

· 专家共识 ·

放疗医生评估放疗计划中国专家共识

岳金波¹, 张焯², 章文成³, 陈进琥¹, 王奇峰⁴, 杨镔⁵, 刘志凯⁶, 刘彦伟⁷,
门阔², 胡伟刚⁸, 蒋胜鹏³, 彭佳元⁸, 董鑫哲⁹, 王孝深¹⁰

1. 山东省肿瘤防治研究院(山东省肿瘤医院腹部放疗一病区:岳金波;放射物理技术科:陈进琥), 山东第一医科大学(山东省医学科学院), 山东 济南 250117
2. 国家癌症中心, 国家肿瘤临床医学研究中心, 中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科, 北京 100021
3. 天津医科大学肿瘤医院放疗科, 国家恶性肿瘤临床医学研究中心, 天津市恶性肿瘤临床医学研究中心, 天津市肿瘤防治重点实验室, 天津 300060
4. 四川省肿瘤医院放疗科, 四川省癌症防治中心, 电子科技大学附属肿瘤医院, 四川 成都 610041
5. 湖南省肿瘤医院, 中南大学湘雅医学院附属肿瘤医院放疗科, 湖南 长沙 410013
6. 中国医学科学院北京协和医院放疗科, 北京 100730
7. 首都医科大学附属北京天坛医院放疗科, 北京 100070
8. 复旦大学附属肿瘤医院放射治疗中心, 复旦大学上海医学院肿瘤学系, 上海市放射肿瘤学重点实验室, 上海市放射治疗临床医学研究中心, 上海 200032
9. 山东大学齐鲁医院放疗科, 山东 济南 250012
10. 复旦大学附属耳鼻喉科医院放疗科, 上海 200031

摘要: 放疗计划评估是放疗医生临床实践中的重要环节, 为了确保放疗效果, 本专家委员会制定了包含 9 个核心部分的共识。(1)核对: 包括定位图像名字、时间、部位以及照射部位的左右侧等。核对定位扫描图像完整性, 包括肿瘤和危及器官(OAR)。(2)肿瘤靶区和 OAR 勾画: 检查肿瘤靶区命名标准化, 检查肿瘤靶区和 OAR 勾画是否在合适的窗宽、窗位下进行; 肿瘤区(GTV)勾画是否充分结合多模态影像勾画; 临床靶区(CTV)是否按照解剖屏障进行修回; 是否考虑肿瘤运动而设定内靶区, 并确认内靶区外放是否与相应的呼吸管理模式相匹配; 计划靶区(PTV)外放是否根据相应肿瘤中心的设备精度、人员技术水平、图像引导放疗方式进行综合考虑; 是否在水平面、矢状面和冠状面全面审核靶区和 OAR 勾画的准确性和完整性。(3)射野设置和入射角度: 照射技术、入射角度及数量的选择是否合理, 射野或者拉弧的数量是否考虑对于治疗时间的影响。(4)剂量覆盖: 是否在 CT 图像的水平面、矢状面、冠状面逐层评估三维剂量分布, 处方剂量覆盖不到的 PTV 区域, 甚至 CTV 或 GTV 是否是肿瘤容易复发的部位, 处方剂量包绕的 PTV 之外的区域是否落在重要 OAR 上。(5)剂量冷热: PTV 内是否存在冷点以及 PTV 外是否存在热点。(6)OAR 保护: OAR 评估时有无按照相应的分割模式进行评价; 有无综合考虑患者情况、肿瘤负荷和发展动态、既往肿瘤治疗疗效和毒性, 以及此次放疗目的和联合方案; 有无在水平面、矢状面、冠状面上每层评估, 以及剂量体积直方图三维维度上评估 OAR 受量。(7)权衡取舍: 有无区分 OAR 优先等级; 图像验证时, 肿瘤贴临一级器官时, 有无考虑采用更严格、更精准的图像引导技术。(8)处方剂量: 确定是隔日照射还是每日照射, 或者是超分割放疗。(9)确认: 多计划对比时, 是否确认最后通过的计划是放疗医生认可的计划。本共识凝练了 51 项核心放疗计划评估要点, 并结合这些要点对国内多家医疗机构的 327 名高级职称的放疗医生和放射物理师进行调查问卷, 建立了相应的推荐意见。

关键词: 靶区勾画; 危及器官; 冷热点; 射野; 靶区覆盖; 共识

中图分类号: R730.55 **文献标识码:** B **文章编号:** 1673-5269(2024)08-0453-18

DOI: 10.16073/j.cnki.cjcp.2024.08.01

基金项目: 中国医学科学院肿瘤医院住培教学研究课题(E2024014)

第一作者/通信作者: 岳金波, 男, 辽宁本溪人, 博士, 主任医师, 博士生导师, 主要从事腹部肿瘤放射治疗的研究工作。

E-mail: jbyue@sdfmu.edu.cn

第一作者: 张焯, 男, 江苏靖江人, 博士, 副主任医师, 硕士生导师, 主要从事头颈部肿瘤放射治疗的研究工作。

E-mail: drzyc1983@163.com

第一作者: 章文成, 男, 山西朔州人, 博士, 副主任医师, 硕士生导师, 主要从事胸部肿瘤放射治疗的研究工作。

E-mail: wczhang@tmu.edu.cn

第一作者: 陈进琥, 男, 山东济宁人, 硕士, 副主任技师, 主要从事肿瘤放疗物理技术方面的研究工作。

E-mail: felixchen@163.com

放疗计划评估是放疗医生临床实践中的重要环节之一,然而在实际工作中,这一环节往往未能得到充分重视,或者仅依赖于物理师或剂量师的意见,而放疗医生未能积极参与到计划的评价过程中。因此,本专家委员会制定该共识,旨在为临床放疗医生提供参考,从而更好地制定和评估放疗计划。

1 核对

1.1 靶区勾画前的核对

在靶区勾画前应核对患者定位体位与定位图像信息的准确性,包括被扫描患者姓名、图像扫描时间和部位(上下界)、照射部位的左右侧以及扫描图像是否完整等。核对多模态影像融合,是否注意配准图像的方向性。确定肿瘤靶区和危及器官(organ at risk, OAR),最终在计划 CT 图像上进行勾画。

1.2 特殊情况下的核对

特殊情况 1:如怀疑有皮肤侵犯或转移淋巴结突出皮肤,因剂量建成会导致靶区剂量不足时,应考虑放置组织补偿物。在上述情况下计划靶区(planning target volume, PTV)不应该缩至皮肤下,同时确认填充物的添加方式、边界、厚度是否合适。

特殊情况 2:需要校正照射范围内的金属伪影。如患者内置钛合金股骨,可使用能够消除高密度伪影的迭代算法进行图像重建,实现低剂量扫描的同时去除图像金属伪影,显著改进图像质量,用于肿瘤靶区和 OAR 的勾画(图 1)。对于高密度钛金属,应询问物理师电子密度是否正确。此种情况下,物理师需要注意校正重建图像 CT 值的偏差是否在剂量计算容许误差范围内。

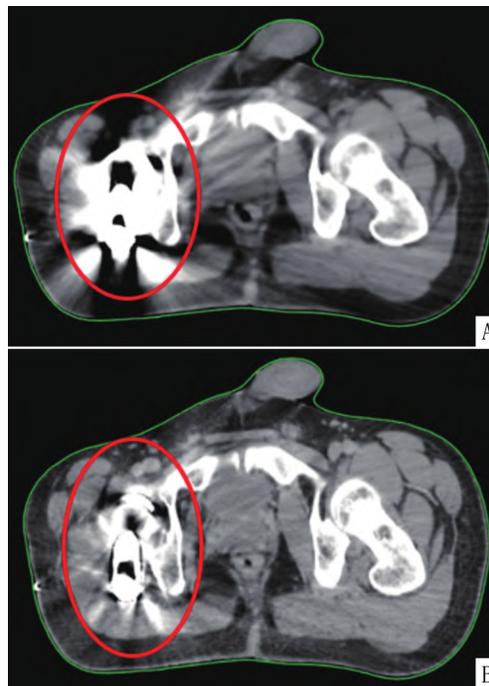
特殊情况 3:在肿瘤靶区内,若存在大体积的造影剂可能会影响剂量计算的准确性,建议考虑用水进行替换以校正剂量分布。例如:上消化道肿瘤放疗时胃内填充的大量造影剂,或前列腺癌放疗时膀胱内积聚的大量造影剂,为了确保剂量计算的准确性,通常需要将这较大体积的造影剂通过注水来替代。见图 2。

2 肿瘤靶区和 OAR 勾画

2.1 审核肿瘤靶区和 OAR 命名的标准化

为了增强肿瘤靶区、OAR 以及剂量体积直方图(dose volume histogram, DVH)相关参数表述的清晰度与一致性,需对这些元素进行标准化命名,并确立统一的剂量和体积单位计量标准。推行标准化对于临床试验的数据采集至关重要,它不仅有利于不同机构间数据

采集的共享,还有助于减少医生、物理师和剂量师之间沟通的错误,并对提升治疗计划的质量控制水平有所助力。肿瘤靶区命名标准可参考美国 AAPMTG-263 号报告的放射肿瘤结构命名报告^[1],或者美国放射肿瘤标准化结构命名^[2]。见表 1 和表 2。

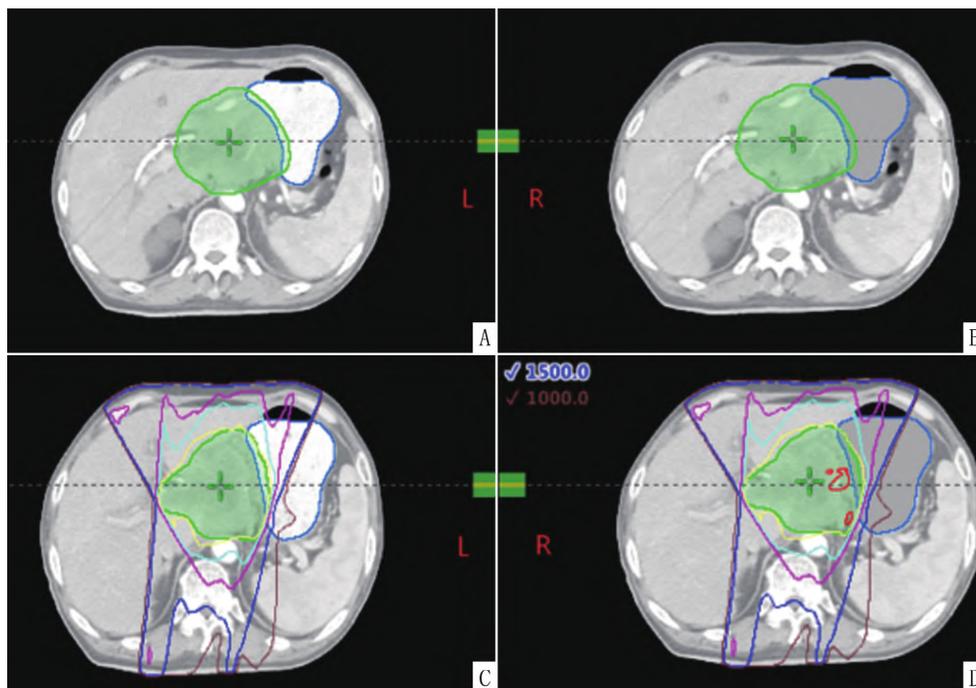


注:A. 伪影明显的 CT 平扫图像;B. 去金属伪影技术重建后的 CT 平扫图像;红圈为勾画的肿瘤靶区和危及器官。

图 1 去金属伪影技术重建前后 CT 平扫图像

2.2 审核肿瘤靶区勾画的准确性和完整性

肿瘤靶区包括肿瘤区(gross tumor volume, GTV)、临床靶区(clinical target volume, CTV)、内靶区(internal target volume, ITV)和 PTV,这些靶区均需要在轴位、矢状位和冠状位图像上审核其完整性和准确性,并对不规则毛刺进行适当修改,以增加肿瘤靶区勾画的可重复性。在应用靶区内同步加量(simultaneous integrated boost, SIB)技术的治疗方案中,不同剂量的 GTV、CTV、ITV 和 PTV 要核对准确无误。此外,在确认靶区外放过程中,应审核 CTV、ITV 和 PTV 的外放是否准确,例如:PTV 的界定应基于内在肿瘤区(internal gross tumor volume, IGTV)进行外放,而非误用 GTV 作为外放基础。在最终审核靶区与治疗计划阶段,上级医师需要确认 GTV、CTV 和 PTV 是否被改动过,如果确认有所变更,需要重新外扩相应的 CTV 和 PTV,并再次审核各种感兴趣区勾画的完整性和准确性。



