

本文引用格式:柴浩卜,朱晨.影像学检查在膝关节单髁置换术中的研究进展[J].安徽医学,2024,45(1):11-14.DOI:10.3969/j.issn.1000-0399.2024.01.003

影像学检查在膝关节单髁置换术中的研究进展

柴浩卜 朱 晨

[摘 要] 膝关节单髁置换术(UKA)是治疗单间室膝关节骨关节炎(KOA)的一种微创手术,具有手术切口小、术后恢复快、并发症少等优势,在KOA的阶梯化治疗中越来越受到关注。X线、CT和MRI等影像学检查在UKA的术前评估和术后评价等方面具有重要意义,本文主要就影像学检查在UKA中应用的研究进展作一综述。

[关键词] 膝关节;单髁置换术;影像学

doi:10.3969/j.issn.1000-0399.2024.01.003

随着人口老龄化的加剧,膝关节骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的发病率也逐渐增加,目前我国症状性KOA的发病率约为8.1%^[1]。KOA的早期病变大多局限于单个间室,特别是内侧间室,表现为膝关节内侧疼痛和内翻畸形。单间室终末期KOA的治疗方式主要是手术治疗,手术方式包括单髁置换术(unicompartmental arthroplasty, UKA)和全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA),其中UKA因为其手术切口小、术后恢复快、并发症少的优点,临床应用越来越多^[2-3]。UKA若想取得良好的疗效,影像学检查至关重要,通常采用的影像学检查包括X线、MRI、CT等。术前的影像学检查可以准确评估膝关节软骨磨损情况和韧带功能等,以便选择合适的患者,并有助于规划手术方案,术后的影像学检查可以评价假体位置和界面,协助诊断相关的并发症。

1 X线

UKA术前常规需要拍摄膝关节X线以进行评估,常用的包括膝关节负重正侧位片、内外翻应力位片、髌骨轴位片和双下肢全长片等。UKA的最佳适应证是膝关节前内侧骨关节炎(antero-medial osteoarthritis, AMOA)^[4]。具体包括内侧室骨对骨(全层软骨缺损)、外侧室软骨完整、内侧副韧带(medial collateral ligament, MCL)和前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)功能正常、内翻畸形可矫正。除了临床体格检查外,应力位片是诊断AMOA的主要影像学方法,既可以通过内侧关节间隙和关节面夹角等判断内侧软骨磨损程度,也可以通过间接征象提示ACL功能和外侧间室软骨情况^[5]。在一项MRI与应力位片对于关节软骨厚度评估的比较性研究中,作者证明MRI不能代替X线片对于关节软骨厚度的测量^[6]。

UKA对下肢力线的要求很严格,术后力线不佳会增加翻修率。对于术前内翻的膝关节,若矫正过度,会导致外侧间室应力负荷集中,加速外侧间室软骨磨损,引起外侧间室骨关节炎^[7]。但内翻矫正不足,会造成内侧间室假体应力负荷增大,会增加聚

乙烯衬垫磨损,导致早期翻修^[8]。研究表明,可以通过外翻应力位片预测术后下肢力线情况^[9]。术前外翻应力位片测量膝关节面角(femoro tibial facet angle, FTFA)的变化可以预测UKA术后下肢力线变化,外翻应力位可以矫正的内翻畸形,UKA术后的膝关节力线更好^[10]。

评估关节软骨厚度时,除了通常的冠状面应力位片,还可以采用Rosenberg视图(45°屈曲前后投影)。研究表明,在确定骨关节炎患者的关节间隙狭窄时,Rosenberg视图比传统的前后位X线片更加具有敏感性和特异性^[11]。Jacob等^[12]研究证明Rosenberg视图与20°冠状外翻-内翻应力X线摄影相似,可用于确定关节软骨厚度。这两种技术都可用于临床环境,因此,仅使用Rosenberg视图就可以评估关节软骨状况,可取代应力位X线片。

外侧间室软骨退化是影响UKA生存率最常见的并发症,也可以通过术后X线片来判断。Yue等^[13]研究表明,负重前后位、仰卧前后位和仰卧外翻应力膝关节X线片用于评估UKA术后外侧间室残余软骨厚度时没有差异。

