDG PET显像在脑肿瘤的临床应用^[4]。氨基酸PET显像剂在正常脑组织的积聚较少, 与¹⁸F-FDG相比,

[基金项目] 国家自然科学基金(51673116, 81974269, 51703126)。

[作者简介] 刘子豪(1994—), 男, 博士生; 电子信箱: liuzihao2021@163.com。

[通信作者] 王 辉, 电子信箱: wanghui@xinhumed.com.cn。

[Funding Information] National Natural Science Foundation of China (51673116, 81974269, 51703126)。

[Corresponding Author] WANG Hui, E-mail: wanghui@xinhumed.com.cn。

[网络首发] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2045.R.20210617.1606.002.html> (2021-06-18 08:48:49)。

对儿童脑肿瘤的显像有一定优势。目前应用于儿童脑肿瘤的氨基酸PET显像剂主要有3种: L-甲基- ^{11}C -甲硫氨酸{L-[methyl- ^{11}C] methionine, ^{11}C -MET}、 ^{18}F -乙基酪氨酸{O-(2-[^{18}F] fluoroethyl)-L-tyrosine, ^{18}F -FET} 和 ^{18}F -二羟基苯丙氨酸(^{18}F -fluoro-L-dihydroxy-phenylalanine, ^{18}F -DOPA)。本文就近年来氨基酸PET/CT与PET/MRI在胶质瘤、神经上皮肿瘤等儿童脑肿瘤中的临床应用进行综述。

1 氨基酸PET显像的主要放射性药物及其原理

目前的研究认为, 正常人脑组织对糖类代谢较高, 对蛋白质的合成代谢较低; 而脑肿瘤组织生长迅速, 对糖类和蛋白质的代谢加快, 糖类与氨基酸的需求增加^[5-6]。在脑肿瘤显像中, 氨基酸PET显像的主要优点是正常脑组织对显像剂的摄取较低, 本底与肿瘤组织的边界比 ^{18}F -FDG PET显像更加明显。 ^{11}C -MET和 ^{18}F -FET可以通过血脑屏障, 并通过L型氨基酸转运载体1 (large amino acid transporter 1, LAT1) 与钠离子依赖的转运载体B0进入细胞^[6]。 ^{18}F -FET由于半衰期较长, 被开发用于动态PET显像, 通过时间-放射性活动度曲线 (time activity curve, TAC) 来计算从数据采集开始到肿瘤摄取 ^{18}F -FET达到峰值所需的时间, 比传统的静态PET显像包含更多生物学信息^[7]。 ^{18}F -DOPA是左旋多巴的类似物, ^{18}F -DOPA显像剂注入人体内, 通过芳香族氨基酸转运系统进入细胞, 再经过芳香酸脱羧酶 (aromatic acid decarboxylase, AADC) 转化为 ^{18}F -多巴胺, 储存在囊泡中^[8]。 ^{18}F -DOPA的摄取强度与儿茶酚胺的代谢能力有关, 最早应用于AADC活性较高的神经内分泌肿瘤。

2 氨基酸PET显像的临床应用

2.1 儿童脑肿瘤的诊断与分级

PET显像剂的摄取高于本底, 通常意味着该区域恶性病变的可能性较大。脑肿瘤组织SUV_{max}与对侧相应位置正常脑组织SUV的比值 (tumor/normal brain SUV ratio, T/N) 是常用的诊断脑肿瘤的指标, 也可以使用SUV的最大值或平均值的指标来衡量。

^{11}C -MET是评估脑肿瘤最常用的氨基酸PET显像剂。O' Tuama等^[9]首次报道了 ^{11}C -MET在儿童脑肿瘤中的临床试验, 试验对13例脑肿瘤患儿行 ^{11}C -MET PET显像, 其中11例患儿的脑肿瘤区域出现了 ^{11}C -MET的积聚, T/N