注: A. 定位时胃内大量高密度造影剂分布图像; B. 采用水密度填充替代造影剂后的胃部 CT 图像; C. 未做造影剂水替换的原计划设计; D. 把未改变造影剂密度的计划复制到替代密度的 CT 图像上, 在相同的照射野和机器跳数情况下, 靶区内会出现高剂量区域(红线所示), 可能会导致胃壁的高剂量照射。

图 2 肿瘤放疗中造影剂对剂量计算影响的 CT 图像

表 1 肿瘤靶区标准化命名要点

序号	肿瘤靶区标准化命名要点 ^[1-2]
1	如果必须使用物理剂量的数值, 则强烈建议以 cGy 为单位指定剂量数值(例如: PTV_5 040); 如果必须使用物理剂量的数值, 并且必须以“Gy”为单位指定这些数值, 则应在剂量的数值后附加“Gy”(例如: PTV_50. 4 Gy); 对于不允许使用句点的系统, 应以“p”字符替换句点(例如: PTV_50p4 Gy)
2	靶区外放可以在剂量处方(YYYY)之前, 应用 2 个字符(XX)以“mm”为单位指定, 使用下划线作为分隔符, 格式为 PTV_XX_YYYY。例如: 通过将相应的 CTV 均匀扩展 7 mm 而产生的处方剂量为 5 000 cGy 的 PTV 可以描述为 PTV_07_5 000; 同样地, 通过将 GTV 均匀扩展 15 mm 而产生的 CTV 可以描述为 CTV_15_5 000
3	如果所指示的剂量必须反映用于放疗的次数, 则在末尾添加单位为“cGy”或“Gy”的剂量数值, 以及由“×”字符来连接治疗次数(例如: PTV_LIVER_2 000×3 或 PTV_LIVER_20 Gy×3)
4	对于四维治疗计划, 将呼气末、吸气末或最大密度投影时的 GTV 分别标记为 GTV_EE、GTV_EI 或 GTV_MIP
5	为了区分肿瘤和淋巴结靶区, 靶区附加了 p 或 n, 例如: PTVp_5 000 或 PTVn_5 000。如果需要区分多个肿瘤和淋巴结靶区, 可以在 p 或 n 之后添加 1 个整数(例如: PTVp1_5 000、PTVn1_5 000), 然后还应将该整数添加到相应的 GTV 和(或)CTV 靶区
6	如果使用靶区分类, 请将靶区分类放在靶区类型之后, 不留空格。下面列出了允许的目标分类器: (1)n: 淋巴结(nodal), 例如: PTVn; (2)p: 原发(primary), 例如: GTVp; (3)sb: 手术瘤床(surgical bed), 例如: CTVsb; (4)par: 实质(parenchyma), 例如: GTVpar; (5)v: 静脉血栓形成(venous thrombosis), 例如: CTVv; (6)vas: 脉管(vascular), 例如: CTVvas
7	如果使用了多个部位不同的靶区, 则在靶区类型+量词之后使用阿拉伯数字(例如: PTV1、PTV2、GTVp1 和 GTVp2)
8	如果使用结构指示符, 则它们在类型/分类/影像之后带有下划线前缀(例如: CTV_A_Aorta、CTV_A_Celiac、GTV_Preop、PTV_Boost、PTV_Eval 和 PTV_MR2_Prostate)
9	如果指定了剂量, 则将剂量放在目标字符串的末尾, 并以下划线字符为前缀。建议使用相对剂量水平, 而不是指定物理剂量: (1)高(High), 例如: PTV_High、CTV_High 和 GTV_High); (2)低(Low), 例如: PTV_Low、CTV_Low 和 GTV_Low; (3)中(Mid), 例如: PTV_Mid、CTV_Mid 和 GTV_Mid

注: PTV. 计划靶区; CTV. 临床靶区; GTV. 肿瘤区。

2.3 审核肿瘤靶区和 OAR 轮廓勾画的适宜窗宽和窗位

由于不同的窗宽、窗位下肿瘤和一些重要 OAR 的显示存在明显差异,在审核肿瘤靶区和 OAR 轮廓勾画时应选择适宜的窗宽和窗位。例如:肺癌在不同的窗宽、窗位下勾画会存在明显的差异。见图 3。

2.4 审核 GTV 勾画是否充分结合多模态影像

GTV 勾画应充分结合多模态影像学证据,包括诊断 CT、MR、PET/CT 融合图像,以及内窥镜检查和超声引导等,确保全面评估。此外,在制定 GTV 范围时,还应考虑患者之前是否接受诱导化疗导致定位时 GTV 可能缩小甚至消失的情况。此外,在进行靶区定义时,不容忽视的一个考量因素是因为图像融合可能导致的肿瘤靶区异常变形,从而对靶区勾画准确性的影响。

2.5 审核 CTV 是否按照解剖屏障进行修回

审核 CTV 时应关注 CTV 是否按照解剖屏障进行修回,例如骨、心脏、大血管等。

2.6 审核是否考虑肿瘤运动而设定 ITV

确认 ITV 外放是否与相应的呼吸管理模式相匹配。如果应用四维 CT 技术获取了肿瘤在呼吸周期中的运动信息以构建 ITV,则需要进一步通过动态影像学检查核实所建立的 ITV 是否完整包含肿瘤所有可能位移轨迹,从而保证在实际治疗中不会遗漏任何潜在的病灶区域。

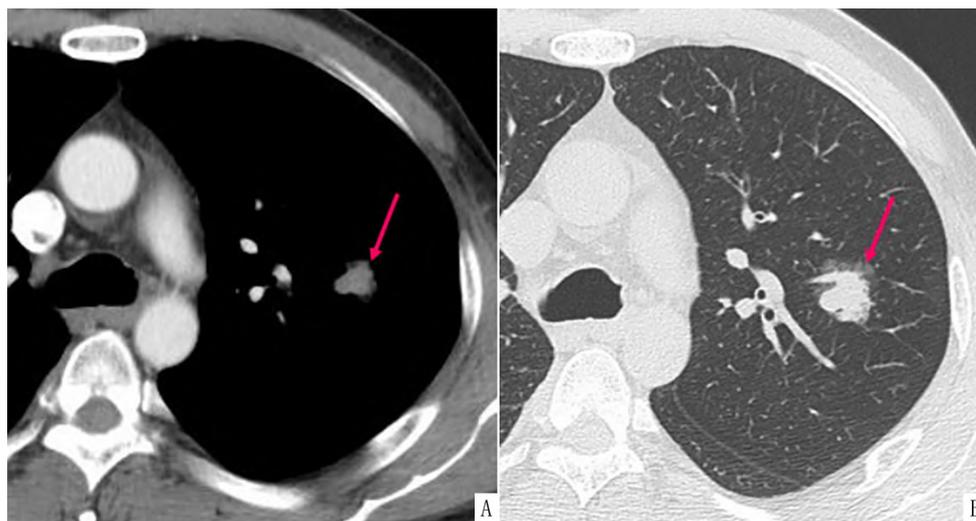
2.7 审核 PTV 外放是否综合考虑

PTV 的外放策略应根据肿瘤中心所使用的设备精度、操作人员的专业技术水平以及采用的图像引导方式,同时结合应用的放疗设备如 MR 加速器、Cyber 刀等特性进行综合考虑。如果选择非均匀性方向的 PTV 外放,则需确定各个方向的设定均无误。此外,在治疗涉及多个靶区的情况下,若每个靶区摆位误差不同,是否设置不同的外放边界,以适应各自的定位不精确性。

表 2 正常组织标准化命名要点

序号	正常组织标准化命名要点 ^[1-2]
1	所有结构名称都限制为 16 个字符或更少,以确保与大多数计划系统兼容
2	所有结构名称必须解析为唯一值,与大小写无关,这可确保不区分大小写的系统不会导致定义重叠
3	使用复数来标识复合结构,即名称在根结构名称上以“s”或“i”结尾(例如:Lungs、Kidneys、Hippocampi、LNs (for all lymph nodes)和 Ribs_L。)
4	每个结构类别的第 1 个字符都是大写的(例如:Femur_Head 和 Ears_External)
5	下划线字符用于分隔分类(例如:Bowel_Bag)
6	空间分类始终位于字符串末尾的下划线字符之后(例如:Lung_L、Lung_LUL、Lung_RLL 和 OpticNrv_Prv03_L): (1)L 代表左侧(left); (2)R 代表右侧(right); (3)A 代表前侧(anterior); (4)P 代表后侧(posterior); (5)I 代表下侧(inferior); (6)S 代表上侧(superior); (7)RUL、RLL、RML 分别代表右上叶(right upper lobe)、右下叶(right lower lobe)和右中叶(right middle lobe); (8)LUL、LLL 分别代表左上叶(left upper lobe)和左下叶(left lower lobe); (9)NA _{adj} 代表不相邻(non-adjacent); (10)Dist 代表远侧(distal),Prox 代表近侧(proximal)
7	标准范畴词根用于分布在全身的结构: (1)A 代表动脉(artery),例如:A_Aorta 和 A_Carotid; (2)V 代表静脉(vein),例如:V_Portal 和 V_Pulmonary; (3)LN 代表淋巴结(lymph node),例如:LN_Ax_L1 和 LN_IMN; (4)CN 代表颅神经(cranial nerve)(例如:CN_IX_L、CN_XII_R); (5)G _{nd} 代表腺体(glandular structure),例如:G _{nd} _Submand; (6)Bone 代表骨,例如:Bone_Hyoid 和 Bone_Pelvic; (7)Musc 代表肌肉(muscle),例如:Musc_Masseter 和 Musc_Sclmast_L; (8)Spc 代表间隙(Space),例如:Spc_Bowel 和 Spc_Retrophar_L; (9)VB 代表椎体(vertebral body); (10)Sinus 代表窦,例如:Sinus_Frontal 和 Sinus_Maxillary
8	危及器官计划体积在主结构后面用 PRV 表示,并用下划线隔开(例如:脑干_Prv)。PRV 外扩毫米数,以 2 个数字放在 PRV 后面表示(例如:SpinalCord_Prv05 和 BrainStem_Prv03),除非结果超过字符限制,例如:OpticChiasm_Prv03 为 17 个字符,可以截断为 OpticChiasm_Prv3
9	部分结构是通过在词根名称后附加“~”字符(例如:脑~、肺~L)来指定的,使用该指示符来确保轮廓结构不会被误解为整个器官(通常是平行器官)。例如:CT 扫描不够长,不足以包括完整的肺体积,肺~表示只是完整肺的一部分
10	主要名称,从左到右,结构分类从一般到具体,最后是位置。因此,按字母顺序排序的结构名称会生成按器官分组的列表(例如:Kidney_R、Kidney_Cortex_L 和 Kidney_Hilum_R)

