

光谱 CT 与深度学习在泌尿系结石成分识别及复发管理中的技术基础与临床转化

李 沐

常德市第一中医医院 湖南 常德 415000

【摘 要】：泌尿系结石复发较为常见，其形成和进展受结石成分、代谢异常及生活方式等因素共同影响。传统成分分析依赖自然排出或手术获取的标本，难以在治疗前提供无创信息。光谱 CT 利用不同能量下材料衰减特征的差异，可较可靠地区分尿酸性与非尿酸性结石，并为部分亚型识别提供依据；深度学习则可从多能量图像和光谱参数中提取常规定量指标难以表征的复杂特征。二者结合后，有望将无创成分识别延伸至复发风险分层和个体化预防。本文综述光谱 CT 的材料分辨基础、VGG 等卷积神经网络的影像表征方法、结石成分与复发风险的关系及临床转化问题。现有研究仍受样本量有限、混合结石识别困难、模型泛化不足和长期随访证据缺乏等限制。后续应建立标准化多中心数据体系，联合影像、代谢、治疗和行为信息，并通过外部验证和临床净获益评价其应用价值。

【关键词】：泌尿系结石；光谱 CT；深度学习；VGG 网络；结石成分；复发预测

DOI:10.12417/2705-098X.26.17.038

1 泌尿系结石复发管理的临床需求

泌尿系结石的临床管理不应止于解除梗阻和清除结石，还需进一步识别促发因素并控制复发风险。结石形成通常由多种因素共同驱动，包括尿液过饱和、尿量不足、尿液 pH 异常、感染、代谢性疾病以及不合理的饮食和生活方式。由于不同成分结石的形成基础并不相同，其预防策略也需有所区分。例如，尿酸结石多与持续性低尿 pH、尿量不足及代谢异常相关；草酸钙结石则常涉及高尿钙、高尿草酸、低枸橼酸尿和液体摄入不足。

红外光谱和 X 射线衍射能够直接测定结石成分，但其前提是获得患者自行排出或经手术取出的结石标本。此外，局部取样未必能够完整反映混合结石的组成及其内部异质性。相比之下，光谱 CT 可在取石前提供初步的材料学信息，为治疗方案选择和后续代谢评估提供参考。若将其与血液生化、24 h 尿液分析及生活方式资料结合，可进一步把结石成分识别、复发风险评估和个体化预防串联为连续的管理路径。

2 光谱 CT 识别结石成分的技术基础

常规 CT 主要依据多色 X 线条件下的 CT 值评估结石密度，但不同成分的衰减特征可能相互重叠，因而限制了其材料鉴别能力。光谱 CT 通过双能量或多能量采集获取不同能级下的衰减信息，并可生成有效原子序数、能谱曲线、基物质分解图和虚拟单能量图像等参数。现有方法对尿酸性与非尿酸性结石的区分相对稳定，但草酸钙、磷酸钙、感染性结石及混合结石之间的参数差异较小，分类结果更易受到结石大小、患者体型、

扫描方案和重建方法的影响^[1-2]。

光谱 CT 还可同步显示结石的位置、大小、形态、密度及尿路梗阻程度，使成分判断、常规影像判读和术前评估能够在同一次检查中完成^[8]。对于高度疑似尿酸性结石，无创成分评估可为尿液碱化及口服溶石治疗提供参考；对于含钙结石或结构复杂的结石，结合其成分、体积和形态特征，有助于术前判断碎石难度。需要注意的是，不同设备平台在数据采集方式和材料分解算法方面并不一致，既有分类阈值不能在未经验证的情况下直接迁移。因此，相关研究应完整报告设备型号、扫描方案、重建层厚及感兴趣区勾画方法，以提高结果的可重复性和可比较性。

尽管光谱 CT 具有无创评估优势，但目前仍不能完全替代理化成分分析。小结石容易受到部分容积效应和图像噪声的干扰，混合结石也可能被模型简化为单一类别。因此，模型训练和验证仍应以红外光谱或 X 射线衍射结果作为参考标准，并尽可能记录各组成成分及其相对比例，以降低标签偏差对分类性能评价的影响。

3 深度学习对光谱 CT 信息的表征

卷积神经网络可从图像中提取纹理、边缘、形态和空间分布特征。VGG 网络结构规则，可作为迁移学习基础网络或比较基线^[7]。不同能量图像、基物质图及结石感兴趣区可作为输入，用于单一成分分类、多标签识别或成分比例估计。已有研究利用有效原子序数、不同能量 CT 值和基物质密度建立多标签机器学习模型，对单一及混合结石进行分类^[3]。该结果支持

