

甲状腺相关性眼病的影像学诊断技术及应用研究进展

王冰玉, 贺舒靖, 肖泊杉, 吴乃君*

华北理工大学附属医院内分泌与代谢病科一科, 河北 唐山

收稿日期: 2025年10月30日; 录用日期: 2025年12月29日; 发布日期: 2026年1月7日

摘要

甲状腺相关性眼病(TAO)是一种与甲状腺功能障碍密切相关的自身免疫性疾病, 其临床表现多样, 包括眼睑退缩、眼球突出、复视、视力下降等, 严重影响患者的生活质量。近年来, 随着影像学技术的飞速发展, 多种成像方法在TAO的诊断、活动性评估及疗效监测中发挥着越来越重要的作用。本文综述了近年来关于TAO影像学诊断技术的最新研究进展, 包括光学相干断层扫描、光学相干断层扫描血流成像、放射性核素显像、彩色多普勒成像、电子计算机断层扫描、磁共振成像等, 旨在为TAO的临床诊治提供影像学参考。

关键词

甲状腺相关性眼病, 磁共振成像, 光学相干断层成像血管造影, 眼眶SPECT/CT

Research Progress on Imaging Diagnostic Techniques and Their Applications for Thyroid-Associated Ophthalmopathy

Bingyu Wang, Shujing He, Boshan Xiao, Naijun Wu*

Department of Endocrinology and Metabolic Diseases I, Affiliated Hospital of North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: October 30, 2025; accepted: December 29, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

Thyroid-associated ophthalmopathy (TAO) is an autoimmune disease closely related to thyroid

*通讯作者。

文章引用: 王冰玉, 贺舒靖, 肖泊杉, 吴乃君. 甲状腺相关性眼病的影像学诊断技术及应用研究进展[J]. 亚洲急诊医学病例研究, 2026, 14(1): 1-12. DOI: 10.12677/acrem.2026.141001

dysfunction, with diverse clinical manifestations, including eyelid retraction, exophthalmos, diplopia, and decreased vision, which seriously affect the quality of life of patients. In recent years, with the rapid development of imaging technology, various imaging methods have played an increasingly important role in the diagnosis, activity assessment, and therapeutic monitoring of TAO. This article reviews the latest research progress in imaging diagnostic techniques for TAO in recent years, including optical coherence tomography, optical coherence tomography angiography, radio-nuclide imaging, color Doppler imaging, computed tomography, and magnetic resonance imaging, aiming to provide imaging references for the clinical diagnosis and treatment of TAO.

Keywords

Thyroid-Associated Ophthalmopathy, Magnetic Resonance Imaging, Optical Coherence Tomography Angiography, Ocular SPECT/CT

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

甲状腺相关性眼病(thyroid-associated ophthalmopathy, TAO)又称 Graves 眼病(Graves' ophthalmopathy, GO), 属于一类针对特定器官的自身免疫性疾病[1], 其主要特征体现在甲状腺功能的紊乱以及眼部组织的病理变化上, 此病在成人眼眶疾病中发病率最高[2]。其眼部病变主要表现为眼球突出、眼外肌(extraocular muscles, EOM)肥大等, 严重影响患者的生活质量。TAO 的病理演变主要涉及活动期的炎症反应、水肿表现, 以及非活动期的纤维化进程与脂肪组织浸润。针对处于不同病理阶段的患者, 治疗策略需相应调整, 因此, 精确划分病理阶段对于制定个性化的治疗方案至关重要[3]。当前临床实践中对 TAO 活动性的评估主要依据 Mourits 等[4]提出的临床活动性评分(Clinical Activity Score, CAS)方案; 它通过临床医生对 TAO 患者眼眶外在的临床表现来进行评分, 存在一定的主观性, 进展不敏感且无法评估眼眶深部结构。对于严重程度分级, 最多应用的分级标准是欧洲 graves 眼病协助组(European Group on Graves Orbitopathy, EUGOGO)分级标准[5], 将严重程度分为轻度, 中重度和极重度(对视力具有潜在的危害程度)。这种主观性强的诊断方法易漏诊或误诊部分 TAO 患者, 从而导致疾病进展出现更为严重的并发症表现, 严重影响预后。精准评价活动期的 TAO 对延缓疾病进展及改善预后起到关键性作用, 因此非侵入的定量技术可能更客观、准确地评估 TAO。

近年来, 随着影像学技术的不断进步, 多种成像方法在 TAO 的诊断和评估中得到了广泛应用。本文将对近年来关于 TAO 影像学诊断技术的最新研究进行综述, 为 TAO 的临床诊治提供影像学参考。

2. 影像学诊断技术

2.1. 光学相干断层扫描/光学相干断层扫描血流成像

光学相干断层扫描(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种基于低相干光干涉原理的断层成像技术, 可实现对眼表及眼底结构的微米级分辨率成像, 尤其擅长检测视网膜层状结构变化。其功能扩展技术光学相干断层扫描血流成像(Optical Coherence Tomography Angiography, OCTA)通过检测血流信号的运动对比, 无需造影剂即可三维可视化视网膜及脉络膜微血管网络, 量化血管密度、无灌注区等参数。相较于传统荧光素血管造影, OCTA 避免了过敏风险, 且能分层分析浅层与深层血管丛的病变特征。国内

外研究一致表明,TAO 患者视网膜和脉络膜微血管系统存在显著改变。通过 OCT/OCTA 技术,可量化分析视网膜微血管密度、脉络膜厚度(Subfoveal Choroidal Thickness, SFCT)及脉络膜血管指数(Choroidal Vascularity Index, CVI)等参数。

与其他影像学技术相比,OCT/OCTA 在 TAO 评估中具有独特定位:CT 擅长显示眼眶骨性结构及眼外肌肥大的形态学改变,空间分辨率达亚毫米级,是判断眼眶减压术指征的重要依据,但无法评估软组织微观结构及血流灌注,对视网膜、脉络膜病变的敏感性几乎为零;MRI 对眼外肌、视神经的软组织分辨率优于 CT,可通过 T2 加权成像反映炎症水肿程度,但同样缺乏微血管量化能力,且检查耗时较长、存在金属植入物禁忌,难以用于频繁随访。超声检查具有无创、便捷、低成本优势,可测量眼外肌厚度及眼球突出度,彩色多普勒能显示大血管血流信号,但空间分辨率仅数十微米,无法分辨视网膜分层结构及毛细血管丛,对早期微血管损伤的检出率显著低于 OCTA。核素显像(如 ^{99m}Tc 标记奥曲肽 SPECT)可通过炎症组织的受体结合特性评估 TAO 活动度,但空间分辨率低(约 1~2 mm),无法提供解剖结构细节,仅能作为宏观炎症评估的补充手段,不能替代 OCT/OCTA 对眼底微观病变的精准检测。