比值为 1.5 ± 0.57 , 范围为1.13~2.98, 结果显示室管膜瘤、髓母细胞瘤和星形细胞瘤的 ^{11}C -MET摄取高于低级别脑肿瘤, 证实了 ^{11}C -MET PET显像在儿童脑肿瘤的诊断中有一定作用。后续多项研究肯定了 ^{11}C -MET PET显像在儿童脑肿瘤的诊断价值。Utriainen等^[10]发现 ^{11}C -MET的摄取与儿童脑肿瘤的分级呈正相关。Phi等^[11]报道了 ^{11}C -MET在节细胞胶质瘤和胚胎发育不良性神经上皮肿瘤中的T/N比值远高于局部发育不良的皮质, 但是Kaplan等^[12]和Rosenberg等^[13]的研究均表明胚胎发育不良性神经上皮肿瘤的 ^{11}C -MET摄取较低, 可以和其他高 ^{11}C -MET摄取的胶质瘤进行鉴别。 ^{11}C -MET为儿童脑肿瘤的诊断提供了重要的影像学信息, 但是对脑肿瘤的分级仍然存在争议, 部分 ^{11}C -MET PET显像在成人脑肿瘤的分级中并无统计学差异, ^{11}C -MET PET显像对儿童脑肿瘤的分级仍然需要后续大规模临床试验探索^[14]。

^{18}F -FET与 ^{18}F -DOPA对脑肿瘤的诊断也具有一定价值。Dunkl等^[15]对26例疑似患有脑肿瘤的儿童和青少年进行了 ^{18}F -FET PET/CT显像。病理结果显示26例患儿中有19例肿瘤病灶和7例非肿瘤病灶; 当T/N比值大于1.7时, ^{18}F -FET PET显像对鉴别肿瘤病灶和非肿瘤病灶的灵敏度、特异度、阳性预测值和准确率分别为79%、71%、88%和77%。Morana等^[16]首次报道了 ^{18}F -DOPA PET/MRI在儿童幕上星形细胞瘤的前瞻性试验研究, 研究对13例患儿进行 ^{18}F -DOPA PET/MRI, ^{18}F -DOPA的摄取在高级别和低级别星形细胞瘤中差异有统计学意义。另一项包含27例患儿的研究也报道了 ^{18}F -DOPA在儿童幕上浸润性胶质瘤的诊断价值, ^{18}F -DOPA在鉴别胶质瘤和非肿瘤病灶的灵敏度、特异度和准确率分别为76%、83%和78%^[17]。Piccardo等^[18]对22例患有弥漫性中线胶质瘤的患儿进行了 ^{18}F -DOPA PET/CT显像与多模态MRI; 尽管 ^{18}F -DOPA PET/CT与多模态MRI均可以鉴别H3K27M突变型和野生型的弥漫性中线胶质瘤, 但是 ^{18}F -DOPA的脑肿瘤SUV与纹状体SUV的比值 (tumor/striatum SUV ratio, T/S) 是唯一能区分高级别H3K27M突变型和野生型弥漫性中线胶质瘤的参数, 可为儿童弥漫性中线胶质瘤的分子学诊断提供新的生物学依据。 ^{18}F -DOPA在纹状体中有一定的生理性摄取, 对纹状体受累的儿童脑肿瘤的诊断有一定的影响; 但是 ^{18}F -DOPA PET/MRI融合影像提高了诊断的准确率, 对背侧及腹侧纹状体的浸润程度的评估更加准确^[19]。

2.2 儿童脑肿瘤的活检计划制订

由于儿童脑肿瘤在组织结构上的异质性较大, MRI

往往会出现非特异性的影像学特征,导致部分活检组织样本不具有诊断性。PET显像提供了肿瘤代谢相关的生物学信息,与MRI的形态学图像相融合,为儿童脑肿瘤立体定向活检的靶点选择提供了依据。Pirotte等^[20-21]对¹¹C-MET PET显像引导的儿童脑肿瘤活检术进行了研究:在35例立体定向活检术中,¹¹C-MET PET显像引导的24例活检均穿刺到肿瘤组织,而MRI引导的活检中有7例活检组织不具有诊断性;同时研究发现¹¹C-MET PET显像引导穿刺的肿瘤组织病理学分级均高于MRI引导的活检组织,在不增加穿刺轨迹数量的同时,提高了立体定向活检的准确率。Messing-Jünger等^[22]报道了2例¹⁸F-FET PET/MRI融合图像和磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)作为引导的小儿脑肿瘤活检术:第1例病例的左侧小脑桥角区的MRS峰值正常,但¹⁸F-FET PET/MRI提示左侧小脑桥角区有¹⁸F-FET高浓聚灶,T/N比值为3.8,立体活检最终证实该处病灶为间变性星形细胞瘤(WHO分级为Ⅲ级);第2例病例的双侧丘脑均有较高的¹⁸F-FET摄取,其中背侧丘脑的中线区和左侧丘脑枕的T/N比值为1.6,左侧丘脑枕的病理结果提示为弥漫性星形细胞瘤(WHO分级为Ⅱ级)。这篇病例报告利用¹⁸F-FET PET/MRI为肿瘤的活检提供了靶点,提高了儿童散发性胶质瘤的诊断率,为接下来大规模活检试验提供了概念验证的数据。