作者简介：李沐，男（1989—），大学本科，副主任医师，研究方向：CT，MR 影像诊断。

项目基金：2024 年度常德市科技创新指导性项目，2024ZD100。

光谱多参数联合分析的价值,但不能直接证明 VGG 网络已经获得充分验证。

VGG 参数量较大,在有限样本中容易过拟合。模型开发应完成图像配准、强度标准化和数据增强,并以患者为单位划分训练集与测试集,避免信息泄漏。混合结石更适合采用多标签输出或比例估计。还应将 VGG 与残差网络、轻量化网络及传统机器学习方法比较,以判断性能增益来自影像表征、光谱参数还是二者联合。

VGG 类卷积神经网络既可直接用于结石成分分类,也可作为特征提取器,将深层影像表征与临床及代谢变量联合用于复发风险预测。在样本量有限的情况下,可通过冻结部分卷积层、压缩全连接层参数等方式降低过拟合风险,并采用嵌套交叉验证完成模型选择和内部性能评价。模型的最终性能仍需在独立时间队列或外部中心数据中验证。除准确率外,研究还应报告灵敏度、特异度、AUC、校准表现和混淆矩阵,并重点分析少见结石、小体积结石及不同扫描协议下的误分类情况。

4 结石成分信息与复发风险评估

结石复发并非由单一因素决定,而是受到结石负荷、既往发作史、家族史、治疗后残石、感染、尿液 pH、24 h 尿液指标、代谢性疾病及生活行为等多重因素影响。单纯依赖影像学成分信息,难以完成准确的复发风险预测。成分识别更重要的作用,在于提示潜在的形成机制和代谢背景,并据此确定后续检查重点。例如,低尿量是多种结石共有的危险因素;尿液碱化主要适用于尿酸结石和胱氨酸结石,而含钙结石的预防则需结合尿钙、尿草酸和尿枸橼酸等指标综合判断^[4]。

复发预测模型可综合纳入光谱 CT 给出的成分概率、结石负荷与残石状态,以及临床资料、血液生化、24 h 尿液指标、治疗方式和生活行为。研究设计阶段应预先界定预测时间窗和复发结局,并区分新发结石、原有结石增大、症状复发及再次干预等不同终点。模型评价不应局限于 AUC,还需报告校准曲线、Brier 评分和决策曲线分析,并比较加入光谱 CT 特征前后的增量价值。只有当模型在外部队列中仍保持稳定,并能实际改善检查选择、随访安排或干预决策时,才具备临床应用意义。

5 基于结石成分与代谢表型的个体化饮食管理

增加液体摄入并维持足够尿量,是多数结石患者共同的基础措施。个体化管理不应停留在罗列禁食清单,而应依据结石成分和可纠正的代谢异常调整饮食。对于含钙结石患者,通常不宜在缺乏依据的情况下过度限制膳食钙;维持正常的随餐钙摄入,反而有助于减少肠道对草酸的吸收。高草酸食物、钠盐和动物蛋白的限制程度,则应结合 24 h 尿液结果制定。尿酸结石管理需同时关注低尿 pH、尿量不足、嘌呤摄入、体重及代谢异常;感染性结石则仍以控制感染、解除梗阻和清除结石为

主要目标^[5-6]。

即使结石成分相同,不同患者所表现出的代谢异常仍可能存在明显差异。以含钙结石为例,部分患者主要表现为高尿钙,另一些患者则可能出现高尿草酸或低枸橼酸尿。代谢背景不同,后续预防的侧重点自然也不完全相同。光谱 CT 能够提供结石成分信息,现阶段更适合用于患者的初步分层和后续评估,而不能单独决定具体干预方案。临床人员还需要结合既往病史、24 h 尿液分析和血液生化检查,对患者的代谢背景进行综合判断。影像信息与代谢表型相互补充后,饮食调整和随访重点才能更加明确。进入随访阶段,临床评价也不能只停留在患者是否接受了相关建议,还应观察饮食行为、尿量、尿液 pH 及相关代谢指标是否真正发生变化。

6 临床转化的关键限制

单中心数据中表现良好的模型,换到其他中心后未必能够保持同样的稳定性。不同光谱 CT 设备在能量采集、图像重建和材料分解方式上存在差异,扫描参数、层厚及重建条件的变化也会影响光谱参数。即使面对相同成分的结石,不同设备平台得到的参数分布也可能出现偏移。模型如果主要依赖单一中心或单一设备的数据进行训练,所学习到的特征中便可能夹杂设备型号、扫描流程甚至重建方式带来的信息。这些偏差在内部验证中往往并不明显,到了外部中心才可能表现为模型性能下降。