国外研究者 Muralidhar 等人对印度人群的研究显示,活动期 TAO 患者的 SFCT 和 CVI 分别较非活动期增加 22%和 12%,且 CVI 与 CAS 评分的相关性更强[6]。Chien 的系统综述也指出,活动期 TAO 患者的 CVI 较非活动期患者升高约 15%,提示脉络膜充血是活动期的重要特征[7]。国外研究者 Sener 也得出了类似结论。此外,Ioana 的系统综述进一步指出,OCT 可敏感检测 TAO 患者视网膜神经纤维层(Retinal Nerve Fiber Layer, RNFL)变薄及黄斑区神经节细胞复合体萎缩,这些改变与视力预后密切相关[8]。甲状腺相关视神经病变(Dysthyroid Optic Neuropathy, DON)是 TAO 的严重并发症,Chien 证实合并 DON 的病例中,TAO 患者的视网膜结构存在显著改变,尤其表现为 RNFL、神经节细胞复合体及神经节细胞层的厚度减少,这可能与视网膜神经节细胞死亡导致的不可逆视力损害相关。现有的研究证据表明,眼眶减压术后可能出现 RNFL 厚度的进一步降低,提示手术可能对视网膜结构产生额外影响[9]。国外的一项前瞻性研究显示对 18 例接受眼眶减压术的非活动期 TAO 患者进行 OCTA 随访,发现视盘周围小血管的视网膜毛细血管丛密度在术后显著增加($p = 0.045$),术后 6 个月黄斑区血流密度增加 12%,且与视力改善显著相关[10]。

国内研究者吴等人对 90 例活动期 TAO 患者和 69 例非活动期患者的 OCT/OCTA 数据进行分析,发现活动期患者黄斑区浅层毛细血管丛及视盘周围血管密度显著降低,且 SFCT 增加,提示微血管损伤与炎症活动相关[11]。这与钟等人测量的结果一致[12]。余等人的团队也进一步发现,TAO 患者的 RNFL 变薄、脉络膜增厚、黄斑无血管区面积扩大及浅表视网膜血管密度/灌注密度改变,可能是疾病活动性和严重程度的潜在生物标志物。这些参数在 TAO 诊断中展现出辅助价值,且与眼压、眼轴长度等生理指标相关[13]。吴等人则通过 OCTA 分析发现,TAO 合并 DON 患者的视盘周围血管密度较非 DON 患者降低约 25%,提示微血管密度可作为 DON 的早期诊断标志[14]。国内学者吴等人通过联合频域光学相干断层扫描和 OCTA 技术发现,早期甲状腺相关视神经病变(Early Dysthyroid Optic Neuropathy, EDON)患者的视盘全图血管密度(Optic Nerve Head Whole-image Vascular Density, ONH-wiVD)和放射状视盘周围毛细血管密度(Radial Peripapillary Capillary Vascular Density, RPC-VD)显著低于健康对照组,尤其是视盘颞侧和上部区域的血管密度在疾病早期更易受累,且 EDON 患者的视力损害与视盘周围毛细血管密度减少密切相关,ONH-wiVD 和 RPC-VD 与眼压呈负相关,联合 SD-OCT 和 OCTA 技术,可通过评估视盘结构及微血管变化为早期诊断可疑 DON 提供新方法[15]。

OCT/OCTA 技术通过无创、分层成像的优势,为 TAO 的病理机制解析和精准诊疗提供了重要工具。相较于其他技术,OCT/OCTA 的核心优势在于将微观结构评估与微血管量化相结合,填补了 CT、MRI 在眼底精细病变检测中的空白,同时克服了超声、核素显像分辨率不足的缺陷,尤其适用于 DON 早期诊

断、疾病活动度监测及术后神经功能评估。但需明确,各技术并非替代关系,而是互补协作:CT/MRI 用于评估眼眶整体结构及手术规划,超声用于快速筛查眼外肌病变,核素显像辅助判断全身炎症负荷,而 OCT/OCTA 则聚焦于眼底微观损伤的精准量化,共同构成 TAO 多维度评估体系。国外在分子标志物探索和多组学整合方面领先,而国内在人工智能算法和临床转化研究中表现突出。同时,当前 OCT/OCTA 技术仍面临局限性:TAO 眼眶组织纤维化可能降低 OCT 信号穿透深度,且国内外缺乏统一的图像质量控制标准,尤其在眼球突出患者中扫描定位误差可能影响结果判读[16]。

2.2. 放射性核素显像

放射性核素显像是一种基于放射性标记分子靶向疾病相关生物标志物的成像技术,通过探测放射性信号分布实现对病变的定位和活性评估。在 TAO 中,该技术主要靶向甲状腺刺激激素受体(Thyroid-Stimulating Hormone Receptor, TSHR)、胰岛素样生长因子-1 受体(Insulin-like Growth Factor-1 Receptor, IGF-1R)、成纤维细胞活化蛋白等关键分子,结合单光子发射计算机断层扫描(Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT)或正电子发射断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)技术,可定量评估眼眶炎症活动性和组织重塑程度。

与其他影像学技术相比,放射性核素显像的核心优势在于分子靶向性和功能活性评估,这是 CT、MRI、超声及 OCT/OCTA 无法替代的:CT 无法反映炎症的分子机制和活性状态;MRI 缺乏靶向性,难以区分活动性炎症与陈旧性纤维化。超声仅提供宏观结构信息,无法评估分子层面的病变活动;OCT/OCTA 无法反映眼眶整体炎症负荷及全身免疫相关分子异常。

国际上对于新型靶向 TAO 关键分子通路的放射性探针有所开发,靶向 TSHR 和 IGF-1R 复合物的放射性探针被用于研究 TAO 的自身免疫机制[17]。放射性核素显像还被用于监测治疗反应,如利妥昔单抗治疗后 B 淋巴细胞活性的动态变化[18]。Gürez 等人还探索了放射性碘(^{131}I)治疗 Graves 病对泪腺功能的影响,为 TAO 患者放射性治疗的安全性评估提供了数据支持[19]。此外,国外学者更加关注放射性核素治疗对 TAO 患者眼部并发症的影响。例如,在一项针对 Graves 病患者的 ^{131}I 治疗剂量优化研究表明,低剂量(80~100 $\mu\text{Ci/g}$)可降低 TAO 恶化风险,而高剂量(150~200 $\mu\text{Ci/g}$)可能诱发或加重眼部症状[20]。Oeverhaus 等学者还探索了放射性核素联合免疫调节剂(如糖皮质激素)的治疗方案,初步结果显示可改善中重度 TAO 患者的预后[21]。国外团队对于人工智能辅助诊断系统也得到了开发。针对 TAO 早期诊断依赖医生经验的问题,Shin 等人率先开发了基于深度学习的自动化诊断系统。例如,利用智能手机拍摄的面部图像结合机器学习算法(CAS 预测模型),可实现活动性 TAO 的快速筛查,准确率达 90% [22]。

