

综述

高原性心脏病影像学评估方法研究进展

耿盼^{1,2}, 王瑞³, 韩燕霞⁴, 何耀², 王嫣艳^{1,4}, 冯壮浩^{1,4}, 邢媛⁴

¹甘肃中医药大学公共卫生学院, 甘肃兰州 730000; ²解放军联勤保障部队第940医院放射诊断科, 甘肃兰州 730050; ³首都医科大学附属北京安贞医院影像科, 北京 100013; ⁴解放军联勤保障部队第940医院检验科, 甘肃兰州 730050

[中图分类号] R445

[文献标志码] A

[DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.0202.2026.0526

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 耿盼, 王瑞, 韩燕霞等. 高原性心脏病影像学评估方法研究进展[J]. 解放军医学杂志, DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.0202.2026.0526.

[收稿日期] 2026-01-28

[录用日期] 2026-03-21

[上线日期] 2026-05-26

[摘要] 高原性心脏病(HAHD)是严重威胁高原人群健康的公共卫生疾病, 其以长期慢性缺氧导致肺血管重塑及重构, 进而引起肺动脉高压为病理基础, 最终引发右心衰竭, 甚至全心衰竭。临床表现复杂且早期诊断困难, 常规生理检测易误诊漏诊, 而影像学检查已成为其临床诊断的重要辅助手段。本文综述了HAHD的临床特征与诊断标准, 系统分析了超声心动图、CT血管成像、心脏磁共振等常用影像学方法的优势、适用范围及局限性。随着技术的更迭和人工智能的不断开发, 多模态成像和人工智能的融合将成为该领域的研究热点。未来, 二者的深度结合, 有望实现HAHD的早期精准诊断、疗效监测与预后评估, 并为其临床精准防治提供技术支撑。

[关键词] 高原性心脏病; 肺动脉高压; 病理机制; 影像学检查; 诊断标准

Research progress in imaging evaluation methods for high-altitude heart disease

Geng Pan^{1,2}, Wang Rui³, Han Yan-Xia⁴, He Yao², Wang Yan-Yan^{1,4}, Feng Zhuang-Hao^{1,4}, Xing Yuan^{4*}¹School of Public Health, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou, Gansu 730000, China,²Department of Radiological Diagnosis, ³Department of Clinical Laboratory, the 940th Hospital of the Joint Logistics Support Force of the Chinese PLA, Lanzhou, Gansu 730050, China⁴Department of Imaging, Beijing Anzhen Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 100013, China

*Corresponding author, E-mail: lzxyingyuan1987@126.com

This work was supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province (23JRRA1671)

[Abstract] High-altitude heart disease (HAHD) is a major public health disorder that poses a serious threat to the health of populations residing at high altitudes. It is a cardiac disease pathologically characterized by chronic long-term hypoxia-induced pulmonary vascular remodeling, which in turn leads to pulmonary arterial hypertension and eventually progresses to right heart failure or even biventricular heart failure. HAHD presents with complex clinical manifestations, rendering early diagnosis challenging. Currently available routine physiological detection methods are highly susceptible to misdiagnosis or missed diagnosis. In contrast, imaging examination methods are more comprehensive and specific, as well as simple to perform and non-invasive. These techniques can accurately assess the severity of pulmonary arterial hypertension and changes in cardiac function, thus emerging as indispensable auxiliary examination methods for the clinical diagnosis of HAHD. This article mainly reviews the clinical characteristics, diagnostic criteria and currently used imaging examination methods of HAHD, and briefly discusses the limitations of existing research and future development directions.

[Key words] high-altitude heart disease; pulmonary hypertension; pathological mechanism; imaging examination; diagnostic criteria

全球约有 8160 万人生活在海拔 ≥ 2500 m(占总人口的 1.07%)的高海拔地区, 其中中国高原地区绝大

[基金项目] 甘肃省自然科学基金项目(23JRRA1671)

[作者简介] 耿盼, 硕士研究生, 主治医师, 主要从事高原性心脏病发生的分子机制及影像学表现方面的研究

[通信作者] 邢媛, E-mail: lzxyingyuan1987@126.com

部分人生活在海拔 ≥ 3500 m的极高海拔地区^[1]。近年来,随着高原旅游、工作和军事活动的增加,人口流动加大,使高原地区人口数量急剧增加,慢性高原病(chronic mountain sickness, CMS)的发病率也在逐年增高,已成为高原人群严重的公共健康问题^[2]。其中,高原性心脏病(high-altitude heart disease, HAHD)是CMS中的常见类型,指生活在海拔 ≥ 2500 m高原地区的世居者或移居者,因长期慢性暴露于高原低氧环境而引起的心脏结构和功能异常,主要表现为肺动脉高压(pulmonary hypertension, PH)、右心室肥厚或右心功能不全,晚期可出现右心衰竭或全心衰竭的心脏疾病^[3-4]。因此,早期诊断和准确评估HAHD,对改善患者的预后至关重要。本文主要综述HAHD的临床特征、诊断标准及常用影像学评估方法,并简要探讨当前研究的不足与未来发展方向,旨在提高临床医师对该病的认识及在临床工作中合理选择检查方法,以提高临床诊疗率。