注:PRV. 危及器官计划体积。



注:A.纵隔窗;B.肺窗;箭头指示为肿瘤部位。

图3 肺癌在不同窗宽窗位设置下的轮廓勾画差异比较

2.8 审核 OAR 勾画的完整性和准确性

在对 OAR 进行勾画审核时,特别是在由经验尚浅的医生、非放疗专业人员(如剂量师)或人工智能勾画软件代为完成的情况下,上级或资深医师必须确保每一处 OAR 都被准确并完整勾画出来,不要遗漏必须考虑和评价的 OAR。在复查过程中,需要审核 OAR 勾画范围是否充足或完整,以避免在调强放疗(intensity modulated radiotherapy, IMRT)计划中由于某一层 OAR 未被充分勾画而导致此层过高的剂量暴露。此外,针对重要 OAR 的安全性规划,必须审核是否设定危及器官计划体积(planning organ at risk volume, PRV),如在胰腺癌立体定向体部放疗(stereotactic body radiotherapy, SBRT)方案中,需要给予十二指肠设定相应的 PRV,不同类型的肿瘤以及不同的部位,其对应的 PRV 应根据具体情况设定或不设定。

尽管人工智能在 OAR 自动勾画中具有一定精确度,但最终仍需经过放疗医生勾画或确认。如原发性肝癌的正常肝脏组织、十二指肠、小肠,如头颈部肿瘤的内耳、海马,如妇科肿瘤的卵巢等区域的勾画准确性不容忽视,放疗医生的专业判断与人工审核环节始终是保证放疗靶区勾画质量不可或缺的关键步骤。若 OAR 勾画不准确,则对正常器官受量的评估就没有实际的指导价值,无法确保放疗计划的安全性和有效性。

在勾画 OAR 时,可参考美国放射肿瘤学会年会(American Society for Radiation Oncology, ASTRO)发布的正常组织勾画指南^[1],该指南涵盖了大部分常见正常组织结构的界定原则。此外,还可以参考相关的医学文献和临床试验方案,以确保对这些重要结构进行精确和符合最新实践标准的勾画。见表 3。

2.9 审核肿瘤靶区和 OAR 的无意义勾画点

在靶区勾画过程中,由于靶区的不断调整与优化,

常会出现肿瘤靶区和 OAR 无意义点,这有可能导致剂量师无法准确区分有效边界。因此,在轴位、矢状位和冠状位,或者在三维模式下全面审核肿瘤靶区和 OAR 无意义点并予以消除是重要的步骤。

2.10 复杂靶区的二次审核

在医疗条件许可的前提下,对于头颈部肿瘤、淋巴瘤等复杂靶区,需要由其他资深医生进行二次审核,以免遗漏肿瘤靶区或 OAR 的重要信息。

3 照射技术与射野设置

3.1 照射技术

随着放射治疗技术的发展和相关软硬件的不断升级,IMRT 逐步取代三维适形放疗成为主要的治疗方式。固定束逆向 IMRT 和旋转容积逆向调强放疗(volumetric modulated arc therapy, VMAT)都可以借助计划系统(treatment planning system, TPS)根据指定的目标剂量体积参数进行优化运算,并实现较为理想三维剂量分布的计划,从而在满足靶区照射剂量的同时尽可能地降低 OAR 的受量。对于复杂靶区,或靶区与 OAR 位置关系密切,以及对剂量分布要求特别严格的情况,IMRT 技术具有明显的优势。VMAT 可以得到更加适形的剂量分布,并减少靶区外组织的高剂量受照体积^[24]。某些情况下,VMAT 可以以更少的机器输出跳数及更快的治疗速度达到与 IMRT 相似的剂量学效果,对于患者多、放疗设备少的中心,VMAT 已成为主要的治疗方式^[25-29]。然而在一些特殊临床情况下,三维适形照射技术仍具有一定剂量学优势^[30-32],例如:位于体表表浅位置的靶区,仍然可以采用切线 2 野对穿甚至是垂直单野进行照射治疗(图 4)。因此,在制定放疗计划前,需要综合考虑患者经济条件、治疗时间、正常组织过多低剂量照射等因素,临

床医师应与剂量师(或物理师)共同探讨确定最适合的治疗技术方案。

表 3 危及器官勾画指南参考文献

正常组织部位	正常组织	参考资料
中枢神经系统	脑、脑干、耳蜗、咽缩肌、唇、下颌骨、视交叉、视神经、口腔、腮腺、垂体、脊髓、颌下腺、声门上喉、颞叶、甲状腺	文献[2]
头颈部	马尾神经	文献[3]
	海马	文献[4]
	头皮	文献[5]
	耳蜗、角膜、眼/眼球、海马、泪腺、晶体、视交叉、视神经、垂体、视网膜	文献[6]
	耳蜗	文献[7]
	咽缩肌	文献[8]
	喉	文献[9]
胸部	颈内动脉	文献[10]
	腮腺	文献[11]
	臂丛神经	文献[12]
	臂丛神经、支气管、食管、肺、近段支气管树、肋骨、脊髓	文献[13]
	乳腺	文献[14]
	胸壁、心脏	文献[15]
	大血管	文献[16]
腹部	心脏	文献[17]
	左前降支	文献[18]和[19]
	胆总管、十二指肠、食管、胆囊、食管胃交接部、肾、肝、胰腺、脊髓、脾、胃	文献[20]
盆腔	外生殖器	文献[21]
	肛门直肠	文献[22]
	膀胱、结肠袋、结肠、股骨头、阴茎球部、前列腺、直肠、乙状结肠、小肠、骶丛	文献[23]

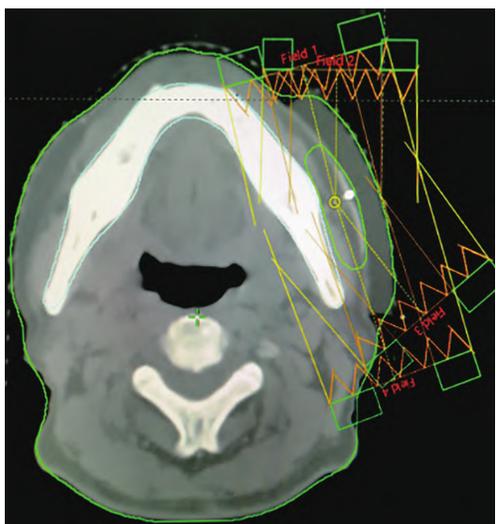


图 4 下颌外侧靶区放疗计划的切线对穿野设计

3.2 能量选择

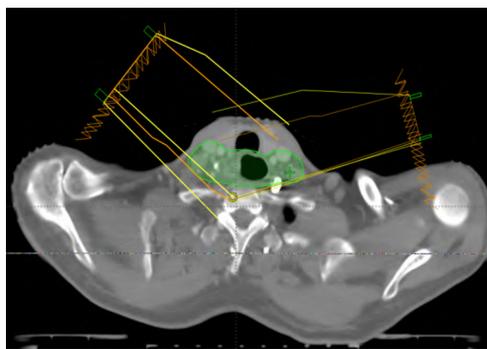
现代电子直线加速器可输出多档能量的高能 X 射线(光子),能量一般为 6、8、10 及 15 MV。根据照射靶区在人体内深度及穿过的组织厚度/密度,选择合适的射线能量。由于过高能量(>10 MV)的 X 射线在临床治疗中会产生明显的中子污染,因此根据 ICRU83 号报告^[33]不再推荐使用。而在临床实践中,考虑到 IMRT 技术的优势以及人体组织的平均阻止本领比,6 MV X 射线能够满足绝大多数情况的放射治疗^[34-36]。

3.3 射野设置

对于不同放疗技术,照射野角度和数目的设置依然要遵循基本原则。入射角度以近靶区侧、入射路径短及避开重要 OAR 为主,减少非必要入射^[37]。射束的开野形状(包括使用多叶光栅或其他设备控制的射束形状)要尽量符合靶区的投影形状,这可以通过射野方向观界面直观观察每个射野的形状,并确保其对应的三维剂量分布与靶区形状精确匹配。

针对颅脑部放疗,需要考虑对健侧脑组织以及重要脑功能核团的保护,尤其在颅底层面时要避免射束直接穿过晶体。

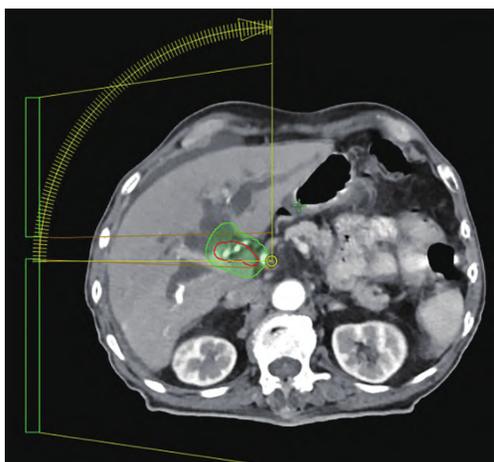
头颈部放疗时,入射角度尽量避开肩膀以减少剂量不确定性。见图 5。



注:设计策略上优先避免经过肩膀。

图 5 头颈部放疗计划中射野方向选择

胸部放疗时,则需考量是否避开如心脏起搏器等金属植入物,以防止影响剂量分布和患者安全。针对肺癌、食管癌、淋巴瘤等胸部肿瘤的放疗,入射角度应以前后方向为主,尽量不要使用侧向入射方法,以最大程度降低肺的低剂量受照体积。若此时心脏受量较高,可以优先选择从脊柱方向入射来减轻心脏受照风险。乳腺或胸壁放疗时,应以切线方向为主,避免垂直胸壁入射。当联合锁骨上照射时,要注意分野以避免射野面积过大导致肺受量增加。此外,对于上腹部放疗的方案,建议保留一部分正常肝组织不在所有入射和出射的射束范围内,以保留肝的再生能力。见图 6。



注:设计策略上优化射野角度以保护正常肝组织及维持其再生能力。

图 6 胆管癌靶区放疗计划射野角度设计

在进行下腹部及盆腔放疗时,入射和出射射束要避免避开卵巢和睾丸,入射射束尽量避免肠造口皮肤开口处。

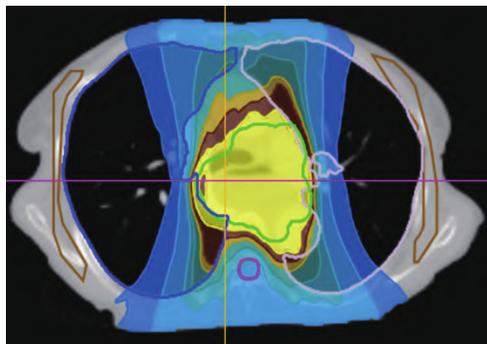
四肢远端放疗时,要考虑保留一部分皮肤不在入射和出射射束内。

对于儿童肿瘤放疗,射束在避开具有生长发育功能的组织器官以及生殖器官前提下,尽量避让重要组织的骺线。

入射野应尽量避免让体内金属植入物。植入物造成的伪影可参考靶区和 OAR 勾画章节建议。若体内存在超高密度植入物(其密度超出 TPS 定义范围),应避免射束直接入射,以减少剂量计算的不确定度。同时,要注意避免射野间的夹角度数过小,致使射束路径上出现叠加高剂量。此外,射野数目过多时并不能显著提高计划的质量,反而会造成放疗时间过长、机器损耗增加等问题^[35,38-39]。因此,临床医生应该基于临床标准评估放疗计划。

对于 VMAT 及螺旋断层放疗,旋转弧度的设置仍然可以参考固定束射野角度的建议,采用分段弧或强制停止出束的方法(图 7)减少或避开 OAR 及重要组织结构的受照^[40-41]。多野/多弧度照射能够使剂量