国内研究证实放射性核素显像已被纳入 TAO 活动性分级体系。瑶等人在传统 SPECT/CT 技术基础上,开发了结合影像组学的 TAO 评估方法,通过定量分析[Tc] TcDTPA SPECT/CT 的放射性摄取异质性,建立了 TAO 炎症活动性的预测模型,可区分活动期和非活动期 TAO,其自动化分析工具(如 GO-Net)显著提高了诊断效率,其准确率可达 85%以上[23]。此外,国内的一项前瞻性研究基于成纤维细胞激活蛋白(FAP)的显像剂(如[F] AlF-NOTA-FAP-04 和 ^{68}Ga -FAP)被证实可特异性结合眼眶成纤维细胞,通过 PET/CT 显像评估 TAO 炎症活动性,其摄取值与疾病活动度呈正相关[24]。国内团队还通过放射性核素标记的分子探针揭示了 TAO 的免疫病理机制。陈等学者发现了靶向 CD40-CD40L 通路和 PD-1/PD-L1 通路的放射性探针是评估免疫抑制治疗的潜在靶点[25]。曹等人还发现靶向 TSHR 的放射性探针研发也取得了突破,通过指数富集配体系统进化技术筛选出的 TSHR 特异性适配体,被成功用于 TAO 患者血清中 TSHR 抗体的定量检测,其灵敏度显著高于传统 ELISA 方法[26]。

放射性核素显像也存在局限性:空间分辨率(1~2 mm)远低于 CT、MRI 及 OCT/OCTA,无法显示微观结构损伤;检查成本高、有辐射暴露,不适用于频繁随访,而超声和 OCT/OCTA 更适合动态监测。临

床实践中,需通过多技术互补:核素显像提供炎症活性及分子靶点信息,CT/MRI 明确解剖结构异常,OCT/OCTA 监测眼底损害,共同实现 TAO 的全面评估。国外研究更注重现有技术优化与人工智能辅助诊断的临床转化,而国内研究以新型靶向探针(如 FAPI、TSHR/IGF-1R 复合物探针)开发为特色,并已将其纳入诊疗指南。但现有显像剂靶向特异性不足(如 ^{99m}Tc -DTPA 与非靶组织交叉反应),且放射性核素在唾液腺、肾脏等器官的蓄积影响安全性。未来需开发高亲和力、低脱靶率的第二代药物(如 ^{225}Ac -FAPI),推动多模态成像(PET/MRI)与人工智能融合以实现 TAO 早期诊断和个体化治疗。

2.3. 彩色多普勒成像

彩色多普勒成像(Color Doppler Flow Imaging, CDFI)是一种基于超声波的多普勒效应原理,通过颜色编码实时显示血流方向和速度的无创成像技术。其核心优势在于能够同时提供解剖结构和血流动力学信息,尤其适用于评估血管分布、血流速度及血管阻力等参数。在 TAO 中,CDFI 主要用于检测眶周血管异常,如眼动脉(Ophthalmic Artery, OA)、视网膜中央动脉及眶上静脉(Supraorbital Vein, SOV)的血流变化,辅助评估疾病活动性、炎症程度及治疗效果[27]。

与其他影像学技术相比,CDFI 的核心特色是无创实时的血流动力学量化,这与其他技术形成互补:CT 无法评估血流状态,仅能间接推断血管受压情况;MRI 缺乏直接的血流速度、阻力等量化参数。核素显像无法提供实时血管动力学信息;而 OCT/OCTA 对球后大血管(如眼动脉、眶上静脉)的血流速度和阻力评估能力远不及 CDFI,且难以覆盖眶周整体血流循环。

国外研究在血流动力学评估上有所进展。Goel 基于对 TAO 患者术前及术后 3 个月的 CDFI 评估,并与健康对照组的眼上静脉血流(Supraorbital Vein Blood Flow, SOVBF)参数进行对比分析,发现眼眶减压手术(Orbital Decompression, OD)单独或联合七叶树种子提取物(Horse Chestnut Seed Extract, HCSE)均可显著改善 TAO 患者的 SOVBF 参数、主观症状、软组织受累、眼睑退缩、复视、眼球运动受限、突眼度和眼压。联合治疗组(OD + HCSE)在 SOVBF 改善方面显著优于单独 OD 组。并得出了 SOVBF 的减少与 TAO 病理生理密切相关,表明眼眶静脉回流障碍可能是 TAO 发生发展的关键因素的结论[27]。在多模态成像融合方面,功能超声技术的改进进一步提升了微小血管低流速检测能力,解决了传统 CDFI 在逆向血流中的信号抵消问题[28]。

国内学者孙的一项横断面研究通过联合 CDFI 和 OCTA 检测技术发现,活动期 TAO 患者的脉络膜血管化程度和球后血流速度(尤其是睫状后动脉的收缩期峰值流速和舒张末期流速)显著升高,且这些参数与临床活动性及严重程度密切相关。研究提示,脉络膜循环和球后血流动力学的改变可能是 TAO 疾病活动的重要标志,可为 TAO 的临床评估提供客观依据[29]。

CDFI 也存在明显局限:对微小血管($<100\ \mu\text{m}$)和低速血流的敏感性远低于 OCT/OCTA,无法捕捉早期微循环损伤;空间分辨率不及 CT、MRI,难以显示精细解剖结构;而核素显像在全身炎症负荷评估上的优势,也是 CDFI 无法替代的。临床实践中,需通过 CDFI 评估大血管血流动力学,结合 CT/MRI 明确解剖异常,OCT/OCTA 监测微观血管病变,核素显像判断炎症活性,形成多维度互补的 TAO 评估体系。CDFI 作为 TAO 诊疗的影像工具,已在血流动力学评估、疾病分期及治疗监测中展现出重要价值。国外研究在血流动力学评估方面取得进展,而国内研究则侧重于技术优化、多模态融合探索。该技术仍面临局限性:对微小血管($<100\ \mu\text{m}$)和低速血流($<1\ \text{cm/s}$)敏感性不足,可能低估早期 TAO 微循环改变,且易受运动伪影干扰[28]。

2.4. 电子计算机断层扫描

电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)通过 X 射线束围绕人体旋转并生成横断面图像,具

有高分辨率、快速成像和三维重建能力,在TAO的诊断和评估中发挥重要作用。CT可清晰显示眼眶骨性结构、EOM增粗及脂肪组织扩张,为TAO的定量分析(如眼眶容积测量)和手术规划(如眼眶减压术)提供解剖学依据。

与其他影像学技术相比,CT的核心优势体现在眼眶骨性结构与宏观解剖的高分辨率成像,这是其他技术难以替代的: MRI对骨性结构的显示及成像速度不及CT,且检查耗时较长、存在金属植入物禁忌。超声(含CDFI)虽无创便捷、可实时评估血流动力学,却因空间分辨率限制,无法清晰显示眼眶尖部精细解剖及骨性结构;核素显像解剖分辨率低,无法为手术规划提供解剖学依据;OCT/OCTA无法评估眼眶整体解剖及眼外肌、脂肪组织的病变。