1 HAHD的临床特征及诊断标准

高原环境恶劣,以低压低氧对机体的影响最为严重,未经适应的低海拔地区人群一旦进入海拔 ≥ 2500 m的高原地区,可因缺氧而产生一系列的高原反应症状,如头痛头晕、胸闷气喘、呼吸困难、心悸、发绀、下肢水肿等,严重者甚至出现昏迷。心脏又是一个高耗氧器官,长期慢性缺氧会引起肺血流动力学改变、肺小血管收缩及重构,进而引起PH、右心室肥厚,这也是HAHD发生的最重要的病理生理基础^[2,5]。目前HAHD的临床诊断多采用“青海标准”^[3]:生活在海拔 ≥ 2500 m地区的人群,出现呼吸困难、咳嗽、发绀等右心衰竭症状,右心导管检查(right heart catheterization, RHC)显示平均肺动脉压(mPAP) >30 mmHg或肺动脉收缩压 >50 mmHg,且出现右心室肥大,存在中度低氧血症,无红细胞增多症[女性血红蛋白(Hb) <19 g/dl,男性Hb <21 g/dl],成人需排除慢性阻塞性肺疾病、肺间质疾病及冠心病等其他心血管疾病,小儿需排除新生儿持续性高原PH等,转往低海拔地区病情即明显好转。心电图提示QRS波群电轴右偏、右心室肥大可协助诊断。一些可反映心脏功能和损伤程度的生物标志物,如脑钠肽(BNP)、N-末端脑钠肽前体(NT-proBNP)、肌钙蛋白水平等可升高,对临床诊断及预后评估有一定帮助。但HAHD与其他心脏疾病的症状相似,临床单一诊断手段极易出现误诊和漏诊,而影像学检查方法操作简单、无创,检测全面且准确性高,在HAHD的评估中具有明显的优势和价值。

2 HAHD的影像学评估方法

HAHD的主要病理生理基础是肺小动脉收缩及重构所致的PH,国际上又称为高原性肺动脉高压(high altitude pulmonary hypertension, HAPH)^[3-4],临床一般以经RHC检查为金标准来衡量患者的PH程度,但由于是有创检查,且检测费用昂贵,操作复杂,因而在大范围临床筛查中的应用受到限制。而影像学检查操作简单且无创,费用也相对低廉,还能同时评估心功能改变情况,目前已成为HAHD的主要评估手段。HAHD患者主要出现右心功能及结构改变^[6],常因右心衰竭而死亡,临床治疗与预后判断也是围绕右心系统,所以影像学主要评估右心系统结构与功能变化,而右心形态不规则且位置特殊,以及射血分数的负荷依赖性,使右心功能的准确评估仍然具有挑战性^[7]。胸部X线虽可显示肺动脉圆锥突出、心影增大等特点,但不能观察内心结构及心功能变化情况,且受干扰因素太多,诊断价值有限。临床目前常用且相对较成熟的影像检查方法有超声心动图(ultrasonic cardiogram, UCG)、CT血管成像(CT angiography, CTA)及心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)检查,这些检查方法的应用,极大地提高了HAHD的影像诊断价值。

2.1 超声心动图(UCG) UCG是一种无创便捷的检查方法,它安全、可重复,价格亦相对低廉,目前在PH的评估中起主导作用,同时还可直观地显示心脏的结构和功能的变化,已被推荐为一线的非侵入式检查方法^[8]。UCG可评估HAHD患者的肺动脉内径、肺动脉收缩压、右心房室大小及室壁运动、右心室流出道、右心室射血分数(right ventricle ejection fraction, RVEF)、三尖瓣及肺动脉瓣运动、反流等情况^[9]。此外,UCG还可发现一些并发症,如心包积液、心内膜炎等。因此,UCG是评估HAHD的重要方法之一。

我国高原医学会制订的HAHD超声诊断标准为:右心室流出道 >33 mm,右心室舒张末期内径 >23 mm^[10]。然而,这只能在HAHD中晚期才可能检测出来,而在HAHD的早期,心脏结构变化不明显,心功能受影响较小,常规UCG指标无法检测心脏的细微结构改变,故超声无法对心功能进行早期评估。近年来出现的一些新的检测方法可对HAHD的早期改变进行评估,如测量三尖瓣环收缩期位移(tricuspid annular planar excursion, TAPSE)可对右心室收缩功能进行早期定量评价,尤其是纵向收缩功能:当TAPSE <16 mm时提示右心收缩功能减退^[11], ≤ 14 mm是预后不良的独立预测因子,也是预测慢性心力衰竭患者的重要因子之一^[12]。国内外研究也已