绝大多数的UKA手术采用骨水泥固定,术后的X线上经常会出现“生理性透亮线”(radiolucent lines, RLLs),现有的骨水泥UKA术后5年的RLLs率高达62%,主要发生在胫骨侧。Rohan等^[14]研究发现,RLLs在一年内会缓慢进展,但此后就没有继续进展了,而且RLLs的出现与临床结果无关。

2 MRI

X线不能显示软骨和韧带等软组织情况,主要是通过间接表现来推断。而MRI可以更加直观和精确地显示膝关节软骨和韧带情况,并且可以显示小的浅表软骨磨损,有助于临床医师更好地做出决策。

ACL功能缺陷被认为是UKA的禁忌证之一,但目前仍缺乏标准化和可重复的方法来评估晚期AMOA患者的ACL功能完整性。前抽屉试验等术前体检用于ACL完整性评估,通常对急

性 ACL 损伤患者有效,但对于因关节周围结构僵硬而导致的退行性膝关节慢性 ACL 损伤的诊断价值有限^[15]。在退行性膝 MRI 上直接观察 ACL 的纹理和连续性,可能会夸大 ACL 损伤的程度^[16]。此外,扫描和成像质量的不足,可能导致 ACL 显示欠佳,从而降低 MRI 的诊断性能。虽然侧位片上胫骨后骨侵蚀的存在是鉴别 ACL 功能缺陷的一个指标,但这个参数很难量化,而且容易受到主观性和膝关节错位的影响^[17]。Tao 等^[18]研究发现,MRI 上 1.2 mm 的轴向全局被动前胫骨半脱位(passive anterior tibial subluxation, PATS)对于诊断晚期 AMOA 患者的 ACL 功能缺陷具有很强的特异性。

第三代牛津 UKA 系统有 5 种尺寸的股骨假体,以接近正常的膝关节几何形状,然而,这些不同的尺寸也可能引起问题,例如组件尺寸的错误选择。Yang 等^[19]开发出一种通过术前测量膝关节 MRI,而不是基于性别和身高来预测股骨假体大小的方法:他们术前通过膝关节 MRI 预测股骨假体大小,并在术后利用真实侧位片验证该方法的准确性,结果 MRI 测量正确率为 90.3%,这种 MRI 测量方法可以准确预测 UKA 股骨假体大小,并且这种方法可以不考虑不同的种族,个人的膝盖几何形状,或软组织张力带来的影响。

UKA 术后由于假体植入物造成的各种成像伪影,对 MRI 的成像评估提出了特殊的挑战。但是随着近年来 MRI 消除金属伪影技术(metal artifact reduction, MAR)的进步,金属植入物周围组织的横断面图像评估经历了显著的发展,为评估假体周围组织带来了有意义的改进^[20]。MRI 中金属诱发伪影是由于静磁场(B_0)的不均匀性和射频脉冲与金属植入物的相互作用,经过精心选择的序列参数调整的常规 MRI 可以大大改善图像质量。在临床实践中,优化的常规脉冲序列和多光谱成像的组合在临床可行的采集时间内实现了显著的 MAR。

稳定的种植体固定和足够的骨水泥渗透到底层骨对于预防骨水泥 UKA 的失败至关重要^[21]。早期固定失败会导致在中短期随访时发生无菌性松动和不明原因的疼痛^[22]。但对这方面的检测仍然具有挑战性,X 线片可以帮助发现严重的假体错位、放射透明度和骨折^[23]。但在发现更常见但更细微的骨异常(如早期松动、轻微假体错位、感染、应力性骨折或早期骨关节炎)时价值不大。常规 X 线片在评估透光线方面的能力有限,在检测无菌性松动方面只有一般的敏感性和特异性^[24]。多采集可变共振图像组合(multiacquisition variable-resonance image combination, MAVRIC)的 MRI 序列已被证明可以大幅减少金属植入物附近的敏感性伪影,通过减少通平面错配,它可以识别早期和微妙的变化,如骨溶解和骨髓水肿。Laura 等^[25]对有症状的 UKA 术后患者进行 MRI 检查,绝大多数症状性 UKA 患者 MRI 表现为股骨和胫骨交界面处的骨髓水肿和纤维膜,影像学表现和症状有很高的一致性。因此,MRI 加上 MAVRIC 序列可作为评估症状性 UKA 和量化骨成分界面的补充工具,该技术对 UKA 术后骨假体界面分析具有良好的再现性。在骨-假体界面附近,MRI 加上 MAVRIC 可能是一个有价值的检测手段,这种 MRI 方案可能有助于发现 UKA 假体周围的变化,可以更深入地了解 UKA 术后疼痛的病因,便于及时发现假体松动等情况,特别是在放射学检查结果不显著的情况下。