国际研究在TAO的CT影像应用领域持续推进,涵盖标准化诊断、机制探索等维度。Srisombut等学者通过系统评价27项研究建立了CT诊断共识,明确眼眶尖部脂肪体积 $>1.2\text{ cm}^3$ (敏感性79%)与EOM体积指数 >3.2 (特异性83%)为诊断DON的最优参数组合[30]。而Berger等人通过172例大样本研究发现内直肌横截面积增加是DON的最强预测指标[31],而Rana等人发现上斜肌增大与DON的最高几率相关,为治疗监测提供了量化标准[32]。病理机制研究揭示,美国加州大学团队通过CT影像分析证实TAO患者和对照组之间的平均颊脂垫(Buccal Fat Pad, BFP)体积没有统计学差异,表明TAO患者与BFP体积的显著差异无关,表明BFP不受TAO相关软组织扩增的影响[33]。Starčević等人通过CT测量发现泪腺体积和形态测量数据的评估可能会通过解剖基质及其形态破坏作为TAO进展随访和治疗计划和结果的重要工具[34]。

国内学者在TAO的CT影像研究领域取得显著进展,涵盖疾病评估、并发症诊断及治疗决策优化等多个方面。在TAO活动性评估方面,北京同仁医院团队通过回顾性分析57例患者的CT数据,发现活动期患者眼眶脂肪及EOM体积显著增加,并基于CT纹理特征构建机器学习诊断模型,其AUC值达0.89[35],同时还有学者发现深度学习算法通过单次轴位CT切片预测活动性的准确率可达89%[36]。针对TAO严重并发症DON,多中心研究表明眼眶尖部脂肪体积扩张($\text{OR} = 2.3$)及CT三维重建技术测量的视神经鞘宽度可作为早期诊断标志[35]。此外,吴等人提出了一种混合深度学习模型,以使用CT准确识别疑似DON患者。混合模型主要由双多尺度多注意力融合模块和深度卷积神经网络组成,此混合模型可以准确识别疑似DON患者,准确率达到96%[37]。在治疗优化领域,宁波大学附属李惠利医院利用CT数据建立手术规划模型,指导内镜辅助眶减压联合脂肪切除术,使术后眼球突出度平均减少4.2 mm且并发症发生率显著降低[38]。技术创新方面,孙等学者建立了一种在CT上半自动测量眼球突出的新的图像处理软件MedrawHDC,并用于评估其准确性和重现性[39]。此外,基于病理机制,台湾的一项观察性研究回顾性地招募了87名因TAO接受眼眶脂肪减压手术的参与者,得出了肥胖与眼眶脂肪扩张有关,因此在TAO中会出现更严重的眼球突出。控制体重可能是预防甲状腺相关眼球突出的一种潜在策略[40]。

但CT也存在明显局限: 电离辐射风险使其无法用于频繁随访,而超声、OCT/OCTA无辐射更适合动态监测;对软组织炎症的活性判断不如MRI和核素显像,也无法像OCT/OCTA那样检测眼底微观病变。临床中需结合MRI评估软组织炎症、核素显像判断炎症活性、OCT/OCTA监测眼底并发症,形成TAO的全面评估体系。CT技术通过形态学定量、功能成像及人工智能辅助分析显著提升了疾病解剖学评估、手术规划和病程监测的精准度。国外侧重于机制探索与并发症的诊断,而国内多模块融合以及新型学习模型的开发。然而,其应用受限于潜在的电离辐射风险,多次使用可能导致晶状体损伤,并不适合作为常规随访检查手段。

2.5. 磁共振成像

磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)通过氢原子核在磁场中的弛豫特性生成高分辨率图

像,其多参数、多序列特点可精准评估 TAO 的病理改变。T1 加权成像显示解剖结构, T2 加权成像及短时反转恢复序列通过抑制脂肪信号突出水肿区域, T2 mapping 定量测量组织 T2 弛豫时间以区分活动性水肿(高 T2 值)与纤维化(低 T2 值)。扩散加权成像反映细胞密度变化, 动态增强 MRI (DCE-MRI)分析对比剂流入速率(如 K_{trans})评估微循环通透性。此外, 功能成像(如 DTI)可探测视神经微结构损伤。MRI 无辐射、软组织对比度高的优势, 使其成为 TAO 分期和疗效监测的关键工具。

与其他影像学技术相比, MRI 的核心优势在于软组织精细分辨与多参数功能评估的结合: CT 存在电离辐射, 且无法区分活动性水肿与陈旧性纤维化; 超声(含 CDFI)因空间分辨率限制, 难以显示眼眶深部结构及视神经微损伤; 核素显像缺乏精细解剖结构与功能参数的同步分析; OCT/OCTA 无法覆盖眼眶整体病变、眼外肌受累及中枢神经功能改变, 而 MRI 的功能序列(如 rs-fMRI、DTI)可填补这一空白。

国外学者在 TAO 的 MRI 诊断领域、活动性评估、治疗策略等方面有所进展。在诊断方面, Moledina 团队通过为期 11 年的回顾性队列研究发现, DON 患者与非 DON 患者间存在显著 MRI 特征差异。其中表观扩散系数(Apparent Diffusion Coefficient, ADC)值升高与眼眶脂肪间隙扩大被证实与 DON 诊断可能性显著相关, 提示 ADC 参数可能成为 DON 诊断及预测的新型生物标志物[41]。Karhanová 等学者针对 96 例活动性 TAO 患者的影像学分析进一步揭示了病理机制, 发现眼内压(Intraocular Pressure, IOP)升高组患者的内直肌、下直肌短径以及 EOM 总短径参数均显著增加($P < 0.05$), 且此类患者接受眼眶减压术和斜视矫正术的比例明显增高($OR = 3.2$), 证实 EOM 受累程度与 IOP 升高及手术需求存在强相关性[42]。在疾病活动性评估方面, 日本学者通过对 86 例 TAO 患者的系统研究发现, 促甲状腺抗体(Thyroid-Stimulating Antibody, TSAb)与 TSH 受体抗体(Thyrotropin Receptor Antibody, TRAb)比值对活动性 TAO 具有高度诊断价值, 其敏感性和特异性分别达到 92%和 88%, 特别是在非 T3 优势型患者中, 该指标可作为初级医疗机构筛查活动性 TAO 的可靠工具。值得注意的是, 该研究首次建立了 TSAb/TRAb 比值与 MRI 炎症评分的定量关系($r = 0.76$) [43], 为临床决策提供了客观依据。治疗策略优化方面, 日本团队开展的 25 例 TAO 临床研究揭示了基于 MRI 动态调整治疗方案的重要性。针对以复视为首发症状的患者, 初始 6 g 甲泼尼龙冲击治疗后, 通过 MRI 炎症评估追加剂量至 9 g 组(4 例)的 1 年复发率较标准剂量组降低 40% ($p = 0.032$), 整体队列 1 年复发率为 20%。研究证实 MRI 炎症评分变化与临床复发存在显著相关性($OR = 2.15$, 95% CI 1.32~3.51), 支持将 MRI 参数纳入治疗反应监测体系。但研究同时提示, 即使采用影像学指导的个体化方案, 仍有必要建立长期随访机制[44]。