证实, TAPSE测量简便, 重复性良好, 不依赖于右心室的几何形态, 且与MRI所测RVEF结果具有明显的相关性, 是评价右心室功能简单、可靠的指标^[13]。但TAPSE是以二维局部位移来反映三维功能, 且受心脏整体运动影响, 无法真实反映右心室的整体收缩功能。而组织多普勒Tei指数(又称心肌做功指数)可对心脏整体收缩及舒张功能进行综合评价。右心室Tei指数可敏感地反映PH及HAHD患者右心整体收缩及舒张功能, 肺动脉压力越高, 右心室心肌做功指数就越大^[14-15]。当Tei指数 >0.45 时即可表明右心室收缩及舒张功能异常^[16]。因此, 在尚无右心形态学改变之前, 该项指标升高可早期预警HAHD诊断, 已成为临床全面评估右心室整体功能的重要参考指标。

另外, 斑点追踪超声心动图(speckle tracking echocardiography, STE)可通过二维及三维的方式对局部或整体心肌的运动和变形能力进行量化分析^[17], 有助于早期发现局部心肌功能的异常。Prihadi等^[18]对896例显著功能性三尖瓣反流患者进行STE检查发现, 右心室游离壁纵向应变对右心功能障碍的检出率为84.9%, 高于TAPSE(71.7%)及右心室面积变化分数(right ventricle fractional area change, RVFAC)(48.5%), 可作为判断右心功能障碍及预后的重要指标。而Jacquemyn等^[19]也发现, 右心房室应变及应变率的降低可预测致心律失常性心肌病患者发生心力衰竭的风险。右心室纵向形变已被证明对评估右心室功能是敏感和稳定的^[20], 而STE所测的右心室纵向心肌应变可更敏感、更准确地检测右心室功能的早期和微小变化^[21], 且无角度依赖性, 同时还可有效降低操作者自身和操作者之间分析的变异性, 在多数情况下优于常规的UCG参数。目前, 该项技术各种心脏疾病的检查中已得到广泛应用^[17,22], 但受高原医疗条件限制, 在HAHD的心功能分析中尚未开展。

UCG设备便携、价格低廉、可床旁操作, 适合高原基层医院、野外医疗点的大范围初筛, 可快速筛选出疑似PH或HAHD患者, 是高原地区的一线检查手段; 但其图像质量易受骨骼及肺内气体的干扰, 且右心室形态不规则(呈新月形), 致使没有一个标准的测量平面用于横向比较; 同时易受操作者手法及患者心率等其他自身条件的影响, 故干扰因素较多, 影响检测结果的准确性; 另外UCG亦无法反映HAHD患者早期心脏代谢方面信息, 需结合其他检查结果综合考虑。

2.2 CT血管成像(CTA) CTA具有扫描时间短, 时间和空间分辨率高等优势, 能够全面评价心肺结构。CTA可清晰地显示肺动脉主干及各级分支、心脏形

态及结构等, 测量肺动脉管径、弹性及心室壁厚度、心室容积、心功能等各项参数, 还可同时显示患者双肺有无肺水肿发生。研究发现, 肺动脉主干(main pulmonary artery, MPA)的直径 ≥ 30 mm时, 诊断PH的敏感度为90.8%、特异度为66.7%, 因此, MPA扩张在一定程度上可用于评估PH^[23]; 且MPA与升主动脉的直径比(AAo) >1.0 较单独MPA直径更能预测PH^[7]。朱进等^[24]通过对82例COPD患者的研究证实, 多层螺旋CT结合心电门控技术和心功能分析软件, 可实现右心形态和功能学的准确评估, 且与超声心动图所测右心功能指标具有较高的相关性。但因CTA具有电离辐射, 孕妇及儿童应谨慎使用; 此外, 由于碘对比剂有致敏的风险, 对于有碘过敏、甲亢及肾功能不全的患者来说, 其使用受到限制。因此, 目前不推荐CTA为一线检查方式, 仅用于UCG初筛后的疑似病例、需精准分级PH的患者, 以及合并肺血管或肺实质病变的复杂病例。

2.3 心脏磁共振(CMR) CMR是一种无创、无电离辐射且软组织分辨率高的影像检查方法, 采用多参数成像方式, 重复性好, 可对心脏结构、功能及心肌组织活性进行“一站式”综合评估, 右心结构方面更有优势^[25], 是国际公认的右心功能评估“金标准”^[26]。它可准确量化心肌炎症和纤维化, 对心肌病的研究有很大帮助^[26-27], 是诊断和评估慢性HAHD的理想方法^[28]。