更分散,并获得更好的剂量分布,这种布野方式适用于绝大多数肿瘤的放疗。



注:设置 Block(两侧棕色区域)进行剂量约束。

图 7 调强放疗与螺旋断层放疗中的旋转弧段优化

3.4 子野数目和跳数

IMRT 技术是通过多叶光栅的连续/分步运动实现不同剂量的投照。在连续投照过程中,仍存在射线穿透多叶光栅闭合的叶片对人体组织造成散射剂量的可能性^[42-43]。因此,在保证治疗效果的同时,适当减小照射野面积、减少 IMRT 子野数目、降低跳数,可以降低人体组织不必要的受照剂量^[44-45]。同时,射野或者拉弧的数量也需要考虑患者的经济承受能力。一个有经验的剂量师(或物理师)能够在确保治疗精准性的前提下,综合考量固定射野边界设定、子野数的控制、合理的优化策略及经济费用等方面,达到最优的治疗方案设计。

3.5 照射时间

接受精确放疗的患者需要保持特定体位,并维持一定时长。然而,过长的照射时间会增加患者的不适感,还可能因身体移动导致对治疗精准性的影响,某些情况下患者甚至不能坚持完成放疗。因此,在设计治疗方案时应当避免照射时间过长,尤其是对于老年患者或因为疼痛不能持久坚持的患者,减少子野数目和总跳数是一个有效的方法。通过计算调制强度/调制因子(总跳数除以单次处方剂量),可以直观评估治疗计划的复杂程度。另外,使用较高剂量率的放疗设备亦可缩短治疗时长。在采用这种方法时,建议将剂量率作为一个重要因素纳入考量^[46],例如:RapidArc 技术,能够以极快的速度完成 1 次放射治疗。临床医生可以与剂量师(或物理师)沟通,探讨是否适合采用该技术对特定患者进行治疗。结合患者临床症状(例如:总照射剂量不高、患者神志不清等),可以在确保安全性和疗效的前提下适度放宽适形度和计划质量的要求,采用较少数目适形野进行照射,以减轻患者治疗过程中的负担。

3.6 等中心设置

对于多个靶区(空间距离过大)或靶区过长(全中

枢照射)的情况,单一等中心放疗方案难以满足覆盖所有目标区域的需求。剂量师(或物理师)可以采用多等中心方法制定计划,但不同剂量师(或物理师)由于经验或考虑不同,在对等中心的设置上可能存在差异。临床医生要根据临床要求与剂量师(或物理师)沟通,确保多等中心的设置既能满足临床要求又能符合加速器物理限制。当不同等中心间存在射野边界衔接时,临床医生要检查衔接层面的合理性以及冷热点。当每个等中心作为单独计划进行优化制定时,要考虑计划间射野和剂量叠加问题。同时,有必要评估采用多等中心方案后对摆位误差和总治疗时间的影响,以及是否会影响在线影像的采集和配准精度。此外,在执行多等中心计划时,要注意等中心的命名,以确保整个治疗过程的清晰记录和精准实施。

4 靶区剂量覆盖

计划设计完成后,临床医生需要对治疗计划进行全面评估,确定治疗计划是否能够达到临床要求。为了获得理想的治疗计划,通常需要在治疗计划设计的过程中不断调整计划参数,实现覆盖靶区的最优剂量分布,同时降低 OAR 和正常组织剂量。目前的最常用方法是使用等剂量线和 DVH 来评估。审核任何一个放疗计划不能单独使用其中 1 种评估方法,推荐 DVH 评估后在 CT 定位图像上观察等剂量线分布与靶区及 OAR 的空间位置关系。

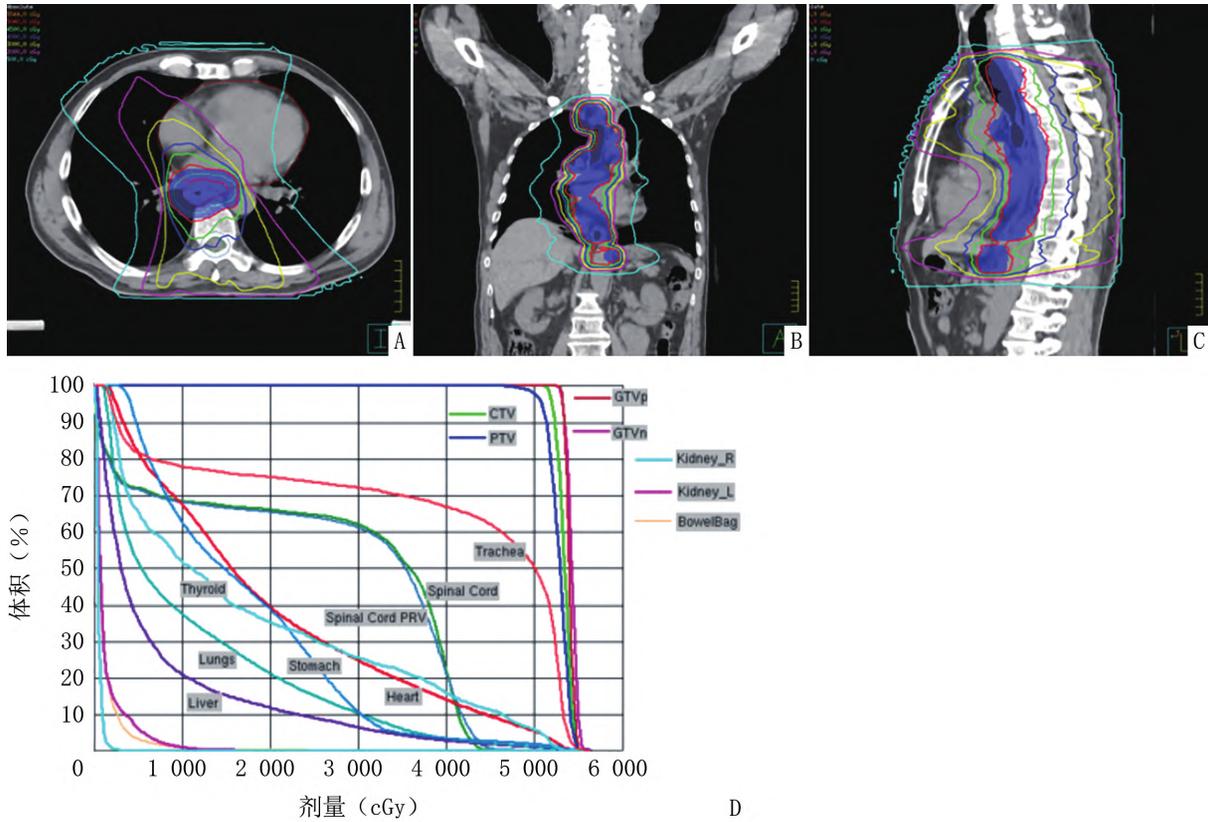
DVH 就是把各个结构的三维剂量分布反映到二维图表上,通常横轴表示剂量,纵轴表示体积或百分比。DVH 可以分为微分 DVH 和积分 DVH,微分 DVH 的纵轴代表接受了横轴所指示剂量的体积,积分 DVH 的纵轴代表等于或大于横轴指示剂量的体积或者百分体积。通常所说的 DVH 一般指积分 DVH。DVH 的横轴表示剂量时通常以绝对值的形式出现;纵轴表示体积,通常以相对百分数的形式出现,也可有以体积绝对值出现的情况。DVH 可以方便地显示出 PTV 是否足量,剂量均匀度是否合格。对于“并联型”的正常组织, DVH 能够显示出受照剂量的体积效应是否超标;对于“串联型”正常组织,能够显示出受照最大剂量是否在耐受剂量范围内。但是 DVH 不能给出冷点和热点的具体位置信息,需要在 CT 图像的水平面、矢状面、冠状面逐层评估三维剂量分布。在评估一个治疗计划时,首先通过 DVH 来考察方案是否满足限量指标要求。在此前提下,进一步深入分析水平面、矢状面和冠状面上每层的等剂量线分布情况,以判断靶区覆盖范围是否可接受。临床医生使用 DVH 评估计划时,会侧重于积分 DVH,评估内容包括 PTV 所达到处方剂量的体积百分比。一般达标标准为 95%,93%~95%为可接受范围,如果<93%则一般评估为不可接受。

等剂量线为剂量相同点的连线,等剂量线既可以在二维层面上显示,包括横断面、矢状面和冠状面,也可以在三维界面上显示。其表达方式既可以基于相对剂量的方式,也可以根据绝对剂量的方式显示,尤其当一个计划中包含多个阶段治疗计划时,用绝对剂量的方式显示更加科学便捷。由于剂量归一方式不同,建议医生使用绝对剂量的等剂量线进行评估。例如:针对处方剂量为 60 Gy 的计划,可以用 60 Gy 等剂量线检查覆盖靶区情况,同时也可以应用 Dose Color Wash 工具,利用色阶进行直观的绝对剂量的评估。剂量分布主要通过二维/三维等剂量曲线进行评估,在 CT 图像上逐层(二维)或在射野方向观/空间方向观界面(三维)观察等剂量线的分布,能够显示剂量分布的细节信息。其中,剂量分布的形状、范围,尤其是剂量冷热点出现的空间位置及范围,是临床医生非常关注的方面。冷点位置与范围和肿瘤的控制率密切相关,热点的位置与范围和放疗损伤密切相关。尽管等剂量线可以显示每个像素点的剂量线包围情况,但不能反映某个结构三维剂量分布的统计信息。图 8 为一个食管癌 IMRT 计划的横断面、冠状面、矢状面等剂量线分布特征。

处方剂量线需要包绕对应的 PTV,覆盖不到的 PTV 区域以及处方剂量线包绕的 PTV 之外的区域需要认真识别与评估,判断这些区域是否可能成肿瘤复发的高危部位。通常情况下,要求计划中处方剂量线覆盖>95%的 PTV 范围,从而满足覆盖 99%的 CTV 范围。如果处方剂量线不能覆盖 CTV 甚至 GTV 的范围,则可能导致肿瘤接受的治疗剂量不足,增加未控或复发的风险,此时应与物理师沟通对治疗计划进行必要的修改。同时,临床医生还需要关注重要 OAR 的剂量。以肺癌放疗计划设计为例,如处方剂量线覆盖心脏或正常肺组织范围过大,则需要进一步调整计划以减小不必要的损伤。在使用等剂量线评估时,放疗医师不但要关注处方剂量线,而且要了解不同百分比剂量的分布以及对 OAR 的影响,以使计划调整至最优,减少放疗损伤。另外,当 PTV 甚至 GTV 与 OAR 重叠时(如 PTV 涵盖部分脊髓),要对重叠区域的剂量做出恰当的评估。通过 CT 图像二维和三维界面,医生会常规性展示出 95%(93%)、100%、107%、110%和 115%等剂量线,并逐层评价等剂量线的形状。采用绝对剂量,例如肺癌给予 PTV 剂量为 60 Gy,医生评估计划通常需要显示出包括 69(115%,高剂量点)、60(处方剂量)、45、40、30、20 和 5 Gy(正常组织)的等剂量线,并逐层评价。最后,临床医生还需要了解高剂量点位置、PTV 内未达到处方剂量的位置(剂量冷点)、正常组织所受剂量的范围及空间分布等,以便全面、准确地评估整个放疗计划的质量与安全性。