2.3 儿童脑肿瘤的预后评估

影响儿童脑肿瘤的预后因素有很多,包括年龄、Karnofsky功能状态评分、肿瘤分级、肿瘤增殖指数(Ki-67)和病理分子标志物等。有研究表明,PET显像的半定量指标同样是儿童脑肿瘤的预后因素。Utriainen等^[10]发现¹⁸F-FDG和¹¹C-MET PET显像的T/N比值与儿童脑肿瘤的进展有关,随访期死亡的患儿与存活的患儿的T/N比值差异有统计学意义。Lucas等^[23]对31例脑肿瘤患儿行¹¹C-MET PET显像,90%的病例中¹¹C-MET摄取增高的区域与肿瘤复发的区域高度重叠,表明¹¹C-MET在脑肿瘤的积聚与肿瘤复发有关;Tinkle等^[24]在儿童弥漫性中线胶质瘤的研究中也验证了这一观点。¹⁸F-DOPA在预测儿童脑肿瘤的预后也有一定的价值。Morana等^[17]对27例浸润性胶质瘤患儿进行¹⁸F-DOPA PET显像,发现¹⁸F-DOPA的摄取分别与无进展生存期(progression-free survival, PFS)和总生存期(overall survival, OS)有相关性。Morana等^[16, 25]对星形细胞瘤的研究,也验证了¹⁸F-DOPA对PFS的预测价值。

2.4 儿童脑肿瘤的复发监测

MRI是儿童脑肿瘤治疗后随访的主要检查手段。由于儿童脑肿瘤经过手术切除及放射治疗(放疗)和化学治疗(化疗),其MRI的影像学特征存在非特异性,对于肿瘤残留以及复发的检出率有限,而PET显像通过对肿瘤活性病灶的检测,可以及时发现肿瘤的残余病灶以及复发灶,对MRI提供的影像学诊断进行有效的互补。Pirotte等^[26]对¹¹C-MET PET显像在脑肿瘤患儿早期术后评估进行了研究:20例接受神经胶质瘤切除术的患儿在术后进行¹¹C-MET PET显像,在14例患儿中发现¹¹C-MET的摄取增加,这14例患儿中有11例接受了二次手术,术后被证实是肿瘤组织;其他6例¹¹C-MET PET阴性的患儿,在MRI的随访中,被证实没有肿瘤进展。¹¹C-MET PET比MRI更好地识别沿着功能皮质浸润的脑肿瘤。研究^[20-21]表明¹¹C-MET在术后残存组织中的积聚与该部位肿瘤组织的残留高度相关,根据¹¹C-MET PET显像进行肿瘤浸润范围的勾画,可以优化儿童脑肿瘤的切除范围和放疗靶区,提高患者的预后生存。Dunkl等^[15]使用¹⁸F-FET PET显像检测儿童脑肿瘤的进展及复发,基于¹⁸F-FET静态显像的准确率达到79%,而基于¹⁸F-FET动力学参数的PET显像准确率略高于静态显像(82%),意味着动态PET显像在儿童脑肿瘤的进展及复发有一定的预测价值。