CMR可对HAHD的形态和功能进行评价。CMR的黑血、亮血技术及稳态自由进动心脏电影序列, 可从不同方位显示心脏结构、运动、血流及功能等情况。一项荟萃分析显示, CMR所测右心室重塑参数在PH患者死亡风险及愈后判断方面具有独立的预测价值, 其中RVEF是所有参数中价值最高的预测因子^[29]。而陈静^[30]的研究亦证实, CMR不仅可准确地测量MPA的内径, 还可早期发现并有效评估右心结构和功能改变, 有利于对患者进行早期干预及治疗, 具有临床实用价值。这些均表明CMR在右心功能及PH评估方面具有重要价值, 可用于HAHD的早期预测和评估。CMR显示, HAHD主要表现为右心室扩大、室壁增厚, 以室间隔为著, 肌小梁增粗紊乱, 室壁运动减慢, 严重者可出现室间隔抖动, 三尖瓣关闭不全等^[6,31]。另有研究发现, CMR所显示的HAHD形态及结构改变与病理结果高度一致, 且可在RVEF减低前出现右心室舒张及收缩末期容积扩大的情况, 为早期评估心功能损伤提供了重要证据^[28,32]。右心功能改变是HAHD的重要临床特征, 也是影响预后的重要因素。CMR特征追踪技术(CMR feature tracking, CMR-FT)可定量评估整体及局部心肌运动能力, 敏感地反映出心室重构过程中心

肌力学的早期细微变化,在反映右心功能早期改变方面优于传统射血分数^[33-34]。de Siqueira等^[35]对110例慢性PH患者使用CMR-FT分析其右心室应变情况发现,与无PH和RVEF正常的患者相比,PH和RVEF异常患者的所有应变和应变率均明显降低,且PH和RVEF正常组的应变率也明显降低,提示CMR-FT在无创评估PH及早期右心室失代偿方面具有潜在的应用价值。

CMR还可对HAHD心肌损伤进行早期评价,包括心肌水肿、纤维化及代谢等,其价值是其他检查所不能相比的。心肌水肿是多种心脏疾病的早期表现,早期诊断和明确水肿范围有助于挽救受损心肌。心肌水肿在CMR T₂呈高信号,但检出率较低;近几年出现的T₂ mapping技术在检测心肌水肿方面较敏感,还可用于跟踪心肌水肿的消退情况,且不受运动伪影的影响,被认为是评价心肌水肿程度的最佳手段^[36]。心肌纤维化可破坏心肌结构及诱发心律失常,加快心功能不全的发展,影响心衰患者的临床病程及预后^[37]。心肌活检是诊断心肌纤维化的“金标准”,但该技术为有创性检查,且采样面积小,在临床的应用较局限。CMR延迟强化技术(late gadolinium enhancement, LGE)可清晰显示出1 cm³的纤维化区域,并与组织学结果具有高度一致性^[38]。研究发现,HAHD患者在LGE时可出现右心室壁、室间隔前后插入部及心室乳头肌的强化^[31]。但LGE只在检测局灶心肌纤维化方面较敏感,对于弥漫性心肌间质纤维化则不敏感,而T₁ mapping技术则可通过计算细胞外容积分数(extracellular volume, ECV)来无创定量评估弥漫性心肌纤维化,可作为LGE的补充和替代技术^[39]。蒋月薪^[40]对32例HAHD患者进行研究发现,ECV对心肌纤维化具有较高的诊断价值,LGE联合T₁ mapping技术可无创评估和定量心肌纤维化程度,对HAHD的早期诊断和监测疾病进程具有重要意义。此外,还可通过磁共振弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)来评估心肌间质纤维化,提高HAHD心肌纤维化的诊断率。慢性高原缺氧会引起心肌代谢紊乱,而磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)和化学交换饱和位移(chemical exchange saturation transfer, CEST)技术可无创性的观察活体组织代谢情况,分析各种代谢物的相对浓度,从分子水平反映心肌细胞能量变化,可用于评估HAHD患者心肌代谢情况,但技术要求较高,且受高原医疗资源限制,目前还未有相关方面的报道。

CMR在HAHD的早期精确诊疗中具有明显的优势,但其检查时间较长,价格昂贵,受高原地区医疗资源限制,无法用于基层医院或野外医疗点的大

范围筛查,同时一些体内有金属植入物的患者或有幽闭恐惧症的患者亦禁止做CMR,故限制了其在临床中的广泛应用,目前多用于上级医院对UCG筛查的疑似病例确诊和详细评估。

2.4 多模态成像技术与人工智能(AI) HAHD病理机制复杂,传统单一影像学评估方法难以全面捕捉疾病特征。近年来,多模态成像技术与AI的深度融合,为HAHD的早期诊断、病情分级及预后预测提供了突破性解决方案,已成为该领域的研究热点。