临床数据本身也存在较明显的类别不平衡。含钙结石病例数量通常较多,而胱氨酸结石、感染性结石等少见类型的样本往往不足。在这种数据结构下,总体准确率较高,更多反映的是模型对常见类别的识别水平,并不能直接说明其对少见结石同样有效。模型评价因而不能只看一个总体指标,还应分别报告不同结石类型的灵敏度、精确率以及具体误分类情况。小体积结石、混合结石和不同扫描条件下获得的病例也值得单独分析,因为这些病例更容易暴露模型在真实临床环境中的薄弱环节。

复发预测面对的问题比成分分类复杂得多。成分分类通常通过一次影像检查即可获得结果,复发判断却依赖持续随访。随访时间过短可能遗漏后期复发,失访会造成结局信息缺失,治疗方式和术后残石也会影响最终判断。患者在随访过程中还可能增加饮水量、调整饮食或接受药物治疗,这些变化本身就会改变复发风险。另一个容易被忽视的问题,是术后残石继续增大和真正形成新的结石具有不同的临床意义。如果两者在结局定义中被混在一起,模型得到的预测结果就很难准确解释。换句话说,结石成分识别得准,并不代表复发也能预测得准,更不能由此认为模型已经具备降低复发风险的能力。

算法指标好不好,只能说明模型的一部分价值。模型真正进入临床以后,更值得观察的是诊疗过程有没有因此发生改

变。例如,模型是否影响检查安排、代谢评估、医师判断以及后续随访方式,患者依从性和复发相关结局是否随之改善。错误输出带来的影响也不能忽略。一次误分类可能增加不必要的检查,也可能造成过度的饮食限制;如果临床人员过度依赖模型结果,治疗时机甚至也可能受到影响。对于涉及药物治疗、手术方式或长期饮食管理的重要结果,人工复核仍然有必要。相比只提供一个分类结果或风险概率,模型如果能够同时呈现主要影像依据、代谢危险因素及预测置信程度,对临床决策会更有帮助。

数据怎么处理,同样会影响模型性能是否可信。训练集和验证集应按照患者进行划分,不能让同一患者的不同图像进入不同数据集,否则模型可能通过重复信息获得虚高的验证结果。病例来源、结石成分判定方法、缺失数据的处理方式以及少见类别如何纳入分析,也会改变最终结果。随机划分得到的内部验证虽然方便,但对真实临床环境的反映有限。独立时间队列或外部中心数据能够进一步检验模型面对不同设备、不同

患者群体和不同临床流程时是否仍然稳定。

模型投入临床使用后,性能也不是固定不变的。设备升级、重建算法更新或扫描方案调整,都可能使后续数据逐渐偏离原来的训练数据。当某些病例的误分类开始增加,或者预测概率持续出现偏移时,模型就需要重新评价,必要时还应重新校准。由此来看,一次内部验证或外部验证只能说明模型在特定数据条件下的表现,不能替代后续的持续监测。

个体化饮食管理也有明确的适用边界。影像质量较差、成分预测置信度不足,或者患者尚未完成必要的代谢评估时,直接给出确定性的饮食限制并不合适。此时,模型更适合提示目前缺少哪些关键信息,再由临床人员结合影像结果、实验室指标和患者具体情况作出判断。光谱CT和人工智能在这一过程中承担的,更像是信息补充和辅助分层的角色。它们可以帮助识别结石类型、发现潜在风险,却不能替代完整的代谢评估,也不能取代临床人员作出最终决策。

参考文献:

- [1] 杨丽芬,陈佳鸿,黄春榆,等.能谱CT结石成分分析在泌尿系结石体外冲击波碎石中的应用.中外医学研究,2024,22:113-117.
- [2] 王皓,崔筱洁,万云天,等.IQon 光谱CT对泌尿系结石成分分析的应用价值.现代医用影像学,2024,33:353-355.
- [3] Li X,Tang P,Liang F,et al.Machine learning based multi-label classification of single or mixed-composition urinary stones in in vivo spectral CT.Med Phys,2023,50:661-674.
- [4] 胡小剑,郑亮,张志刚,等.泌尿系结石患者结石及尿液成分与结石复发相关性分析.河北医学,2023,29:1149-1154.
- [5] 滑丽美,邱建宏,曹婧然,等.个性化营养治疗对泌尿系结石术后恢复及复发的影响.武警医学,2024,35:417-420.
- [6] Siener R,Löhr P,Hesse A.Urinary risk profile,impact of diet,and risk of calcium oxalate urolithiasis in idiopathic uric acid stone disease.Nutrients,2023,15:572.
- [7] 邓昊,程帆,成少平.人工智能在泌尿系结石中的应用进展.微创泌尿外科杂志,2023,12:208-211.
- [8] Wang J,Wang X,Zhong H,et al.Pro prospective observational study on the prognosis of ureteral lesions caused by impacted stones via dual-energy spectral CT.Asian J Urol,2023,10:534-540.