3 CT

CT 可以生成非常详细的横切面解剖图像,在关节炎的成像中特别有价值,因为这些图像比传统 X 线片提供更好的细节。此外,预先 CT 模板在预测关节假体尺寸方面比 2D 模板更精确,结果更好^[26]。这些图像还可以转换为三维效果图,然后可以进行虚拟操作,这是简单的 X 光片无法做到的。此外,CT 扫描产生的横断面成像在骨科手术中是一个至关重要的工具,术前 3D 成像已被证明可以改善假体的定位和放置^[27]。CT 扫描还可以提供区域骨密度的信息,这有助于优化植入物的计划位置,使骨质量达到最佳。

有研究报道了 X 线平片在骨赘检测、髌股关节炎改变方面的不一致性^[28]。由于图像的 2D 性质,关节病理特征可能被隐藏,而 CT 扫描可以助克服这些限制。此外,关节成形术是一种外科手术,需要在 3D 平面上进行规划和执行,使得术前 X 线片的规划不太理想。随着外科医师逐渐认识到多平面假体定位的重要性,三维规划的价值变得更加可取。

Segal 等^[29]比较了 3D 站立 CT 和固定屈曲 X 线摄影在检测内侧和外侧边缘骨赘和软骨下囊肿方面的诊断性能,在 20 例患者中,CT 发现了 12 个软骨下囊肿,其中 11 个(92%)仅通过 X 线片未发现;该研究还发现,CT 在检测骨赘方面比 X 线检查更敏感和准确。这些数据显示了 CT 在改善患者管理和决策方面的潜在优势。仅 X 线平片对疾病的低估可能导致适合手术的患者接受相对无效的非手术治疗。Brandt 等^[30]对 92 例膝关节患者进行了前瞻性分析,该小组通过关节镜和放射学评估对每个膝关节进行评估,以更好地根据 Kellgren 和 Lawrence (KL)分级标准对患者的慢性膝关节疼痛进行分类,他们发现,在 17 例根据分级标准确定膝关节“正常”的患者中,X 线片上未见明显关节间隙狭窄,但是 7 例患者(41%)实际上在关节镜检查中发现了晚期髌股或胫股关节炎变化,作者得出结论,X 光片是评估早期 OA 患者和开发更好的替代方法的高度不敏感的工具。

机械臂辅助人工全膝关节置换术(robotic arm-assisted total knee arthroplasty, RATKA)是为了提高人工 TKA 的安全性和效率,提高假体置换术的准确性和精度而开发的。RATKA 利用基于 CT 的 3D 规划,对每个患者进行个性化设计。患者术前接受下肢 CT 扫描,然后在机器人软件中注册,该软件创建了肢体和关节的虚拟 3D 渲染。根据患者独特的骨骼和软组织解剖结构,外科医师可以在术前和术中对该渲染图以及植入物定位进行虚拟操作和优化。据报道,将术前 CT 扫描与这种先进的手术技术相结合的能力有几个优点,包括更高的准确性和精度,更好的软组织保护和减少组织创伤,并改善患者的短期预后^[31]。

利用 CT 的 MAKO 机器人系统可以帮助解决与 UKA 失败相关的技术错误,包括内外翻、力线偏移、假体尺寸不当、假体位置不良和间隙不平衡等^[32-33]。Lonner 等^[34]对 31 例接受 CT 规划及机械臂辅助 UKA 的患者与 27 例接受手动 UKA 的患者进行了放射学比较,研究组发现,手动组胫骨斜度的误差更大,胫骨假体尺寸的误差更大,冠状面角度的误差也更大。Bell 等^[35]也发现利用 CT 的机器人辅助 UKA 具有更高的组件定位精度。