多模态成像技术可整合不同维度的影像学信息,构建HAHD的立体化评估体系。颜春龙等^[25]对25例世居高海拔地区的健康成人进行CMR与UCG对比研究发现,CMR测得的左心室射血分数低于UCG的检测值,而其测定的右心结构及心功能方面的测量值与UCG一致性较高。张鑫媛等^[41]发现,STE联合CMR在PH所致右心室重构的评估中具有重要意义,其中STE所测右心室应变参数升高提示CMR所测室间隔延迟强化组PH患者右心室功能受损更严重。靖立芹等^[42]发现,CMR联合UCG在先天性心脏病并PH患者诊断中的价值明显高于单一的检查方式。上述研究表明,UCG和CMR联合可提高HAHD的检出率,可用于基层医院高度怀疑HAHD而UCG无法准确评估时,同时建议患者到上级医院进一步行CMR检查。同样,CT肺动脉成像联合UCG对PH患者心功能损害的诊断价值高于单一的检测方法,二者联合应用可提高PH患者心功能损害的早期诊断率^[43]。董宁利等^[44]发现,CT肺动脉造影联合UCG有助于评估PH程度,二者联合在鉴别无、轻、中和重度PH方面具有更好的准确性。因此,二者联合可用于UCG显示PH但又无法准确评估病因时,可加做CTA以了解是否存在肺血管畸形、肺栓塞或其他心肺疾病。上述研究提示,多模态成像技术可在快速初筛的基础上精准量化心功能及肺功能改变,联合应用可实现“形态-功能-组织学”的多维度精确诊疗,提高早期检出率;此外,HAHD的高发区多为高原偏远地区,医疗资源分布不均,联合应用可形成“基层筛查+上级确诊”的诊疗链条,兼顾了筛查效率与诊断精度,更适配高原地区医疗资源分布的特点。但目前不同联合方案的适用场景仍未明确划分,现有的联合应用研究结果多为单中心小样本数据,普适性差,缺乏多中心大样本研究验证联合方案的诊断效能,亦未建立“形态学指标+功能学指标+组织学指标”的联合评分体系,无法实现HAHD病情的量化分级。

AI技术的介入实现了多模态数据的深度挖掘与精准解读。基于深度学习的特征提取与融合算法,打破了传统人工分析的主观局限性,将宏观影像信

息与微观病理分子信息相关联，从而为临床诊断、治疗决策和预后评估等提供了量化依据。目前AI技术已广泛应用于心血管成像，其应用范围包括不同心肌病的诊断、先天性心脏病的分类、心肌梗死后的风险预测及预后评估等^[26,45]。未来需通过多中心协作构建HAHD专属数据库，优化跨模态数据融合算法，推动AI辅助多模态评估在高原地区的规模化应用，为HAHD的精准防治提供更坚实的技术支撑。

3 总结与展望

HAHD作为高原环境下特有的心血管疾病，准确评估病情对于早期诊断、治疗和预防具有重要意义，影像学检查因无创、全面的优势已成为其诊断与评估的核心辅助手段。现将HAHD影像学评估方法的核心优势、适用范围及主要局限性汇总于表1，以方便临床医师在诊疗中针对患者病情及时选择合适的检查方法。

表1 高原性心脏病(HAHD)影像学评估方法汇总

Tab.1 Summary of imaging evaluation methods for high-altitude heart disease (HAHD)