国内学者在 TAO 的 MRI 领域取得突破性成果, 围绕神经机制探索、新型标志物开发、人工智能诊断及多模态评估体系构建等方面形成特色研究方向。在神经机制层面, 静息态功能磁共振(rs-fMRI)研究发现活动期 TAO 患者默认模式网络与视觉皮层功能连接强度显著降低, 且与突眼度呈负相关($r = -0.62$) [45], 提示中枢代偿机制受损。齐等人通过局部一致性(ReHo)分析揭示初级视觉皮层(V1)自发神经活动增强与视敏度下降显著相关($r = 0.53$) [46], 而动态功能连接分析进一步发现患者脑网络状态转换频率异常升高, 从时间维度阐释视觉信息处理效率降低的病理机制[45]。这些发现为理解 TAO 的中枢神经重塑提供了新视角。新型影像标志物研究方面, 田等人的团队创新构建眶内压力评估体系, 证实 EOM 横截面积与 IOP 呈正相关($r = 0.71$), 当体积 $> 1.2 \text{ cm}^3$ 时 IOP $> 21 \text{ mmHg}$ 风险增加 3.8 倍[47]。高等人开发的泪腺脱垂(Lacrimal Gland Prolapse, LGP) MRI 分级系统(0~III 级)显示 LGP $\geq$ II 级患者中 CAS 评分 > 3 者占 78% [48]。香港团队综述发现了优化后的 3D T2WI 参数显示泪腺最大冠状面积 $> 50 \text{ mm}^2$ 不仅可辅助活动性判断(敏感度 78%), 还能预测免疫治疗后泪液功能恢复($r = 0.67$) [49], 显著提升解剖标志的临床价值。人工智能技术应用实现跨越式发展, XGBoost 模型通过整合 Dixon MRI 脂肪分数与水肿指数预测 TAO 分期的准确率达 89% ($AUC = 0.91$), 较传统模型提升显著[50]。针对 DON, 卷积神经网络联合放射组学特征使诊断敏感度达 94%, 较人工评估提升 15% [51]。多模态融合模型整合 T2 mapping、扩散峰度

成像与血清 TRAb 水平,可精准预测眼眶减压术后突眼复发风险[52],标志着 TAO 诊疗进入 EOM 入智能化时代。治疗监测体系构建方面,DCE-MRI 显示糖皮质激素(Glucocorticoid, GC)有效组基线 Ktrans 值较无效组高 35% [53], T1 mapping 量化纤维化程度预测 GC 抵抗的 AUC 达 0.88 [54]。研究首次发现 GC 治疗可诱导海马、前扣带回等脑区灰质体积恢复,且 ReHo 改善与临床活动度降低同步($r = 0.58$) [55]。整合放射组学与 CAS 评分的复合模型将治疗反应预测准确率提升 15% [56],凸显多参数联合评估优势。多参数联合方面,李等人发现 EOM 与白质(SIR)、T2 弛豫时间、EOM 面积、脂肪分数可以定量评估 TAO 的活动性和严重程度,并可能为临床判断和治疗方案的选择提供基础[57]。这些系统性研究成果不仅深化了对 TAO 病理机制的认识,更推动了临床诊疗模式向量化、智能化方向转型。

但 MRI 也存在局限:成像速度慢、检查成本高,不如 CT 适合紧急情况与手术快速规划;对微小血管的检测灵敏度不及 OCT/OCTA,分子靶向性评估弱于核素显像;金属植入物禁忌也限制了部分患者的应用。临床实践中,需结合 CT 明确骨性结构、OCT/OCTA 监测眼底并发症、核素显像评估炎症活性,通过多技术互补实现 TAO 全维度评估。近年来国内的研究较为广泛,拓展的领域较国外丰富。尽管 MRI 技术已取得显著进展,仍面临挑战:其一,现有技术难以直接可视化 TSHR/IGF-IR 等分子靶点分布,需开发特异性分子探针;其二,定量 MRI 后处理复杂,基层医院应用受限,需简化分析工具。未来方向包括结合多组学数据(如单细胞测序与影像特征)构建 AI 驱动的个性化分析框架,以及通过多模态 MRI (如功能 MRI 与扩散张量成像)探索 TAO 的神经-免疫交互机制。随着新型靶向药物(如替妥尤单抗)的临床应用, MRI 在治疗监测和疗效评估中的作用将进一步凸显,推动 TAO 的全周期管理。

3. 结论与展望

3.1. 结论

综上所述,多种影像学技术在 TAO 的诊断和评估中发挥着重要作用。OCTA 可以高分辨率地显示视网膜及脉络膜血管结构,为 TAO 的早期诊断提供新思路;MRI 以其无创、高分辨率及多序列成像等特点,在 TAO 的眶内组织评估、活动性评估及疗效监测中具有独特优势;DCE-MRI 和 DTI 等功能成像技术则有助于进一步揭示 TAO 的病理生理变化及治疗效果;核医学成像技术则为 TAO 的分型及活动度评价提供了新的影像学依据;因检查流程简便、经济实惠且安全性高, CDFI 常作为临床首选方法,然而它在显示眶尖区域时效果欠佳,且检查结果易受外界因素干扰,存在一定的主观性差异;CT 以其高分辨率优势,能够清晰地展现眼眶内部结构,但由于 CT 检查成本较高且伴有辐射风险,其普及应用仍面临一定挑战。以往的研究者在尝试建立客观评价体系和精确评分系统以评估 TAO 的活动性时,尚未达成一个明确且统一的结论。基于前人的研究成果与探索,我们仍然需要继续深入研究,通过扩大样本规模,来寻找能够最准确反映 TAO 活动性的评价准则。

3.2. 未来研究展望

各类影像技术在 TAO 诊疗中的互补价值已得到临床认可,但目前仍存在多项关键科学问题未解决。现有研究对 OCTA、MRI 及核医学等技术的联合应用缺乏量化分析,各技术的权重分配与协同机制尚未明确,尚未形成统一的 TAO 活动性分级评价标准,标准化联合评估体系的构建仍需深入探索。TAO 眶尖区域解剖结构复杂, CDFI 对该区域病变显示能力有限,CT 的辐射风险又限制其常规应用,如何在保障安全性的前提下优化成像技术以实现眶尖病变早期精准检出,仍是临床实际难题。功能成像定量参数与 TAO 病情进展、治疗反应的动态关联尚未得到明确,缺乏经验证的特异性预测标志物,难以支撑个体化治疗调整;同时影像学检查的操作与数据处理缺乏统一规范,结果客观性与重复性不足,且影像参数与 TAO 病理改变的对应关系尚未明确,基础与临床转化衔接不足,这些问题的解决是推动 TAO 影像诊