UKA 术中假体的尺寸非常重要,过大的假体会导致撞击和疼痛,而过小的假体会导致屈曲不稳定。Marchand 等^[36]评估了基于 CT 的术前规划软件通过比较术前预测的尺寸与实际植入

的尺寸来准确预测 UKA 组件尺寸的能力,该小组对 335 例患者进行了 RATKA,发现 97% 的患者中,股骨假体大小可以在一个尺寸内预测。在一项多中心研究中,比较了 151 例患者术前预测的植入物尺寸和实际植入物尺寸,研究发现,100% 的股骨假体和 98% 的胫骨假体尺寸与预测值相差不超过 1 个型号。基于上述结果,基于 CT 的计划可以准确预测术前组件尺寸。这种预测能力在临床结果、质量控制和库存管理方面具有重大优势。

CT 也可用于 UKA 术后评价。Christian 等^[37]开发了一种基于金属伪影减少 CT 扫描的测量技术,并证明其可以准确测量临床条件下植入的胫骨 UKA 假体下骨水泥穿透深度。传统的平面 X 线片被认为不足以可靠地测量骨水泥厚度,因为金属植入物掩盖了骨水泥的某些部分。此外,X 线片将复杂的 3D 结构简化为简化的 2D 投影,仅提供有限的再现性^[38]。因此,许多作者使用 CT 扫描来评估全髋关节^[39]和全 TKA 后^[40]周围的骨水泥。金属伪影减少算法可以显著提高大型金属植入物的 CT 图像质量,但植入小型金属植入物的患者图像质量明显较差,Liu 等^[39]证明,这种基于 CT 的无创骨水泥穿透深度测量技术在胫骨 UKA 骨水泥穿透深度测量中同样具有可靠的结果,因此,它使临床医生和研究人员能够评估水泥渗透,用于临床环境中的体内诊断,以及体外生物力学研究,以及随后对植入物-水泥-骨-界面失效的负荷应用。

4 总结

膝关节 UKA 是治疗单间室 KOA 的有效手段,具有创伤小、恢复快的优点。X 线、CT 和 MRI 等影像学检查在 UKA 术前患者选择、手术规划、术后评价中具有重要作用。X 线是 UKA 术前术后检查的常规手段,除了正侧位片,还可以选用应力位片和 Rosenberg 视图等特殊摄片。X 线在评估膝关节力线和软骨磨损等方面具有重要作用。MRI 可以直观显示膝关节韧带和软骨的情况,有助于更好地做出临床决策。CT 可以从 3D 角度显示膝关节的结构,并可以用于手术机器人导航规划。随着 MAR 的发展,MRI 和 CT 在 UKA 术后的应用也越来越多,可以评价骨水泥的渗透情况,便于早期发现假体松动等问题。这些影像学技术的进步,可以更好地辅助医师进行 UKA 手术,提高患者满意度。