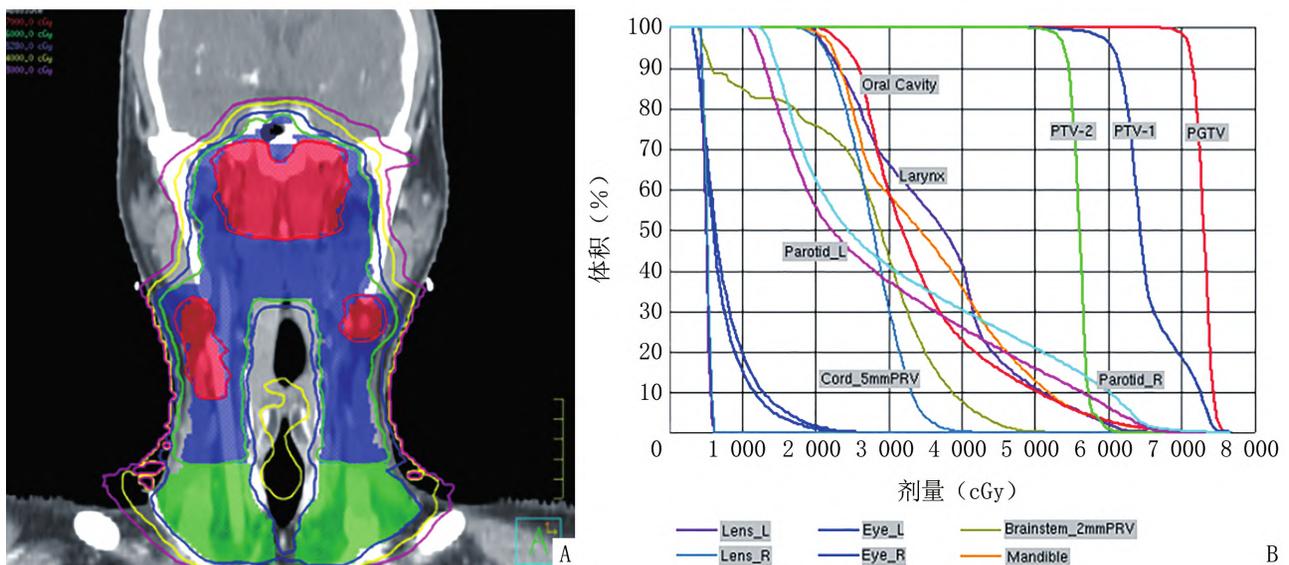
SIB 技术在头颈部及胸腹部恶性肿瘤放疗中得到广泛应用^[47-48],其主要优势是能够在同一计划内针对不同区域给予差异性剂量分配。例如:原发病灶 GTV 区域给予更高剂量以提高肿瘤控制率,而亚临床病灶 CTV 范围给予相对较低剂量,在不降低控制率的前提

下尽量减轻毒副作用。SIB 计划评估与常规 IMRT 计划评估类似,关键在于确认不同梯度处方剂量均能满足治疗需求。例如:在鼻咽癌治疗的 SIB 计划中(图 9),需详细审核各个靶区是否按预设剂量分布覆盖,并达到预期的治疗目标。



注:A.横断面;B.冠状面;C.矢状面;D.剂量体积直方图。

图 8 食管癌调强放疗计划的横断面、冠状面和矢状面等剂量线分布



注:A.冠状面;B.剂量体积直方图。

图 9 鼻咽癌靶区同步加量调强放疗计划的剂量线分布

5 剂量冷热点/异质性处理

靶区内最大剂量(D_{\max})、最小剂量(D_{\min})、平均剂量(D_{mean})、中位剂量(D_{median})、适形度和均匀度也是评估计划时常用的指标。 D_{mean} 为一定范围内(如 PTV 内)所有体素剂量的总和除以体素的个数; D_{median} 为所有体素剂量值从小到大排列,位置处于中间的剂量; D_{\min} 为所有体素剂量的最小值,通常评估靶区剂量时使用; D_{\max} 为所有体素剂量的最大值,通常评估正常组织受量时使用; V_x 为受照剂量不小于剂量 X_x 的体积; D_y 为体积为 Y_y 的体素受到的剂量值。应用绝对剂量线或 Dose Color Wash 工具,在 CT 图像的横断面、矢状面、冠状面逐层评估三维剂量分布,逐层判断冷热点和最高剂量点的位置和范围是否可以接受。冷热点的定义:热点为剂量 $>115\%$ 处方剂量的体素集合,所以评估常规分割计划时,靶区内 $\leq 115\%$ 处方剂量,理想计划一般要求 $\leq 110\%$;冷点为靶区内低于处方剂量点体素集合,通常应用 DVH 进行评估,最低剂量的体积如 DVH 99% 体积,相对应的剂量需要 $\geq 95\%$ 处方剂量^[49]。

剂量均匀度和适形度也是常用的计划评估指标之一,多用于同一病例的不同治疗计划的比较。剂量均匀性指数描述的是靶区体积内剂量分布的均匀性,计算方法为 $(D_{\max} - D_{\min}) / D_{\text{mean}}$;均匀性指数越趋近于 0,靶区剂量分布越均匀^[50]。剂量适形度描述的是剂量线与靶区的适形度,计算方法为 $(\text{PTV}100\% / \text{PTV}) \times (\text{PTV}100\% / V100\%)$,其中 PTV100% 为处方剂量与 PTV 交叠的体积, V100% 为处方剂量线覆盖的总体积, PTV 表示 PTV 自身的体积;适形度取值为 0~1,值越接近 1,靶区适形度越高^[51-52]。对于常规分割的 IMRT 计划,通常可以接受的 PTV 最低剂量为 95% 左右的处方剂量,可以接受的最大剂量为 115% 左右的处方剂量。在确定了冷点和热点的量化数值后,需要进一步确定冷点和热点的空间分布。相对于 OAR 内的热点, GTV 内的高剂量点是可以接受的。冷点、热点的分布需要审核其体积和位置。对于 IMRT 计划,适形度提高则可能剂量均匀性降低,相反,剂量均匀性提高则可能适形度降低。当二者兼顾时,可能会增加子野数目及跳数,从而增加照射时间和治疗计划设计的复杂性。适当增加射野数目或弧度有利于在保证靶区适形度的同时提高剂量均匀性,但在实施过程中需要评估其对正常组织器官造成的影响。

对于立体定向放射外科(stereotactic radiosurgery, SRS)和 SBRT,剂量均匀性评价会有所不同。关于 SBRT 或 SRS 说明如下。

(1)PTV:处方剂量应覆盖 $\geq 95\%$ 的 PTV 体积,

90% 的处方剂量应覆盖 $\geq 99\%$ 的 PTV 体积。

(2)GTV:处方剂量应覆盖全部的 GTV 体积。

(3)ITV(针对运动肿瘤):处方剂量应覆盖 $\geq 99\%$ 的 ITV 体积。

(4)热点:GTV/CTV 内部热点剂量允许在 110%~167%,处方剂量归一至 60%~90%;采用直线加速器治疗时,应控制在 1.4 倍处方剂量以下。超过处方剂量 105% 的热点应落在 PTV 内部。应逐层审查最大剂量点位置。

(5)适形度:[主观]逐层审查确定处方剂量线边缘应尽可能贴合 PTV;[客观]适形性指数 ≤ 1.2 (适形性指数 = 处方剂量线包绕的体积 / PTV 体积),如计划剂量限值难以满足,适形性指数可放宽至 1.5。

(6)靶区外剂量跌落:对于不同部位肿瘤 SBRT 计划,剂量跌落要求视肿瘤位置和体积情况由医师确定。例如, RTOG 3502 推荐肺癌 SBRT:[位置]距离 PTV 边缘任何方向 2 cm 以外的区域都不得大于给定的 $D_{2\text{cm}}$; [体积]50% 处方剂量所包绕的体积与 PTV 体积的之比不得大于给定的 R50%。

(7)若采用固定野照射,射野数目应 >10 个,且夹角不宜过小 ($\geq 20^\circ$)。非共面布野时,要注意碰撞风险和重要组织的避让。尽量采用高剂量率照射方式,在保证治疗效果的同时,有效缩短单次照射时间。

(8)照射方式:由于靶区形态比较规则,所有适形放疗、IMRT 及 VMAT 均可以采用,各放疗中心可根据自身的技术实力、设备配置及人员专业能力来灵活选择最适合的治疗方案。

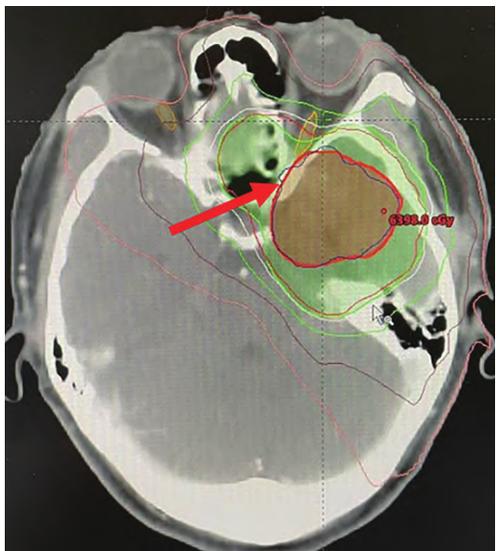
(9)其他问题:由于 SRS/SBRT 时靶区较小,建议采用更小层厚 (<2 mm) 扫描获得图像。

6 OAR 保护

理想的放疗计划需要遵循以下原则:(1)靶区内剂量梯度应最小,靶区外剂量应尽可能小,高剂量体积应当与靶区形状一致, OAR 的剂量应低于高概率引起损伤的剂量水平。(2)IMRT 计划由物理师和医师共同参与完成,物理师根据医生对靶区内剂量分布的要求,以及各 OAR 所受剂量的权重制定多个备选的治疗计划,分析每个计划的优势与局限性,最终得到一个理想的放疗方案。(3)理想的放疗计划要求对靶区有足量且均匀的剂量照射, OAR 的受照剂量不超过耐受剂量且尽量低。(4)“串联”器官应评价所接受的最大剂量,如脊髓、脑干等;“并联”器官则应评价所接受剂量占危及器官体积的比重等。(5)不同肿瘤部位所关注的 OAR 有所不同,通常靶区范围或照射范围内的 OAR 必须进行评估,同一 OAR 也要考虑其不同部位功能差异^[53-54]。

6.1 OAR 的限量评估原则和标准

OAR 的限制剂量推荐 ALAR 原则(尽可能低)。计划评估中,应首先确保所有 OAR 均按前述的国际共识精准勾画(图 10),并且根据不同的剂量分割模式,参考国际通用指南进行限量。



注:该患者视神经和视交叉未衔接,剂量线直接突出在未衔接处,导致视通路的高剂量(箭头所示)。

图 10 放疗计划中危及器官的规范勾画

尽管不同治疗中心的 OAR 限制标准可能略有差异,但常规分割的 OAR 剂量限制推荐参考正常组织效应定量分析(quantitative analysis of normal tissue effects in the clinic, QUANTEC)^[55],立体定向放疗分割方案的 OAR 限量推荐参考美国医学物理学家协会(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)TG101 报告^[56]和 Timmerman^[57]限量等。这些限量标准根据不同放疗部位及分割模式而异,临床上面对具体问题时须综合使用。需要注意的是,对于近几年国内比较流行的低大分割模式(分割次数 >10 次),目前尚无参考标准。

评估 OAR 受量前,应根据患者的个体化因素,包括年龄、合并症、一般功能状态、肿瘤负荷以及发展情况、既往抗肿瘤治疗方案以及当前放疗目的,综合权衡患者此次放疗的获益及可能的不良反应风险,对 OAR 进行合理的、可实施的评估,必要时进行适当调整。以肺癌为例,在制定放疗计划前应详细询问患者的具体情况,如是否高龄,功能状态是否良好,心肺功能如何,是否有其他严重合并症,本次病变是处于早期、局部晚期还是晚期,肿瘤负荷是否较大,既往是否行肺部手术,既往是否有药物治疗损伤,以及此次放疗是根治还是姑息,放疗是否联合化疗、靶向治疗及免疫治疗等。