2.5 儿童脑肿瘤的疗效评估

PET显像对肿瘤治疗效果的评估价值已经得到临床的肯定,然而目前使用氨基酸PET显像评估儿童脑肿瘤疗效的临床试验较少。Dunkl等^[15]在一项探索性试验中报道了4例使用¹⁸F-FET PET/CT显像评估化疗效果的脑肿瘤患儿,化疗后4例患儿的¹⁸F-FET的摄取值与基线PET相比均明显下降,且化疗期¹⁸F-FET摄取值的下降与稳定的临床进程相关。Gauvain等^[27]对6例复发脑肿瘤的患儿进行¹⁸F-DOPA PET/MRI,用以检测贝伐珠单抗对复发性脑肿瘤的早期反应;在开始治疗前与治疗第4周对患儿进行¹⁸F-DOPA PET/MRI,发现肿瘤代谢体积(metabolic tumor volume, MTV)的变化范围为23%~98%;在随后3个月的MRI随访中,MTV的变化率与PFS有一定的相关性。该研究对¹⁸F-DOPA在评估药物疗效方面进行了一定的探索。

3 小结

氨基酸PET/CT与PET/MRI在儿童脑肿瘤中的临床应

用展现出广阔的前景,在儿童脑肿瘤的诊断与分级、活检计划制订、预后评估、复发监测与疗效评估等方面具有重要的作用。由于现阶段儿童脑肿瘤的研究入组病例数量较少,未来还需要大规模的临床试验进行验证。在成人脑肿瘤的PET研究中,国内外已经有多种显像剂应用于临床试验,包括氨基酸代谢显像剂、葡萄糖代谢显像剂、核酸代谢显像剂、胆碱代谢显像剂,以及乏氧显像剂等。肿瘤细胞特定膜抗原与免疫检查点成为肿瘤研究的热点,抗血管

内皮生长因子A(vascular endothelial growth factor A, VEGF-A)、程序性死亡受体1(programmed death-1, PD-1)、细胞毒性T淋巴细胞相关抗原4(cytotoxic T-lymphocyte associated antigen-4, CTLA-4)等均为分子成像的潜在靶标。另一方面,PET/MRI等新技术的普及,使得脑肿瘤成像的质量、分辨率等方面均有所提升,大大提高了诊断的灵敏度和特异性,为儿童脑肿瘤的精准医疗奠定了基础。