参考文献

- [1] 中华医学会骨科学分会关节外科学组,中国医师协会骨科医师分会骨关节炎学组,国家老年疾病临床医学研究中心,等. 中国骨关节炎诊疗指南(2021 年版) [J]. 中华骨科杂志, 2021, 41(18): 1291-1314.
- [2] PAUL R W, OSMAN A, CLEMENTS A, et al. What are the all-cause survivorship rates and functional outcomes in patients younger than 55 years undergoing primary knee arthroplasty? A systematic review [J]. Clin Orthop Relat Res, 2022, 480(3): 507-522.
- [3] TILLE E, BEYER F, AUERBACH K, et al. Better short-term function after unicompartmental compared to total knee arthroplasty [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2021, 22(1): 326.
- [4] CRAWFORD D A, BEREND K R, THIENPONT E. Unicompartmental knee arthroplasty: US and global perspectives [J]. Orthop Clin North Am, 2020, 51(2): 147-159.
- [5] MORTENSEN J F, KAPPEL A, RASMUSSEN L E, et al. The Rosenberg view and coronal stress radiographs give similar measurements of articular cartilage height in knees with osteoarthritis [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2022, 142(9): 2349-2360.
- [6] MORTENSEN J F, MONGELARD K B G, RADEV D I, et al. MRI of the knee compared to specialized radiography for measurements of articular cartilage height in knees with osteoarthritis [J]. J Orthop, 2021, 25: 191-198.
- [7] KURIYAMA S, WATANABE M, SEKIGUCHI K, et al. Differences in impact on adjacent compartments in medial unicompartmental knee arthroplasty versus high tibial osteotomy with identical valgus alignment [J]. Knee, 2021, 29: 241-250.
- [8] BRUNI D, IACONO F, RUSSO A, et al. Minimally invasive unicompartmental knee replacement: retrospective clinical and radiographic evaluation of 83 patients [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2010, 18(6): 710-717.
- [9] ISHIBASHI K, SASAKI E, OTSUKA H, et al. Valgus correctability and meniscal extrusion were associated with alignment after unicompartmental knee arthroplasty [J]. Clin Orthop Relat Res, 2020, 478(7): 1636-1644.
- [10] 张启栋,郭万首,岳聚安,等. 术前外翻应力位 X 线片预测 Oxford 单髁关节置换术后下肢力线变化的临床研究 [J]. 中国骨与关节杂志, 2016, 5(10): 747-751.
- [11] MIURA Y, OZEKI N, KATANO H, et al. Difference in the joint space of the medial knee compartment between full extension and Rosenberg weight-bearing radiographs [J]. Eur Radiol, 2022, 32(3): 1429-1437.
- [12] MORTENSEN J F, KAPPEL A, RASMUSSEN L E, et al. The Rosenberg view and coronal stress radiographs give similar measurements of articular cartilage height in knees with osteoarthritis [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2022, 142(9): 2349-2360.
- [13] YUE J, GUO W, WAN F, et al. Quantitative evaluation of joint space width in the lateral compartment after medial unicompartmental knee arthroplasty: comparison of three radiographic views [J]. J Knee Surg, 2018, 31(8): 730-735.
- [14] LISOWSKI L A, MEIJER L I, VAN DEN BEKEROM M P, et al. Ten- to 15-year results of the Oxford Phase III mobile unicompartmental knee arthroplasty: a prospective study from a non-designer group [J]. Bone Joint J, 2016, 98 b(10 Supple B): 41-47.
- [15] KIKUCHI K, HIRANAKA T, KAMENAGA T, et al. Anterior cruciate ligament deficiency is not always a contraindication for medial unicompartmental knee arthroplasty: a retrospective study in nondesigner's Japanese hospital [J]. J Arthroplasty, 2021, 36(2): 495-500.
- [16] HURST J M, BEREND K R, MORRIS M J, et al. Abnormal