断向精准化、标准化发展的核心方向。未来研究应围绕上述关键科学问题,通过扩大多中心样本量、优化多模态影像融合算法、开展纵向随访研究等方式,进一步深化影像学技术与TAO病理生理机制的关联研究。一方面需推动标准化评价体系的建立,降低技术应用的主观性与局限性;另一方面需聚焦新型影像学标志物的筛选与验证,实现TAO早期诊断、活动性分级及疗效预测的精准化。最终通过技术创新与临床转化,为TAO的个体化诊疗提供更全面的影像学支撑。

参考文献

- [1] Huang, J., Chen, M., Liang, Y., Hu, Y., Xia, W., Zhang, Y., *et al.* (2022) Integrative Metabolic Analysis of Orbital Adipose/Connective Tissue in Patients with Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Frontiers in Endocrinology*, **13**, Article ID: 1001349. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.1001349>
- [2] Lai, K.K.H., Aljufairi, F.M.A.A., Li, C.L., Ngai, A.K.Y., Yeung, C.S.K., Fong, R.H.Y., *et al.* (2023) Efficacy and Safety of 6-Weekly versus 12-Weekly Intravenous Methylprednisolone in Moderate-to-Severe Active Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article No. 3244. <https://doi.org/10.3390/jcm12093244>
- [3] Barrio-Barrio, J., Sabater, A.L., Bonet-Farriol, E., Velázquez-Villoria, Á. and Galofré, J.C. (2015) Graves' Ophthalmopathy: VISA versus EUGOGO Classification, Assessment, and Management. *Journal of Ophthalmology*, **2015**, Article ID: 249125. <https://doi.org/10.1155/2015/249125>
- [4] Mourits, M.P., Koornneef, L., Wiersinga, W.M., Prummel, M.F., Berghout, A. and van der Gaag, R. (1989) Clinical Criteria for the Assessment of Disease Activity in Graves' Ophthalmopathy: A Novel Approach. *British Journal of Ophthalmology*, **73**, 639-644. <https://doi.org/10.1136/bjo.73.8.639>
- [5] Kvetny, J., Puhakka, K.B. and Røhl, L. (2006) Magnetic Resonance Imaging Determination of Extraocular Eye Muscle Volume in Patients with Thyroid-Associated Ophthalmopathy and Proptosis. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, **84**, 419-423. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2005.00617.x>
- [6] Muralidhar, A., Singh, S., Das, S., Mondal, K., Kumar, B., Agarwal, M., *et al.* (2023) Choroidal Thickness in Thyroid Eye Disease and Its Correlation with Disease Activity. *Indian Journal of Ophthalmology*, **72**, 281-286. https://doi.org/10.4103/ijo.ijo_848_23
- [7] Chien, L., Go, C.C., Lahaie Luna, G.M. and Briceño, C.A. (2022) Changes in Choroidal Thickness and Choroidal Vascularity Index in Thyroid Eye Disease: A Systematic Review. *Orbit*, **43**, 399-407. <https://doi.org/10.1080/01676830.2022.2146726>
- [8] Ioana, A.M., Andrei, D., Iacob, D. and Bolintineanu, S.L. (2025) Retinal and Choroidal Alterations in Thyroid-Associated Ophthalmopathy: A Systematic Review. *Life*, **15**, Article No. 293. <https://doi.org/10.3390/life15020293>
- [9] Chien, L., Go, C.C., Luna, G.M.L. and Briceño, C.A. (2023) Changes in Retinal Nerve Fiber Layer, Ganglion Cell Complex, and Ganglion Cell Layer Thickness in Thyroid Eye Disease: A Systematic Review. *Taiwan Journal of Ophthalmology*, **14**, 217-224. <https://doi.org/10.4103/tjo.tjo-d-22-00110>
- [10] Jamshidian Tehrani, M., Niktinat, H., Ebrahimiadib, N., Jafari, B., Rafizadeh, S.M. and Kasaei, A. (2023) Assessment of Retinal and Choroidal Vessel Density and Nerve Fibre Layer Thickness Changes after Orbitotomy in Patients with Severe Non-Active Thyroid Orbitopathy: A Prospective Study. *International Ophthalmology*, **43**, 4427-4433. <https://doi.org/10.1007/s10792-023-02790-3>
- [11] Wu, H., Song, Q., Zhang, Y., Cheng, R., Li, Y., Su, M., *et al.* (2025) Optical Coherence Tomography (OCT) and Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) for Assessing Thyroid-Associated Ophthalmopathy Activity. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **53**, Article ID: 104578. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.104578>
- [12] Zhong, S., He, F., Fang, S., Sun, J., Li, Y., Shuo, Z., *et al.* (2023) Choroidal Thickness in Patients with Thyroid-Associated Ophthalmopathy, as Determined by Swept-Source Optical Coherence Tomography. *British Journal of Ophthalmology*, **108**, 1081-1087. <https://doi.org/10.1136/bjo-2023-323694>
- [13] Yu, L., Jiao, Q., Cheng, Y., Zhu, Y., Lin, Z. and Shen, X. (2020) Evaluation of Retinal and Choroidal Variations in Thyroid-Associated Ophthalmopathy Using Optical Coherence Tomography Angiography. *BMC Ophthalmology*, **20**, Article No. 421. <https://doi.org/10.1186/s12886-020-01692-7>
- [14] Wu, J.H., Luo, L.Y., Zhou, H., Wu, Y., Zhang, J. and Cheng, J.W. (2022) Reduced Choroidal Peripapillary Capillaries in Thyroid-Associated Ophthalmopathy with Early Stage of Dysthyroid Optic Neuropathy. *International Journal of Ophthalmology*, **15**, 1135-1141.
- [15] Wu, Y., Yang, Q., Ding, L., Tu, Y., Deng, X., Yang, Y., *et al.* (2022) Peripapillary Structural and Microvascular Alterations in Early Dysthyroid Optic Neuropathy. *Eye and Vision*, **9**, Article No. 30. <https://doi.org/10.1186/s40662-022-00301-6>