影像学检查方法	核心优势	适用范围	主要局限性
胸部X线	操作简便、价格低廉，可快速完成初筛；能初步显示肺动脉圆锥突出、心影增大等HAHD典型形态学征象；可整体观察心肺形态，快速排除明显的肺部/心脏形态异常疾病	HAHD的基层医院初步筛查；高原地区大规模人群的初筛排查；与其他心肺疾病的初步鉴别诊断	无法观察内心细微结构及心功能动态变化，诊断价值有限；受胸廓、体位等因素干扰多，特异性低，无法早期诊断HAHD；不能量化PH程度及右心功能损害等级；对轻微肺血管及心脏结构改变不敏感
超声心动图(UCG)	无创、便捷、可重复操作，为HAHD一线非侵入式检查；直观显示心脏结构与功能，可评估肺动脉内径、收缩压、右心室大小、瓣膜运动/反流等核心指标；TAPSE可用于早期定量评价右心室纵向收缩功能；Tei指数可综合评估右心整体舒缩功能，实现HAHD早期预警；STE可量化心肌运动/变形能力，无角度依赖性，对早期心功能异常检出更敏感；可发现心包积液、心内膜炎等HAHD并发症，适用于床旁检查及病情动态监测	HAHD的常规筛查、早期初步诊断及病程动态监测；右心功能的定量评估，尤其是早期舒缩功能异常的预警；高原地区基层医院、野外医疗点的大范围人群筛查；HAHD患者治疗后疗效的快速评估及并发症监测	图像质量受骨骼、肺内气体、操作者手法及患者心率等因素干扰大；右心室形态不规则，无标准测量平面，横向对比难度大；常规UCG无法检测HAHD早期细微结构改变，STE技术应用较局限；同时无法反映心肌代谢、纤维化等组织学改变，需结合其他检查综合判断；严重肺气肿、胸廓畸形患者成像效果差
CT血管成像(CTA)	扫描时间短，时间/空间分辨率高，可全面评价心肺结构；精准显示肺动脉主干及各级分支，测量肺动脉管径/弹性，判断肺血管重塑情况；同时可清晰显示心脏形态、室壁厚度，结合心电门控可评估右心功能；肺动脉主干直径 ≥ 30 mm或与升主动脉直径比 > 1.0 ，对PH诊断敏感性达90.8% ^[7,23] ；可同时观察双肺有无肺水肿、肺实质病变	HAHD合并肺血管形态异常的评估，PH的辅助诊断与程度预判；HAHD患者肺水肿的同步检出与评估；与UCG联合应用，提高PH诊断、分级及右心功能损害评估的准确性；排除肺栓塞等其他肺血管疾病，评估肺血管解剖结构	存在电离辐射，孕妇、儿童及育龄期女性需谨慎使用；需使用碘对比剂，碘过敏、甲亢、肾功能不全患者禁用；检查费用高于UCG，不适用于大范围筛查及动态监测；无法评估心肌代谢、水肿及纤维化程度，非HAHD一线检查方法；对心律不齐患者，心功能评估准确性受影响
心脏磁共振(CMR)	无创、无电离辐射，软组织分辨率高，为国际公认右心功能评估“金标准” ^[26] ；多参数成像，可“一站式”评估心脏结构、功能、心肌组织活性等；对右心结构评估具独特优势，精准量化右心室容积、射血分数、室壁厚度等；可在RVEF减低前发现心室容积异常，为HAHD极早期诊断提供依据；CMR-FT敏感反映心肌力学早期细微变化，优于传统射血分数； T_2 mapping、LGE、 T_1 mapping可分别精准检测心肌水肿、局灶/弥漫性纤维化，与病理结果高度一致	HAHD的精准诊断、病情严重程度分级及预后判断；右心功能的精准量化评估，尤其是早期隐匿性心功能损伤的检测；心肌水肿、局灶/弥漫性纤维化的早期检测及程度定量评估；慢性HAHD患者心肌/肺血管重塑的全面评估及治疗效果精准监测；HAHD疑难病例的影像学确诊与鉴别诊断	检查时间较长(30~60 min)，对患者配合度要求高，心律不齐者成像质量受影响；设备价格昂贵、普及率低，高原地区基层医院难以开展；体内有金属植入物、心脏起搏器、幽闭恐惧症患者禁用；检查费用高，不适用于大范围筛查及常规动态监测；评估心肌代谢的MRS、CEST等技术要求高，尚无HAHD相关研究报道
多模态成像技术	整合不同检查方法的优势，构建立体化、多维度HAHD评估体系，弥补单一检查局限性；显著提高PH诊断准确性及分级精准度，提升右心功能损害评估的可靠性；可同时实现肺血管形态、心脏结构、心功能的综合评估，减少误诊/漏诊；为HAHD临床治疗方案制定提供更全面、可靠的影像学依据	HAHD的疑难病例诊断与鉴别诊断；PH程度的精准鉴别；右心室重构的全面、精准评估，尤其是早期复杂重构的检测；合并肺血管/肺实质病变的HAHD患者的综合评估；预后不良HAHD患者的风险分层	检查成本高于单一检查，增加医疗花费；缺乏统一的联合评估标准、诊断流程及临床评估指南；检查耗时较长，不适用于急诊及快速筛查

(续 表)

影像学检查方法	核心优势	适用范围	主要局限性
人工智能(AI)辅助多模态成像	实现多模态影像数据深度挖掘与精准解读,打破人工分析的主观性与局限性;关联宏观影像信息与微观病理分子信息,为诊断、治疗、预后提供量化依据;优化跨模态数据融合算法,提高HAHD评估的效率与准确性;可挖掘影像中隐匿的病理特征,提高早期HAHD的检出率;实现HAHD自动化诊断、病情分级及风险分层	HAHD的早期精准诊断、病情分级及预后预测;多中心大样本HAHD数据的标准化分析与研究;高原地区HAHD影像学评估的规模化、标准化应用;HAHD患者治疗效果的自动化评估与预后风险分层	缺乏HAHD专属的标准化影像学数据库,算法需进一步优化与验证;技术门槛较高,需要AI技术人员与影像科医师协作;尚未形成成熟的临床应用体系、行业规范及诊断标准;对原始影像数据质量要求高,低质量数据会影响评估结果;设备及技术成本高,高原地区基层医院推广难度极大

TAPSE. 三尖瓣环收缩期位移; STE. 斑点追踪超声心动图; CMR-FT. 心脏磁共振特征追踪技术; LGE. 延迟强化技术; PH. 肺动脉高压; RVEF. 右心室射血分数; MRS. 磁共振波谱; CEST. 化学交换饱和位移

但是, 由于HAHD病理机制复杂, 临床特征又与其他心血管疾病相似, 单一检查结果缺乏特异性, 且海平面PH的定义标准($mPAP \geq 25$ mmHg)是否适用于高原地区, 个体遗传差异及高原暴露史不同所致的评估结果多样性等问题仍未得到很好的解答, 导致临床目前仍缺乏统一且完善的评估标准和指南。随着影像学技术和AI的不断开发, 多模态成像与AI的融合成为研究热点, 可全方位、多维度地评估HAHD所致PH及右心功能损害情况, 从而可有效弥补单一检查的局限性, 极大地提高临床诊断的准确性, 有望实现HAHD的早期精准诊断、疗效监测和预后评估。