- preoperative MRI does not correlate with failure of UKA [J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(9 Suppl): 184–186.
- [17] HANGAARD S, BOESEN M, BLIDDAL H, et al. Do Ahlbäck scores identify subgroups with different magnitudes of cartilage thickness loss in patients with moderate to severe radiographic osteoarthritis? One-year follow-up data from the osteoarthritis initiative [J]. *Skeletal Radiol*, 2022, 51(4): 777–782.
- [18] TAO Y, TANG S, ZHAO P, et al. Value of passive anterior tibial subluxation on axial MRI in identifying anterior cruciate ligament functional deficiency in patients with advanced anteromedial osteoarthritis of the knee: a case-control study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 434.
- [19] YANG C P, LAI Y C, WU C T, et al. Using MRI measurement to improve accuracy of femoral component sizing in Oxford unicompartmental knee arthroplasty [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(18): 4284.
- [20] KHODARAHMI I, FRITZ J. Advanced MR imaging after total hip arthroplasty: the clinical impact [J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2017, 21(5): 616–629.
- [21] SAKKA B I, SHINOKI A, MORIKAWA L, et al. Comparison of early post-operative complications following unilateral or single-stage bilateral unicompartmental knee arthroplasty [J]. *Knee*, 2020, 27(5): 1406–1410.
- [22] KENNEDY J A, MOHAMMAD H R, MELLON S J, et al. Age stratified, matched comparison of unicompartmental and total knee replacement [J]. *Knee*, 2020, 27(5): 1332–1342.
- [23] COOPER A M, CONNOLLY K, PENNA S, et al. Evaluation and management of a painful knee after total knee arthroplasty [J]. *Orthopedics*, 2021, 44(6): 341–352.
- [24] XUE L, XUE H, WEN T, et al. Assessment of radiolucent lines in patients with lateral unicompartmental knee arthroplasty and the relationship between these lines and the outcome [J]. *Int Orthop*, 2021, 45(8): 2017–2023.
- [25] KLEEBLAD L J, ZUIDERBAAN H A, BURGER A J, et al. MRI findings at the bone-component interface in symptomatic unicompartmental knee arthroplasty and the relationship to radiographic findings [J]. *Hss J*, 2018, 14(3): 286–293.
- [26] CHEN X, WANG Y, MA R, et al. Validation of CT-based three-dimensional preoperative planning in comparison with acetate templating for primary total hip arthroplasty [J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(6): 1152–1160.
- [27] NISHIHARA S, HAYASHIDA K. Comparison between free-hand technique and computed tomography-based navigation in acetabular cup placement through direct anterior approach for total hip arthroplasty [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2022, 142(2): 323–329.
- [28] LIEW J W, RABASA G, LAVALLEY M, et al. Development of a magnetic resonance imaging-based definition of knee osteoarthritis: data from the multicenter osteoarthritis study [J]. *Arthritis Rheumatol*, 2023, 75(7): 1132–1138.
- [29] SEGAL N A, NEVITT M C, LYNCH J A, et al. Diagnostic performance of 3D standing CT imaging for detection of knee osteoarthritis features [J]. *Phys Sportsmed*, 2015, 43(3): 213–220.
- [30] BRANDT K D, FIFE R S, BRAUNSTEIN E M, et al. Radiographic grading of the severity of knee osteoarthritis: relation of the Kellgren and Lawrence grade to a grade based on joint space narrowing, and correlation with arthroscopic evidence of articular cartilage degeneration [J]. *Arthritis Rheum*, 1991, 34(11): 1381–1386.
- [31] ROCHE M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2043–2047.
- [32] KAZARIAN G S, BARRACK T N, OKAFOR L, et al. High prevalence of radiographic outliers and revisions with unicompartmental knee arthroplasty [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2020, 102(13): 1151–1159.
- [33] VASSO M, DEL REGNO C, D'AMELIO A, et al. Minor varus alignment provides better results than neutral alignment in medial UKA [J]. *Knee*, 2015, 22(2): 117–121.
- [34] LONNER J H, JOHN T K, CONDITT M A. Robotic arm-assisted UKA improves tibial component alignment: a pilot study [J]. *Clin Orthop Relat R*, 2010, 468(1): 141–146.
- [35] BELL S W, ANTHONY I, JONES B, et al. Improved accuracy of component positioning with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: data from a prospective, randomized controlled study [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2016, 98(8): 627–635.
- [36] MARCHAND R C, SODHI N, BHOWMIK-STOKER M, et al. Does the robotic arm and preoperative CT planning help with 3D intraoperative total knee arthroplasty planning? [J]. *J Knee Surg*, 2019, 32(8): 742–749.
- [37] SCHEELE C B, MULLER P E, SCHRODER C, et al. Accuracy of a non-invasive CT-based measuring technique for cement penetration depth in human tibial UKA [J]. *BMC Med Imaging*, 2019, 19(1): 9.
- [38] READING A D, MCCASKIE A W, GREGG P J. The inadequacy of standard radiographs in detecting flaws in the cement mantle [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1999, 81(1): 167–170.
- [39] LIU P T, PAVLICEK W P, PETER M B, et al. Metal artifact reduction image reconstruction algorithm for CT of implanted metal orthopedic devices: a work in progress [J]. *Skeletal Radiol*, 2009, 38(8): 797–802.
- [40] GOODHEART J R, MILLER M A, MANN K A. In vivo loss of cement-bone interlock reduces fixation strength in total knee arthroplasties [J]. *J Orthop Res*, 2014, 32(8): 1052–1060.

(2023-05-30收稿)

(本文编校:朱岚,张迪)