- [16] Geng, X., Liang, X., Liu, Y., Chen, Y., Xue, B., Wei, X., *et al.* (2024) Natural Fat Nanoemulsions for Enhanced Optical Coherence Tomography Neuroimaging and Tumor Imaging in the Second Near-Infrared Window. *ACS Nano*, **18**, 9187-9198. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c01204>
- [17] Fernando, R., Caldera, O. and Smith, T.J. (2021) Therapeutic IGF-I Receptor Inhibition Alters Fibrocyte Immune Phenotype in Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **118**, e2114244118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2114244118>
- [18] Kang, S., Hamed Azzam, S., Minakaran, N. and Ezra, D.G. (2022) Rituximab for Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, **2022**, CD009226. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd009226.pub3>
- [19] Gürez, C. and Ergül, N. (2024) Does Radioactive Iodine Treatment Damage the Lacrimal System? *Clinical Nuclear Medicine*, **49**, 513-515. <https://doi.org/10.1097/rlu.0000000000005147>
- [20] Ariamanesh, S., Ayati, N., Mazloun Khorasani, Z., Mousavi, Z., Kiavash, V., Kiamanesh, Z., *et al.* (2020) Effect of Different ¹³¹I Dose Strategies for Treatment of Hyperthyroidism on Graves' Ophthalmopathy. *Clinical Nuclear Medicine*, **45**, 514-518. <https://doi.org/10.1097/rlu.0000000000003086>
- [21] Oeverhaus, M., Koenen, J., Bechrakis, N., Stöhr, M., Herrmann, K., Fendler, W.P., *et al.* (2022) Radioiodine Ablation of Thyroid Remnants in Patients with Graves' Orbitopathy. *Journal of Nuclear Medicine*, **64**, 561-566. <https://doi.org/10.2967/jnumed.122.264660>
- [22] Shin, K., Choung, H., Lee, M.J., Kim, J., Lee, G.M., Kim, S., *et al.* (2024) A Preliminary Evaluation of the Diagnostic Performance of a Smartphone-Based Machine Learning-Assisted System for Evaluation of Clinical Activity Score in Digital Images of Thyroid-Associated Orbitopathy. *Thyroid*, **34**, 744-752. <https://doi.org/10.1089/thy.2023.0621>
- [23] Yao, N., Li, L., Gao, Z., Zhao, C., Li, Y., Han, C., *et al.* (2023) Deep Learning-Based Diagnosis of Disease Activity in Patients with Graves' Orbitopathy Using Orbital SPECT/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **50**, 3666-3674. <https://doi.org/10.1007/s00259-023-06312-2>
- [24] Li, H., Wang, Y., Zhou, J., You, D., Song, L., Wang, M., *et al.* (2024) Evaluation of Fibroinflammatory Activity in Thyroid Eye Disease Using [¹⁸F]AlF-NOTA-FAPI-04 PET/CT: A Prospective Study. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **52**, 1890-1900. <https://doi.org/10.1007/s00259-024-07015-y>
- [25] Chen, Y., Tang, R., Xiong, W., Zhang, F., Wang, N., Xie, B., *et al.* (2023) RNA Aptamers with Specific Binding Affinity to CD40 (CD40Apt) Represents a Promising Antagonist of the CD40-CD40L Signaling for Thyroid-Associated Ophthalmopathy (TAO) Treatment in Mouse. *Journal of Translational Medicine*, **21**, Article No. 396. <https://doi.org/10.1186/s12967-023-04217-0>
- [26] Cao, J., Zhang, F., Chen, H., Wu, B., Yin, J., Chenzhao, C., *et al.* (2024) A TSHR-Targeting Aptamer in Monocytes Correlating with Clinical Activity in Tao. *International Journal of Nanomedicine*, **19**, 3577-3588. <https://doi.org/10.2147/ijn.s446656>
- [27] Goel, R., Shah, S., Sundar, G., Arora, R., Gupta, S. and Khullar, T. (2023) Orbital and Ocular Perfusion in Thyroid Eye Disease. *Survey of Ophthalmology*, **68**, 481-506. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2023.01.003>
- [28] Tang, J., Kilic, K., Szabo, T.L. and Boas, D.A. (2021) Improved Color Doppler for Cerebral Blood Flow Axial Velocity Imaging. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **40**, 758-764. <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3036468>
- [29] Sun, X., Su, M., Zhang, X., Shen, H., Xie, Z., Kong, W., *et al.* (2024) Correlation between Choroidal Vascularity and Retrobulbar Ocular Blood Flow Changes and Thyroid-Associated Ophthalmopathy Activity: A Cross-Sectional Study. *BMC Ophthalmology*, **24**, Article No. 64. <https://doi.org/10.1186/s12886-024-03308-w>
- [30] Srisombut, T., Arjkonharn, N., Vongsa, N., Kanacharoen, A. and Kemchoknatee, P. (2024) Orbital CT Scan Parameters in Dysthyroid Optic Neuropathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Eye*, **38**, 1734-1741. <https://doi.org/10.1038/s41433-024-03011-6>
- [31] Berger, M., Matlach, J., Pitz, S., Berres, M., Axmacher, F., Kahaly, G.J., *et al.* (2022) Imaging of the Medial Rectus Muscle Predicts the Development of Optic Neuropathy in Thyroid Eye Disease. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 6259. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10043-z>
- [32] Rana, K., Garg, D., Yong, L.S.S., Macri, C., Tong, J.Y., Patel, S., *et al.* (2024) Extraocular Muscle Enlargement in Dysthyroid Optic Neuropathy. *Canadian Journal of Ophthalmology*, **59**, e542-e546. <https://doi.org/10.1016/j.jcjo.2023.11.015>
- [33] Osias, E., Cale, M., Saffari, P., Barbosa Diniz, S., Singh, P. and Rootman, D.B. (2023) Clinical and Demographic Predictors of Buccal Fat Pad Volume in Thyroid Eye Disease. *Orbit*, **43**, 58-63. <https://doi.org/10.1080/01676830.2023.2192787>
- [34] Starčević, A., Radojičić, Z., Djurić Stefanović, A., Trivić, A., Milić, I., Milić, M., *et al.* (2023) Morphometric and Volumetric Analysis of Lacrimal Glands in Patients with Thyroid Eye Disease. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 16345. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43083-0>
- [35] Ma, L., Jiang, X., Yang, X., Wang, M., Hou, Z., Zhang, J. and Li, D. (2025) CT-Based Machine Learning Radiomics