随着抗肿瘤创新药物的持续上市,放疗前以及同步放疗药物的毒副作用是需要关注的问题^[13,58]。

6.2 OAR 权重的优先级

在对 OAR 进行评估前,应考虑不同器官以及相对于肿瘤组织的优先级别,特别要注意比肿瘤组织还重要的一级器官^[59],例如:头颈部的脑干、脊髓、视神经、视交叉,胸部的脊髓、双肺、心脏/大血管,腹部的脊髓、肝、肾、肠等。当计划比较复杂时,可以根据器官的优先等级进行综合评估。

6.3 多维度评估

在实际放疗计划评估过程中,推荐 DVH 和定位 CT 每层图像上 OAR 的剂量均同样重要。DVH 可提供一维、二维的剂量度量,如一维剂量度量为接受一定剂量照射的器官体积或一定体积的照射剂量,二维剂量度量为 DVH 曲线上点代表剂量或体积的绝对值(Gy/cc)和相对值(%)。DVH 不能提供剂量的三维空间分布,而定位 CT 上的三维图像可以显示某等剂量线相对于 OAR 的空间分布。需要注意的是,对于脑、肝、肺等组织评估时,若肿瘤与上述器官有重叠,需要标注是否扣除肿瘤的体积(GTV 或 CTV 等)。

6.4 超量时分析

当 OAR 出现超量时,需要注意超量的具体范围以及超量剂量程度(热点的体积和剂量)。对于“串联”器官(脑干、脊髓、肠道、膀胱等),需要注意热点的剂量,如 D_{max} 等;对于“并联”器官(肝、肺等),需要注意热点的范围,如 V_{20} 或者 D_{mean} 等;对于混合器官(心脏、肾脏等),需要同时注意热点的范围和剂量,包括 D_{max} 和 D_{mean} 等^[33]。

在实际放疗过程中,无论靶区剂量如何优化都无法避免正常器官有不同程度的超量照射。由于 OAR 放射损伤的发生率取决于分割剂量、受照射体积以及照射区域,出现超量时,应根据不同正常器官放射生物学特点具体分析。

6.5 计划评估过程中常见的特殊情况

6.5.1 放疗中自适应计划 对原发病灶较大的肿瘤,如肺癌、鼻咽癌、宫颈癌等,随着放疗的进行,肿瘤会逐渐缩小,此时应及时调整靶区,从而进一步降低正常组织高量区的照射范围^[60]。推荐将修改后的靶区和 OAR 重新设计计划,理论上根据剩余治疗计划的处方剂量,对后期放疗计划的 OAR 按照剩余剂量进行重新限量,对二程计划进行形变配准融合后总体评估。

6.5.2 放疗中断后恢复治疗的再评估 患者在治疗期间因多种情况出现治疗中断,长时间的中断,需要考虑补充处方剂量来抵消中断放疗对治疗疗效的影响。临床上常用名义标准剂量-时间剂量分次数(nominal standard dose-time dose fractionation, NSD-TDF)和

生物效应剂量(biological effective dose, BED)方法,计算放疗中断后的补充剂量。对于 OAR 来说,需要将二程计划进行形变配准合并,评估合并后的计划是否满足要求。

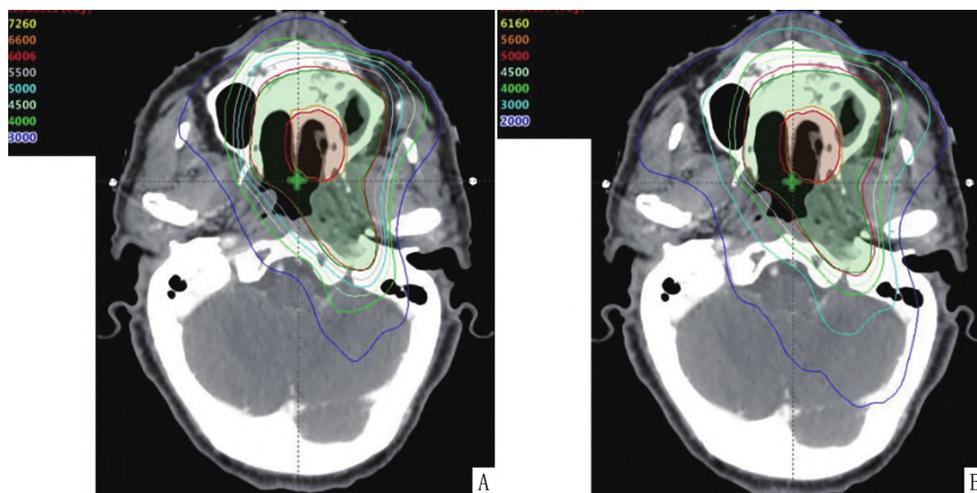
6.5.3 二程放疗 若肿瘤放疗方案包括二程计划,必须在制定第 1 程计划时,就需要将第 2 程计划同时设计好,推荐第 1 程和第 2 程计划合并后进行肿瘤和 OAR 整体评估。例如:RTOG 脑胶质瘤靶区勾画中,第 1 程计划 46 Gy,第 2 程计划 16 Gy,计划评估时需要将第 1 程和第 2 程计划合并进行计划评估。

6.5.4 再程放疗 随着肿瘤控制延长,再程放疗使用逐渐增加。在实施再次放疗前,必须仔细分析首程放疗的照射范围及剂量分布,谨慎评估首程放疗后不同器官的晚期损伤。对于再程放疗而言,推荐参照发表

的关于再程放疗中正常器官耐受剂量的研究结果来设定剂量限制标准,如鼻咽癌局部复发的 IMRT 国际建议提供了此类参考依据。但整体而言,尚需要更多研究结果以完善这一领域内的实践指南与决策制定。

6.6 非常规总剂量计划评估

目前常规分割模式下,对正常组织的限制剂量是基于标准治疗总剂量作出的推荐。例如:局部晚期头颈部鳞状细胞癌的常规照射总剂量为 70 Gy,头颈部正常器官的剂量也由此而限定。然而,在临床实际操作中,如需要做术前放疗 50 Gy 照射时,则推荐正常器官的限制剂量需要做一定程度的调整。同样的,对于头颈部自然杀伤细胞/T 细胞淋巴瘤,处方剂量是 50 Gy 时,也需要做适应性的限制剂量调整。见图 11。



注:A.鼻腔 NK/T 细胞淋巴瘤(处方剂量:95% PGTVP 56 Gy,2.24 Gy/次,共 25 次;95% PTV1 50 Gy,2 Gy/次,共 25 次);B.鼻腔鳞状细胞癌(处方剂量:95%PGTVtb 66 Gy,2.2 Gy/次,共 30 次;95% PTV1 60 Gy,2 Gy/次,共 30 次);2 个不同总剂量正常组织耐受剂量是一样的,本共识建议应严格限制图 A 中正常组织剂量。

图 11 非常规总剂量照射的计划评估

6.7 儿童肿瘤放疗的评估

儿童与成人的限量标准存在本质上的差异,约 67.6%的儿童肿瘤患者在治疗期间会出现与治疗相关的致残或危及生命的远期并发症,所以需要谨慎评估儿童放疗后可能出现的不良反应。已有文献报道儿童肿瘤放疗剂量相关远期并发症的研究进展,系统回顾了儿童生理各个系统在接受放疗后出现的远期并发症及其“剂量-体积”参数,现阶段可作为评估儿童放疗计划的参考^[61]。

7 计划评估标准

权衡取舍存在于整个放疗过程中,从模拟定位时患者如何摆位开始,放疗医生就应该权衡患者的绝对获益和相对获益,以最大限度降低正常组织的损伤。例如:

直肠癌术前放疗患者选择俯卧可以更好地保护小肠不受辐射影响;左侧乳腺癌患者采用吸气屏气方式以降低心脏照射剂量;口腔癌放疗患者选择开口器可以更好保护正常口腔等。另外,在靶区勾画时,当 OAR 与肿瘤组织重叠,特别是涉及 I 级器官时,可适当缩小 CTV 到 PTV 的外放范围^[62],同时采用更严格、更精准的图像引导。例如:在鼻咽癌原发肿瘤临近脑干时,CTV 和 PTV 甚至可以贴临,同时在图像验证选择时,增加图像引导的次数以及选择 CT 甚至 MR 引导。但如肿瘤组织与 II 级甚至 III 级器官相邻接时,靶区勾画可不做过多限制修饰。权衡取舍的艺术在放疗计划评估时才能得到最充分的体现,需要根据治疗目的、放疗风险获益比以及肿瘤组织和不同 OAR 的优先级而有所取舍,代表了放疗

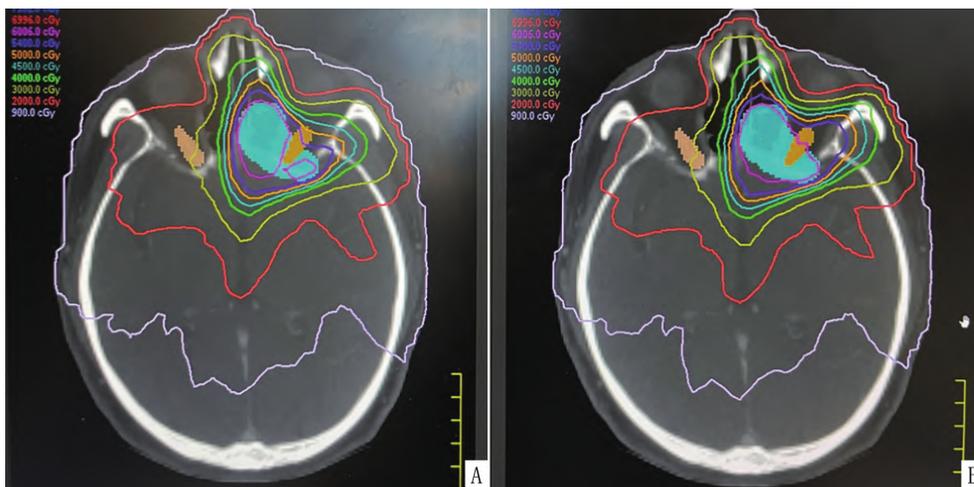
医生综合考虑后的决定。

在放疗计划评估中, 权衡取舍的整体原则体现在对不同组织的优先级排序上。首先确保的是 I 级器官, 如脑干、脊髓、视通路等; 其次是肿瘤 (一般作为 II 级器官); 最后其他的 II 和 III 级器官。但在根治性放疗方案设计中, 可适当提高 I 级器官的限制剂量; 相反, 在姑息放疗包括转移瘤的立体定向放疗中, 一定要以 I 级器官甚至所有 OAR 的安全为首选^[63]。例如: 对于鼻咽癌患者, 如果脑干 PRV 最大剂量 > 60 Gy, 但放疗是根治目的时, 可以适当放宽脑干的限制剂量, 但目前没有具体标准, 可参考高水平医院的回顾性治