目前的影像学研究仍存在诸多不足, 如单一技术存在固有缺陷, 部分敏感检测技术尚未在HAHD的研究中开展; 多模态成像联合应用缺乏规范流程, AI辅助评估因无HAHD专属数据库, 算法优化不足; 同时高端影像设备普及率低, 与高原基层诊疗场景的适配性较差。未来研究需围绕精准化、标准化与实用化推进, 通过多中心协作建立高原专属的HAHD影像学评估标准与诊断阈值; 深化单一技术的HAHD专属研究, 挖掘敏感技术的临床价值; 规范多模态成像联合流程, 构建专属数据库并优化AI跨模态融合算法; 研发适配高原基层的简易化、便携式影像技术, 推动技术普及。最终实现HAHD的早期精准诊断、疗效动态监测与预后风险分层, 为其精准防治提供坚实的影像学技术支撑。

【参考文献】

[1] Tremblay JC, Ainslie PN. Global and country-level estimates of human population at high altitude[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2021, 118(18): e2102463118.

[2] 吴天一. 我国青藏高原慢性高原病研究的最新进展[J]. 中国实用内科杂志, 2012, 32(5): 321-323.

[3] León-Velarde F, Maggiorini M, Reeves JT, et al. Consensus statement on chronic and subacute high altitude diseases[J]. High Alt Med Biol, 2005, 6(2): 147-157.

[4] 祁生贵, 吴天一. 慢性高原病诊断标准及相关研究[J]. 高原医

学杂志, 2015, 25(4): 1-11.

[5] 韩艺玮, 张致英, 郝美莉, 等. 能量代谢紊乱在高原心脏病发生过程中的作用[J]. 中国病理生理杂志, 2022, 38(6): 1135-1141.

[6] 颜春龙, 齐先龙, 马金凤, 等. MRI对慢性高原病患者心脏结构和功能的评价研究[J]. 医学影像学杂志, 2021, 31(6): 954-957.

[7] Hur DJ, Sugeng L. Non-invasive multimodality cardiovascular imaging of the right heart and pulmonary circulation in pulmonary hypertension[J]. Front Cardiovasc Med, 2019, 6: 24.

[8] 童娜, 冯晓岚, 刘演龙, 等. 超声心动图评估肺高血压的应用进展[J]. 中国心血管病研究, 2022, 20(4): 344-348.

[9] 德央, 史建玲, 尼玛玉珍, 等. 超声心动图评价高原居民右心功能的研究[J]. 中国超声医学杂志, 2021, 37(7): 776-778.

[10] 孟莉, 鲍海华. 慢性高原心脏病的临床与影像诊断价值[J]. 高原医学杂志, 2014, 24(2): 57-59.

[11] 中华医学会超声医学分会超声心动图学组, 中国医师协会心血管分会超声心动图专业委员会. 超声心动图评估心脏收缩和舒张功能临床应用指南[J]. 中华超声影像学杂志, 2020, 29(6): 461-477.

[12] 赵伟强. 超声心动图在肺动脉高压中的临床诊断价值[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(21): 140-142.

[13] Tissot C, Singh Y, Sekarski N. Echocardiographic evaluation of ventricular function-for the neonatologist and pediatric intensivist [J]. Front Pediatr, 2018, 6: 79.

[14] 夏宗敏, 范珺, 周泉, 等. 超声心动图右室心肌工作指数对COPD相关性肺动脉高压的评估价值[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2022, 56(3): 271-275.

[15] 邹霞, 余小华, 次仁卓嘎, 等. 右室Tei指数及P波离散度预测高原性心脏病患者房性心律失常的价值[J]. 皖南医学院学报, 2019, 38(5): 434-437.

[16] Márquez-González H, Vargas MH, Yáñez-Gutiérrez L, et al. Tei index is the best echocardiographic parameter for assessing right ventricle function in patients with unrepaired congenital heart diseases with outflow tract obstruction[J]. Front Pediatr, 2018, 6: 181.

[17] Mandoli GE, Cameli M, Pastore MC, et al. Speckle tracking echocardiography in early disease stages: a therapy modifier? [J]. J Cardiovasc Med, 2023, 24(Suppl 1): e55-e66.

[18] Prihadi EA, van der Bijl P, Dietz M, et al. Prognostic implications of right ventricular free wall longitudinal strain in patients with significant functional tricuspid regurgitation[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2019, 12(3): e008666.