- Analysis to Diagnose Dysthyroid Optic Neuropathy. *Seminars in Ophthalmology*, **40**, 419-425.
- [36] Liu, Z., Tan, K., Zhang, H., Sun, J., Li, Y., Fang, S., *et al.* (2024) CT-Based Artificial Intelligence Prediction Model for Ocular Motility Score of Thyroid Eye Disease. *Endocrine*, **86**, 1055-1064. <https://doi.org/10.1007/s12020-024-03906-0>
 - [37] Wu, C., Li, S., Liu, X., Jiang, F. and Shi, B. (2022) DMs-MAFM+ Efficientnet: A Hybrid Model for Predicting Dysthyroid Optic Neuropathy. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **60**, 3217-3230. <https://doi.org/10.1007/s11517-022-02663-4>
 - [38] Ye, Y., Hu, F., Ji, Y., Wang, R., Zhu, K. and Kong, Q. (2023) The Outcomes of Endoscopic Orbital Decompression Combined with Fat Decompression for Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *BMC Ophthalmology*, **23**, Article No. 217. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-02957-7>
 - [39] Sun, R., Yin, Z., Li, L., Zhou, H., Song, X. and Li, Y. (2023) A Novel Method of Measuring Proptosis with Computed Tomography. *Acta Radiologica*, **64**, 2603-2610. <https://doi.org/10.1177/02841851231187859>
 - [40] Kuo, P.C., Kuo, S.C., Teng, Y.S. and Lai, C.C. (2025) Association of Obesity with Orbital Fat Expansion in Thyroid Eye Disease. *BMC Ophthalmology*, **25**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s12886-024-03824-9>
 - [41] Moledina, M., Lee, V., Bhatia, K., Madani, G., Feeney, C., George, N., *et al.* (2025) Radiological Activity Score (RAS)—MRI Characteristics in Dysthyroid Optic Neuropathy in a Multi-Ethnic Thyroid Eye Disease Population. *Clinical Endocrinology*, **103**, 385-395. <https://doi.org/10.1111/cen.15272>
 - [42] Karhanová, M., Kalitová, J., Kovář, R., Schovánek, J., Karásek, D., Čivrný, J., *et al.* (2022) Ocular Hypertension in Patients with Active Thyroid-Associated Orbitopathy: A Predictor of Disease Severity, Particularly of Extraocular Muscle Enlargement. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **260**, 3977-3984. <https://doi.org/10.1007/s00417-022-05760-0>
 - [43] Nakano, M., Konishi, H. and Koshiba, M. (2022) Thyroid-Stimulating Antibody/Thyroid-Stimulating Hormone Receptor Antibody Ratio as a Sensitive Screening Test for Active Graves' Orbitopathy. *Endocrine Practice*, **28**, 1050-1054. <https://doi.org/10.1016/j.eprac.2022.07.007>
 - [44] Ueki, S., Hasegawa, Y., Hatase, T., Kiyokawa, M. and Fukuchi, T. (2022) One-Year Recurrence Rate of Graves Ophthalmopathy Presenting as Diplopia in the Primary Position after Varied Doses of Intravenous Methylprednisolone Followed by Oral Prednisolone with Dosing Based on the Magnetic Resonance Imaging Findings. *Japanese Journal of Ophthalmology*, **67**, 91-96. <https://doi.org/10.1007/s10384-022-00954-9>
 - [45] Liu, H., Zhong, Y. and Huang, X. (2024) Specific Static and Dynamic Functional Network Connectivity Changes in Thyroid-Associated Ophthalmopathy and It Predictive Values Using Machine Learning. *Frontiers in Neuroscience*, **18**, Article ID: 1429084. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1429084>
 - [46] Qi, C., Wen, Z. and Huang, X. (2024) Altered Functional Connectivity Strength of Primary Visual Cortex in Subjects with Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *NeuroReport*, **35**, 568-576. <https://doi.org/10.1097/wnr.0000000000002039>
 - [47] Tian, H., Wang, Y., Li, J. and Li, H. (2023) Prognostic Value of Extraocular Muscles for Intraocular Pressure in Thyroid-Associated Ophthalmopathy Patients. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 5727-5736. <https://doi.org/10.21037/qims-23-44>
 - [48] Gao, Y., Chang, Q., Li, Y., Zhang, H., Hou, Z., Zhang, Z., *et al.* (2022) Correlation between Extent of Lacrimal Gland Prolapse and Clinical Features of Thyroid-Associated Ophthalmopathy: A Retrospective Observational Study. *BMC Ophthalmology*, **22**, Article No. 66. <https://doi.org/10.1186/s12886-022-02270-9>
 - [49] Wong, N.T.Y., Yuen, K.F.K., Aljufairi, F.M.A.A., Lai, K.K.H., Hu, Z., Chan, K.K.W., *et al.* (2023) Magnetic Resonance Imaging Parameters on Lacrimal Gland in Thyroid Eye Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Ophthalmology*, **23**, Article No. 347. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-03008-x>
 - [50] Li, Y., Ma, J., Xiao, J., Wang, Y. and He, W. (2023) Use of Extreme Gradient Boosting, Light Gradient Boosting Machine, and Deep Neural Networks to Evaluate the Activity Stage of Extraocular Muscles in Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **262**, 203-210. <https://doi.org/10.1007/s00417-023-06256-1>
 - [51] Ma, Z., Lin, J., Li, S., Liu, H. and Zhang, Y. (2024) Deep Learning Methods for Diagnosis of Graves' Ophthalmopathy Using Magnetic Resonance Imaging. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 5099-5108. <https://doi.org/10.21037/qims-24-80>
 - [52] Zhou, W., Song, Y., Shi, J. and Li, T. (2025) The Value of MRI and Radiomics for the Diagnostic Evaluation of Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Diagnostics*, **15**, Article No. 388. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15030388>
 - [53] Hu, H., Pu, X., Zhou, J., Jiang, W., Wu, Q., Lu, J., *et al.* (2024) Determining Disease Activity and Glucocorticoid Response in Thyroid-Associated Ophthalmopathy: Preliminary Study Using Dynamic Contrast-Enhanced MRI. *Korean Journal of Radiology*, **25**, 1070-1082. <https://doi.org/10.3348/kjr.2024.0335>
 - [54] Ma, R., Geng, Y., Gan, L., Peng, Z., Cheng, J., Guo, J., *et al.* (2021) Quantitative T1 Mapping MRI for the Assessment of Extraocular Muscle Fibrosis in Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *Endocrine*, **75**, 456-464.

- <https://doi.org/10.1007/s12020-021-02873-0>
- [55] Wu, Q., Zhou, J., Fang, W., Jiang, W., Pu, X., Chen, H., *et al.* (2023) Structural and Functional Brain Changes after Glucocorticoid Therapy in Thyroid-Associated Ophthalmopathy. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **109**, 649-658. <https://doi.org/10.1210/clinem/dgad626>
- [56] Hu, H., Chen, L., Zhang, J., Chen, W., Chen, H., Liu, H., *et al.* (2022) T₂-Weighted MR Imaging-Derived Radiomics for Pretreatment Determination of Therapeutic Response to Glucocorticoid in Patients with Thyroid-Associated Ophthalmopathy: Comparison with Semiquantitative Evaluation. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **56**, 862-872. <https://doi.org/10.1002/jmri.28088>
- [57] Li, Z., Luo, Y., Feng, X., Zhang, Q., Zhong, Q., Weng, C., *et al.* (2023) Application of Multiparameter Quantitative Magnetic Resonance Imaging in the Evaluation of Graves' Ophthalmopathy. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **58**, 1279-1289. <https://doi.org/10.1002/jmri.28642>