疗经验(图 12)^[64]; 如果放疗是高姑息为目的时, 可适当降低放疗剂量。然而, 当正常腮腺组织剂量超量时, 推荐以肿瘤靶区得到充分的等剂量线包绕为首选。

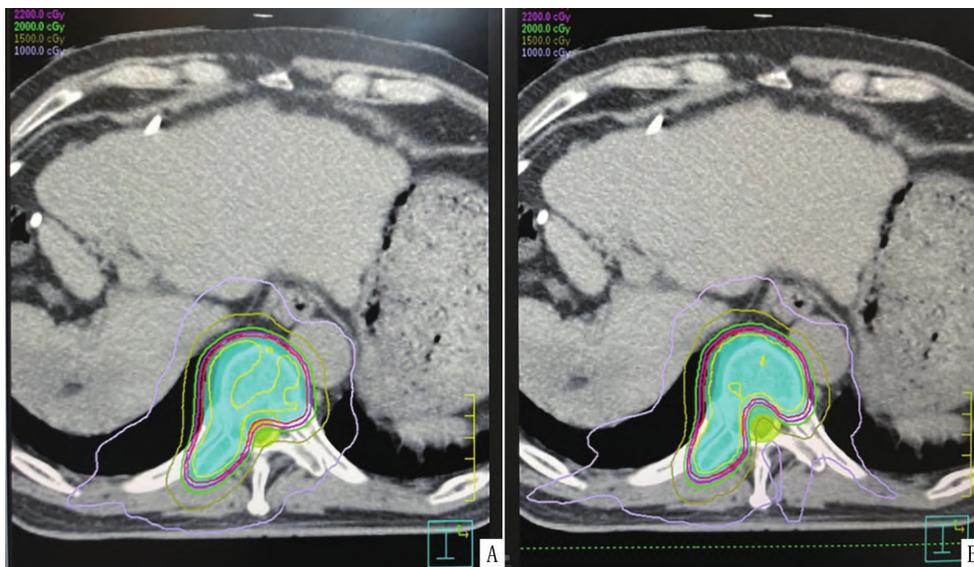
对于寡转移患者, 采用立体定向放疗时, 根据 SABR-5 研究^[65], 推荐以正常器官的安全为主, 必要时可适当降低肿瘤靶区的照射剂量。见图 13。

若放疗计划经上述建议仍难以权衡时, 可以尝试其他方案。例如: 联合其他治疗降低放疗强度; 根据放疗中肿瘤退缩进行自适应调整等; 更换照射射线限制, 如采用质子或者重离子。必要时可采用其他治疗方案来代替放疗。



注: A. 适当放开视神经剂量 D_{max} 56 Gy, PTV1 处方剂量欠缺, 但 PGTVnx 处方剂量满足; B. 完全满足 PGTVnx 和 PTV1 处方剂量, 视神经剂量 D_{max} 62 Gy。本共识建议可选择图 A 计划。

图 12 鼻咽癌肿瘤临近视神经的放疗计划



注: A. 满足肿瘤处方剂量 (24 Gy/3 次), 但脊髓超量; B. 满足脊髓限量, 但肿瘤处方剂量不满足。本共识推荐图 B 计划。

图 13 骨转移立体定向体部放疗计划

8 处方剂量

确定处方剂量的分割剂量、分割次数和总剂量,由于 TPS 一般设置是物理剂量,剂量师可能会误将 7 Gy×9 次编辑成 9 Gy×7 次,而此时总处方剂量是一样的,这在等剂量线分布及 DVH 上也不会显示出差异,因此需要格外注意。同时注意 cGy 和 Gy,当单次剂量>10 Gy,尤其需要注意。治疗的一些细节也必须重新确认,包括射线的类型、能量、实施技术(三维适形放疗、IMRT)和照射时间表(确定每日照射、隔日照

射、超分割放疗等)。

9 确认

在进行多计划对比时,确认最后通过的计划是经过放疗医生认可的方案。本共识凝练了 51 项核心放疗计划评估要点,并结合这些要点对国内多家医疗机构的放疗医生进行了问卷调查。参与此次调研的共有 327 名高级职称的放疗医生和放射物理师。推荐意见分为“强烈推荐”“有条件推荐”“弱推荐”“不推荐”和“不确定”5 个等级,推荐程度见表 4。

表 4 放疗医生评估放疗计划的问卷调查结果

序号	共识项目名称	问卷内容	推荐程度(%)				
			强推荐	有条件推荐	弱推荐	不推荐	不确定
1	核对	(1)定位图像名字、时间、部位以及照射部位的左右侧等是否正确?扫描图像是否完整?	94.20	4.78	1.02	0	0
		(2)定位扫描图像(包括肿瘤和 OAR)是否完整?	98.29	1.03	0.68	0	0
		(3)多模态影像融合以及图像融合方向性是否准确?	56.31	41.98	1.71	0	0
		(4)靶区和 OAR 是否最终在定位 CT 图像上进行勾画?	90.11	8.19	0.68	1.02	0
		(5)特殊情况下,如需要放置皮肤填充物,确定是否合理放置?	78.50	19.79	1.37	0.34	0
		(6)特殊情况下,如靶区内或重要 OAR 内置钛合金股骨造成较大面积的金属伪影,计划 CT 是否校正了金属伪影?	50.85	47.11	1.36	0	0.68
		(7)特殊情况下,如有影响肿瘤剂量运算的较大体积造影剂(上消化肿瘤放疗时胃内大量造影剂或前列腺癌放疗时膀胱内大量造影剂),是否用水替换?	47.11	43.34	7.51	1.02	1.02
2	靶区勾画	(1)靶区命名是否标准化?	79.18	18.43	2.05	0.34	0
		(2)肿瘤靶区和 OAR 勾画是否在合适的窗宽和窗位下进行?	85.32	12.97	1.37	0.34	0
		(3)GTV 勾画是否充分结合多模态影像勾画包括诊断 CT、MR、PET/CT、内镜等?	68.26	30.38	1.02	0.34	0
		(4)CTV 是否按照解剖屏障(如骨、心脏、大血管等)进行修回?	82.94	14.68	1.36	0.34	0.68
		(5)是否考虑肿瘤运动而设定内靶区,并确认内靶区外放是否与相应的呼吸管理模式相匹配?	54.61	43.69	1.02	0.34	0.34
		(6)PTV 外放是否根据相应肿瘤中心的设备精度(如 MRI 加速器、Cyber 刀等)、人员技术水平、图像引导放疗方式(如锥形束 CT、二维平片)进行综合考虑?	73.72	24.57	1.37	0.34	0
		(7)是否在水平面、矢状面和冠状面全面审核肿瘤靶区勾画的准确性和完整性?	88.75	9.89	1.02	0.34	0
		(8)是否在水平面、矢状面和冠状面全面审核 OAR 勾画完整性和准确性?	77.82	19.11	2.39	0.68	0
		(9)是否在水平面、矢状面和冠状面全面审核 OAR 无意义勾画点?	64.85	26.62	7.51	1.02	0
3	射野设置	(1)照射技术、入射角度及数量的选择是否合理?例如:①在进行胸部或颈部放疗时,必须确定射线不经过肩膀或者不必要的口腔组织,或避免对结直肠的造口、射线敏感器官的直接照射;②有无避开金属植入物,如心脏起搏器;③食管癌或淋巴瘤放疗,IMRT 或 VMAT 中射野数目过多及照射覆盖范围较大会造成肺的低剂量体积增大,这种情况下需要减少射野数目和减小射野夹角或入射角度以前后野为主,而螺旋断层放疗计划需要设置必要的 Block	82.94	15.70	1.02	0	0.34
		(2)射野或者拉弧的数量是否考虑对于治疗时间的影响,计划总跳数是否过多(例如:某些患者不能长时间保持体位,考虑不应用复杂放疗技术如 IMRT 等)?射野或者拉弧的数量是否考虑患者经济费用?	53.24	43.01	3.07	0	0.68
4	剂量覆盖	(1)是否在 CT 图像的水平面、矢状面、冠状面逐层评估三维剂量分布?	86.01	12.63	1.36	0	0
		(2)处方剂量覆盖不到的 PTV 区域甚至 CTV 或 GTV 是否是肿瘤容易复发的部位?	86.68	9.91	0.68	1.02	1.71
		(3)处方剂量包绕的 PTV 之外的区域是否落在重要 OAR 上?	90.11	5.80	1.36	2.39	0.34
		(4)是否使用处方剂量绝对剂量的等剂量线或应用 Dose Color Wash 工具进行绝对剂量的评估?	61.09	35.49	1.71	0	1.71
		(5)DVH 处方剂量的靶区体积覆盖率是否≥95%?	79.52	18.09	2.05	0	0.34
		(6)对于 SIB 技术,是否核定了不同梯度处方剂量满足计划需求?	73.72	23.55	0.68	0	2.05
5	剂量冷热点	(1)PTV 内是否存在冷点?最低剂量的体积如 DVH 99% 体积,相对应的剂量≥95% 处方剂量	79.86	17.07	2.73	0.34	0
		(2)是否审核各梯度的等剂量曲线分布的形状?	68.61	26.96	4.09	0.34	0
		(3)PTV 内是否存在热点?最高剂量>115%(或 110%)处方剂量	75.43	19.13	3.75	1.36	0.34
		(4)PTV 内高剂量点的空间位置是否落在肿瘤内,而非重要 OAR 上?	92.84	6.49	0.68	0	0
		(5)PTV 以外高剂量点的空间位置是否落在重要 OAR 上?	88.74	6.83	0.34	3.75	0.34
6	OAR 保护	(1)OAR 评估时,有无按照相应的分割模式进行评价?如 SBRT 剂量限制不应参考常规分割去评价	90.45	8.53	0.34	0	0.68

续表

序号	共识项目名称	问卷内容	推荐程度(%)				
			强推荐	有条件推荐	弱推荐	不推荐	不确定
7	权衡取舍	(2)OAR 评估时,常规分割方案有无参考 QUANTEC 标准或相应的临床研究?大分割方案有无参考 AAPM TG-101、Timmerman R 等推荐标准?儿童患者有无参考儿童的 OAR 限制剂量?	84.98	14.68	0	0	0.34
		(3)OAR 评估时,有无综合考虑患者情况、肿瘤负荷和发展动态、既往肿瘤治疗疗效和毒性,以及此次放疗目的和联合方案?	86.01	13.65	0.34	0	0
		(4)有无在水平面、矢状面、冠状面上每层评估,以及 DVH 三维维度上评估 OAR 受量?	69.63	29.35	1.02	0	0
		(5)肿瘤和 OAR 有重叠时,评估时有无明确是否扣除 GTV 或者 CTV?例如:肺癌或肝癌放疗计划评估正常肺或肝脏剂量时,需确认有无扣除肿瘤 GTV 或 CTV	81.57	16.38	1.71	0	0.34
		(6)OAR 超量时,有无具体分析超量位置、超量的程度和范围?	81.23	17.41	1.02	0.34	0
		(7)再程放疗,是否考虑剂量叠加或融合?	86.01	13.31	0.68	0	0
		(1)有无区分 OAR 优先等级?例如:脊髓、脑干、视通路、十二指肠、小肠等作为 I 级器官,重要性超过肿瘤	80.21	18.43	0.68	0.34	0.34
		(2)肿瘤剂量不能下降时,有无可能将 I 级器官(例如脑干、肺、十二指肠、小肠)的限制剂量适当放宽,提高肿瘤剂量?但需要谨慎使用	50.86	39.25	6.48	3.07	0.34
		(3)靶区勾画时,肿瘤贴临 I 级器官,CTV 外放时有无不同于常规要求?例如:CTV 和 PTV 甚至可以贴临	61.10	34.81	2.73	1.02	0.34
		(4)图像验证,肿瘤贴临 I 级器官时,有无考虑采用更严格、更精准的图像引导技术?例如:多次图像引导、MRI 引导等	57.68	40.61	1.37	0	0.34
8	处方	(5)姑息放疗,特别是转移病灶立体定向体部放疗时,有无考虑到 OAR 是第 1 位,重要性超过肿瘤?	67.92	26.29	4.09	0.68	1.02
		(6)上述方法仍无法获得满意计划时,有无考虑尝试降低放疗强度(减少放疗剂量、缩小靶区等)、放疗中尝试再程计划、更换照射技术,更换设备,或采用其他治疗方式代替放疗等?	66.21	31.40	1.71	0	0.68
		(1)确定单次剂量、分割次数及总剂量,注意大分割放疗时单次剂量与分割次数是否混淆?	93.52	5.80	0	0.68	0
		(2)确定是隔日照射还是每日照射,或超分割放疗?	86.01	13.31	0.68	0	0
9	确认	多计划对比时,是否确认最后通过的计划是放疗医生认可的计划?	92.49	7.51	0	0	0