参·考·文·献

- [1] Ostrom QT, Patil N, Cioffi G, et al. CBTRUS statistical report: primary brain and other central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2013-2017[J]. *Neuro Oncol*, 2020, 22(12 suppl 2): iv1-iv96.
- [2] Louis DN, Perry A, Reifenberger G, et al. The 2016 World Health Organization classification of tumors of the central nervous system: a summary[J]. *Acta Neuropathol*, 2016, 131(6): 803-820.
- [3] 梅芬,邱若薇,麦益颖,等. 儿童脑肿瘤治疗历史、现状及展望[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2020, 20(4): 258-262.
- [4] 王鑫,王凯,艾林. 脑胶质瘤¹¹C-MET PET-CT成像的研究进展[J]. *中华神经外科杂志*, 2018, 34(10): 1073-1076.
- [5] Warburg O. On the origin of cancer cells [J]. *Science*, 1956, 123(3191): 309-314.
- [6] Chiaravalloti A, Filippi L, Ricci M, et al. Molecular imaging in pediatric brain tumors[J]. *Cancers (Basel)*, 2019, 11(12): E1853.
- [7] 胡彬,胡海勇. ¹⁸F-FET PET显像在脑胶质瘤诊断中的临床应用进展[J]. *医疗卫生装备*, 2018, 39(6): 96-101.
- [8] 王静楠,罗亚平,霍力,等. ¹⁸F-DOPA PET/CT显像的研究进展[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2020, 40(2): 113-117.
- [9] O' Tuama LA, Phillips PC, Strauss LC, et al. Two-phase ¹¹C L-methionine PET in childhood brain tumors[J]. *Pediatr Neurol*, 1990, 6(3): 163-170.
- [10] Utriainen M, Metsähonkala L, Salmi TT, et al. Metabolic characterization of childhood brain tumors: comparison of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose and ¹¹C-methionine positron emission tomography[J]. *Cancer*, 2002, 95(6): 1376-1386.
- [11] Phi JH, Paeng JC, Lee HS, et al. Evaluation of focal cortical dysplasia and mixed neuronal and glial tumors in pediatric epilepsy patients using ¹⁸F-FDG and ¹¹C-methionine pet[J]. *J Nucl Med*, 2010, 51(5): 728-734.
- [12] Kaplan AM, Lawson MA, Spataro J, et al. Positron emission tomography using [¹⁸F] fluorodeoxyglucose and [¹¹C] L-methionine to metabolically characterize dysembryoplastic neuroepithelial tumors[J]. *J Child Neurol*, 1999, 14(10): 673-677.
- [13] Rosenberg DS, Demarquay G, Jouvett A, et al. [¹¹C]-Methionine PET: dysembryoplastic neuroepithelial tumours compared with other epileptogenic brain neoplasms[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2005, 76(12): 1686-1692.
- [14] 周惠君,董萍,沈国华,等. ¹¹C-蛋氨酸PET/CT显像在脑胶质瘤中的应用价值[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2015, 39(2): 161-164.
- [15] Dunkl V, Cleff C, Stoffels G, et al. The usefulness of dynamic O-(2-¹⁸F-fluoroethyl)-L-tyrosine PET in the clinical evaluation of brain tumors in children and adolescents[J]. *J Nucl Med*, 2015, 56(1): 88-92.
- [16] Morana G, Piccardo A, Milanaccio C, et al. Value of ¹⁸F-3, 4-dihydroxyphenylalanine PET/MR image fusion in pediatric supratentorial infiltrative astrocytomas: a prospective pilot study[J]. *J Nucl Med*, 2014, 55(5): 718-723.
- [17] Morana G, Piccardo A, Puntoni M, et al. Diagnostic and prognostic value of ¹⁸F-DOPA PET and ¹H-MR spectroscopy in pediatric supratentorial infiltrative gliomas: a comparative study[J]. *Neuro Oncol*, 2015, 17(12): 1637-1647.
- [18] Piccardo A, Tortora D, Mascelli S, et al. Advanced MR imaging and ¹⁸F-DOPA PET characteristics of H3K27M-mutant and wild-type pediatric diffuse midline gliomas[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46(8): 1685-1694.
- [19] Morana G, Puntoni M, Garrè ML, et al. Ability of ¹⁸F-DOPA PET/CT and fused ¹⁸F-DOPA PET/MRI to assess striatal involvement in paediatric glioma[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016, 43(9): 1664-1672.
- [20] Pirotte BJ, Lubansu A, Massager N, et al. Clinical impact of integrating positron emission tomography during surgery in 85 children with brain tumors[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2010, 5(5): 486-499.
- [21] Pirotte B, Acerbi F, Lubansu A, et al. PET imaging in the surgical management of pediatric brain tumors[J]. *Childs Nerv Syst*, 2007, 23(7): 739-751.
- [22] Messing-Jünger AM, Floeth FW, Pauleit D, et al. Multimodal target point assessment for stereotactic biopsy in children with diffuse bithalamic astrocytomas[J]. *Childs Nerv Syst*, 2002, 18(8): 445-449.
- [23] Lucas JT Jr, Serrano N, Kim H, et al. ¹¹C-Methionine positron emission tomography delineates non-contrast enhancing tumor regions at high risk for recurrence in pediatric high-grade glioma[J]. *J Neurooncol*, 2017, 132(1): 163-170.
- [24] Tinkle CL, Duncan EC, Doubrovina M, et al. Evaluation of ¹¹C-methionine PET and anatomic MRI associations in diffuse intrinsic pontine glioma[J]. *J Nucl Med*, 2019, 60(3): 312-319.
- [25] Morana G, Piccardo A, Tortora D, et al. Grading and outcome prediction of pediatric diffuse astrocytic tumors with diffusion and arterial spin labeling perfusion MRI in comparison with ¹⁸F-DOPA PET[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 44(12): 2084-2093.
- [26] Pirotte B, Levivier M, Morelli D, et al. Positron emission tomography for the early postsurgical evaluation of pediatric brain tumors[J]. *Childs Nerv Syst*, 2005, 21(4): 294-300.
- [27] Gauvain K, Ponisio MR, Barone A, et al. ¹⁸F-FDOPA PET/MRI for monitoring early response to bevacizumab in children with recurrent brain tumors[J]. *Neurooncol Pract*, 2018, 5(1): 28-36.

[收稿日期] 2020-07-05

[本文编辑] 徐 敏