[19] Jacquemyn X, Van den Eynde J, Zhan J, et al. Impaired atrial and ventricular strain predicts heart failure in arrhythmic right

- ventricular cardiomyopathy[J]. *Can J Cardiol*, 2025, 41(2): 215-223.
- [20] Ji X, Zhang J, Xie Y, *et al*. Speckle-tracking echocardiography in right ventricular function of clinically well patients with heart transplantation[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(12): 1305.
- [21] Lv Q, Sun W, Wang J, *et al*. Evaluation of biventricular functions in transplanted hearts using 3-dimensional speckle-tracking echocardiography [J]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(10): e015742.
- [22] 尹闯, 苏雁欣. 斑点追踪超声心动图在心脏疾病中的应用进展[J]. *医学综述*, 2021, 27(3): 560-565, 570.
- [23] 郑亚国, 熊长明, 柳志红, 等. CT测量主肺动脉直径在肺动脉高压诊断中的作用研究[J/OL]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2014, 8(1): 31-35.
- [24] 朱进, 黄胜, 陈均, 等. 多层螺旋CT与超声心动图对慢性阻塞性肺病患者右心功能的评估价值比较[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19(12): 39-41.
- [25] 颜春龙, 马金凤, 齐先龙, 等. CMRI与超声心动图对高海拔地区正常人心脏结构及功能的评价研究[J]. *医学影像学杂志*, 2019, 29(11): 1846-1849.
- [26] Wang YJ, Yang K, Wen Y, *et al*. Screening and diagnosis of cardiovascular disease using artificial intelligence-enabled cardiac magnetic resonance imaging[J]. *Nat Med*, 2024, 30(5): 1471-1480.
- [27] McDonagh TA, Metra M, Adamo M, *et al*. 2021 ESC guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure [J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(36): 3599-3726.
- [28] 孟莉, 鲍海华. 3.0TMR心脏成像研究慢性高原心脏病患者心脏结构和功能[J]. *中华放射学杂志*, 2016, 50(11): 829-832.
- [29] Dong Y, Pan Z, Wang D, *et al*. Prognostic value of cardiac magnetic resonance-derived right ventricular remodeling parameters in pulmonary hypertension: a systematic review and meta-analysis [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(7): e010568.
- [30] 陈静. CMR评估慢性高原病患者主肺动脉扩张对右心结构和功能的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2018.
- [31] 张志杰, 曹剑, 王怡宁, 等. 高原性心脏病40例心脏磁共振表现分析[J]. *实用医学影像杂志*, 2022, 23(6): 541-545.
- [32] 鲍海华, 孟莉, 谢冬梅. 小儿高原性心脏病的病理生理改变及磁共振表现[J]. *磁共振成像*, 2015, 6(12): 927-931.
- [33] Bourfiss M, Prakken NHJ, James CA, *et al*. Prognostic value of strain by feature-tracking cardiac magnetic resonance in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 24(1): 98-107.
- [34] Zhu L, Zhang H, Jiang M, *et al*. Right ventricular strain improves cardiac MRI-based prognostication in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Radiology*, 2025, 315(3): e243080.
- [35] de Siqueira ME, Pozo E, Fernandes VR, *et al*. Characterization and clinical significance of right ventricular mechanics in pulmonary hypertension evaluated with cardiovascular magnetic resonance feature tracking[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 39.
- [36] Messroghli DR, Moon JC, Ferreira VM, *et al*. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T_1 , T_2 , T_2^* and extracellular volume: a consensus statement by the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) endorsed by the European Association for Cardiovascular Imaging (EACVI) [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19(1): 75.
- [37] de Boer RA, De Keulenaer G, Bauersachs J, *et al*. Towards better definition, quantification and treatment of fibrosis in heart failure: a scientific roadmap by the Committee of Translational Research of the Heart Failure Association (HFA) of the European Society of Cardiology[J]. *Eur J Heart Fail*, 2019, 21(3): 272-285.
- [38] Liang K, Baritussio A, Palazzuoli A, *et al*. Cardiovascular magnetic resonance of myocardial fibrosis, edema, and infiltrates in heart failure[J]. *Heart Fail Clin*, 2021, 17(1): 77-84.
- [39] Haaf P, Garg P, Messroghli DR, *et al*. Cardiac T_1 mapping and extracellular volume (ECV) in clinical practice: a comprehensive review [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 89.
- [40] 蒋月薪. 心脏磁共振延迟强化及 T_1 mapping技术对高原心脏病心肌纤维化的评估研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [41] 张鑫媛, 李一丹, 郭迪晨, 等. 斑点追踪超声心动图联合心脏磁共振评估肺动脉高压右心室重构相关性分析[J]. *中国超声医学杂志*, 2025, 41(9): 986-989.
- [42] 靖立芹, 余江, 胡英, 等. 1.5T MRI联合超声心动图在先天性心脏病并肺动脉高压患者诊断中的应用[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19(7): 87-89, 92.
- [43] 曾贞, 陶沙. CT肺动脉成像联合心脏超声对肺动脉高压患者心功能损害的诊断价值[J]. *中国现代医学杂志*, 2022, 32(3): 87-92.
- [44] 董宁利, 杨宏刚, 黑欢欢, 等. CT肺动脉造影的多参数测量联合心动超声对肺动脉高压程度的预测价值[J]. *西安交通大学学报(医学版)*, 2023, 44(2): 275-282.
- [45] Baeßler B, Engelhardt S, Hekalo A, *et al*. Perfect match: radiomics and artificial intelligence in cardiac imaging[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2024, 17(6): e015490.

(责任编辑: 张小利)