注:OAR. 危及器官;GTV. 肿瘤区;CTV. 临床靶区;PTV. 计划靶区;IMRT. 调强放疗;VMAT. 旋转容积逆向调强放疗;DVH. 计量体积直方图;SIB. 同步增量;AAPM. 美国医学物理学家协会。

结语

尽管人工智能技术在放疗计划评估领域取得了显著进步,但放疗计划评估仍然是放疗医生临床实践中的核心组成部分。基于这一认识,在全国多个权威放疗中心专家团队的共同努力下,制定了本版关于放疗计划评估的中国专家的共识,以期为临床放疗医生提供参考,从而更为精准和高效地制定和评估放疗计划。

本共识编写委员会专家名单

顾问

- 于金明 山东省肿瘤防治研究院(山东省肿瘤医院)放疗科,山东第一医科大学(山东省医学科学院)
- 陈明 中山大学肿瘤防治中心放疗科
- 王淑莲 国家癌症中心,国家肿瘤临床医学研究中心,中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科
- 林勤 厦门大学附属第一医院放疗科

专家组成员(按姓氏拼音排列)

- 陈进琥 山东省肿瘤防治研究院(山东省肿瘤医院)放射物理技术科,山东第一医科大学(山东省医学科学院)
- 董鑫哲 山东大学齐鲁医院放疗科
- 胡伟刚 复旦大学附属肿瘤医院放疗中心,复旦大学上海医学

院肿瘤学系,上海市放射肿瘤学重点实验室,上海市放疗治疗临床医学研究中心

- 蒋胜鹏 天津医科大学肿瘤医院放疗科,国家恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市肿瘤防治重点实验室
- 刘彦伟 首都医科大学附属北京天坛医院放疗科
- 刘志凯 中国医学科学院北京协和医院放疗科
- 门阔 国家癌症中心,国家肿瘤临床医学研究中心,中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科
- 彭佳元 复旦大学附属肿瘤医院放疗中心,复旦大学上海医学院肿瘤学系,上海市放射肿瘤学重点实验室,上海市放疗治疗临床医学研究中心
- 王奇峰 四川省肿瘤医院放疗科,四川省癌症防治中心,电子科技大学附属肿瘤医院
- 王孝深 复旦大学附属耳鼻喉科医院放疗科
- 杨镕 湖南省肿瘤医院,中南大学湘雅医学院附属肿瘤医院放疗科
- 岳金波 山东省肿瘤防治研究院(山东省肿瘤医院)腹部放疗一病区,山东第一医科大学(山东省医学科学院)
- 张焯 国家癌症中心,国家肿瘤临床医学研究中心,中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科
- 章文成 天津医科大学肿瘤医院放疗科,国家恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市肿瘤防治重点实验室

志谢 感谢上海泰和诚肿瘤医院林琳教授提供图 1:去金属伪影技术重建前后 CT 平扫图像

利益冲突 无

参考文献

- [1] Wright JL, Yom SS, Awan MJ, et al. Standardizing normal tissue contouring for radiation therapy treatment planning; an ASTRO consensus paper[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2019, 9(2): 65-72.
- [2] Brouwer CL, Steenbakkers RJHM, Bourhis J, et al. CT-based delineation of organs at risk in the head and neck region; DAHANCA, EORTC, GORTEC, HKNPCSG, NCIC CTG, NCRI, NRG Oncology and TROG consensus guidelines[J]. *Radiother Oncol*, 2015, 117(1): 83-90.
- [3] Miller JA, Balagamwala EH, Angelov L, et al. Stereotactic radiosurgery for the treatment of primary and metastatic spinal sarcomas[J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2017, 16(3): 276-284.
- [4] Konopka-Filippow M, Sierko E, Hempel D, et al. The learning curve and inter-observer variability in contouring the hippocampus under the hippocampal sparing guidelines of radiation therapy oncology group 0933[J]. *Curr Oncol*, 2022, 29(4): 2564-2574.
- [5] Kao J, Darakchiev B, Conboy L, et al. Tumor directed, scalp sparing intensity modulated whole brain radiotherapy for brain metastases[J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2015, 14(5): 547-555.
- [6] Scoccianti S, Detti B, Gadda D, et al. Organs at risk in the brain and their dose-constraints in adults and in children: a radiation oncologist's guide for delineation in everyday practice[J]. *Radiother Oncol*, 2015, 114(2): 230-238.
- [7] Pacholke HD, Amdur RJ, Schmalfluss IM, et al. Contouring the middle and inner ear on radiotherapy planning scans[J]. *Am J Clin Oncol*, 2005, 28(2): 143-147.
- [8] Feng FY, Kim HM, Lyden TH, et al. Intensity-modulated radiotherapy of head and neck cancer aiming to reduce dysphagia; early dose-effect relationships for the swallowing structures[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 68(5): 1289-1298.
- [9] Christianen ME, Langendijk JA, Westerslaan HE, et al. Delineation of organs at risk involved in swallowing for radiotherapy treatment planning[J]. *Radiother Oncol*, 2011, 101(3): 394-402.
- [10] Rosenthal DI, Fuller CD, Barker JL Jr, et al. Simple carotid-sparing intensity-modulated radiotherapy technique and preliminary experience for T1-2 glottic cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 77(2): 455-461.
- [11] Freedman L, Sidani C. A radiation oncologist's guide to contour the parotid gland[J/OL]. *Pract Radiat Oncol*, 2016, 6(6): e315-e317 [2023-12-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27686591/>. DOI: 10.1016/j.prro.2016.05.003.
- [12] Hall WH, Guiou M, Lee NY, et al. Development and validation of a standardized method for contouring the brachial plexus; preliminary dosimetric analysis among patients treated with IMRT for head-and-neck cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(5): 1362-1367.
- [13] Kong FM, Ritter T, Quint DJ, et al. Consideration of dose limits for organs at risk of thoracic radiotherapy: atlas for lung, proximal bronchial tree, esophagus, spinal cord, ribs, and brachial plexus[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 81(5): 1442-1457.
- [14] Nielsen MH, Berg M, Pedersen AN, et al. Delineation of target volumes and organs at risk in adjuvant radiotherapy of early breast cancer; national guidelines and contouring atlas by the Danish Breast Cancer Cooperative Group[J]. *Acta Oncol*, 2013, 52(4): 703-710.
- [15] Small W Jr, Bosch WR, Harkenrider MM, et al. NRG Oncology/ RTOG Consensus guidelines for delineation of clinical target volume for intensity modulated pelvic radiation therapy in postoperative treatment of endometrial and cervical cancer; an update[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2021, 109(2): 413-424.
- [16] Feng M, Moran JM, Koelling T, et al. Development and validation of a heart atlas to study cardiac exposure to radiation following treatment for breast cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 79(1): 10-18.
- [17] Duane F, Aznar MC, Bartlett F, et al. A cardiac contouring atlas for radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2017, 122(3): 416-422.
- [18] Lorenzen EL, Taylor CW, Maraldo M, et al. Inter-observer variation in delineation of the heart and left anterior descending coronary artery in radiotherapy for breast cancer: a multi-centre study from Denmark and the UK[J]. *Radiother Oncol*, 2013, 108(2): 254-258.
- [19] Lee J, Hua KL, Hsu SM, et al. Development of delineation for the left anterior descending coronary artery region in left breast cancer radiotherapy; an optimized organ at risk[J]. *Radiother Oncol*, 2017, 122(3): 423-430.
- [20] Jabbour SK, Hashem SA, Bosch W, et al. Upper abdominal normal organ contouring guidelines and atlas; a Radiation Therapy Oncology Group consensus[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2014, 4(2): 82-89.
- [21] Brooks C, Hansen VN, Riddell A, et al. Proposed genitalia contouring guidelines in anal cancer intensity-modulated radiotherapy[J]. *Br J Radiol*, 2015, 88(1051): 20150032.
- [22] Gay HA, Barthold HJ, O'Meara E, et al. Pelvic normal tissue contouring guidelines for radiation therapy; a Radiation Therapy Oncology Group consensus panel atlas[J/OL]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(3): e353-e362 [2023-12-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22483697/>. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2012.01.023.
- [23] Yi SK, Mak W, Yang CC, et al. Development of a standardized method for contouring the lumbosacral plexus; a preliminary dosimetric analysis of this organ at risk among 15 patients treated with intensity-modulated radiotherapy for lower gastrointestinal cancers and the incidence of radiation-induced lumbosacral plexopathy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(2): 376-382.
- [24] Hunte SO, Clark CH, Zyuzikov N, et al. Volumetric modulated arc therapy (VMAT): a review of clinical outcomes-what is the clinical evidence for the most effective implementation? [J]. *Br J Radiol*, 2022, 95(1136): 20201289.

- [25] Doornaert P, Verbakel WFAR, Bieker M, et al. RapidArc planning and delivery in patients with locally advanced head-and-neck cancer undergoing chemoradiotherapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 79(2): 429-435.
- [26] Fogliata A, Cozzi L, Clivio A, et al. Preclinical assessment of volumetric modulated arc therapy for total marrow irradiation [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 80(2): 628-636.
- [27] Clark GM, Popple RA, Young PE, et al. Feasibility of single-isocenter volumetric modulated arc radiosurgery for treatment of multiple brain metastases [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(1): 296-302.
- [28] Popescu CC, Olivetto IA, Beckham WA, et al. Volumetric modulated arc therapy improves dosimetry and reduces treatment time compared to conventional intensity-modulated radiotherapy for locoregional radiotherapy of left-sided breast cancer and internal mammary nodes [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(1): 287-295.
- [29] Nicolini G, Ghosh-Laskar S, Shrivastava SK, et al. Volumetric modulation arc radiotherapy with flattening filter-free beams compared with static gantry IMRT and 3D conformal radiotherapy for advanced esophageal cancer: a feasibility study [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(2): 553-560.
- [30] Mashhour K, Abdelghany H, Mounir A, et al. 3D-CRT versus RapidArc in deep tempero-parietal high grade gliomas: do we really need higher technology? [J]. *Asian Pac J Cancer Prev*, 2022, 23(6): 2169-2176.
- [31] Vieillot S, Azria D, Riou O, et al. Bilateral kidney preservation by volumetric-modulated arc therapy (RapidArc) compared to conventional radiation therapy (3D-CRT) in pancreatic and bile duct malignancies [J]. *Radiat Oncol*, 2011, 6: 147.
- [32] Wang D, Yang Y, Zhu J, et al. 3D-conformal RT, fixed-field IMRT and RapidArc, which one is better for esophageal carcinoma treated with elective nodal irradiation [J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2011, 10(5): 487-494.
- [33] Hodapp N. [The ICRU Report 83: prescribing, recording and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)] [J]. *Strahlenther Onkol*, 2012, 188(1): 97-99.
- [34] Onal C, Arslan G, Parlak C, et al. Comparison of IMRT and VMAT plans with different energy levels using Monte-Carlo algorithm for prostate cancer [J]. *Jpn J Radiol*, 2014, 32(4): 224-232.
- [35] Pirzkall A, Carol MP, Pickett B, et al. The effect of beam energy and number of fields on photon-based IMRT for deep-seated targets [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2002, 53(2): 434-442.
- [36] Pasler M, Georg D, Wirtz H, et al. Effect of photon-beam energy on VMAT and IMRT treatment plan quality and dosimetric accuracy for advanced prostate cancer [J]. *Strahlenther Onkol*, 2011, 187(12): 792-798.
- [37] Lee TF, Yang J, Wu CS, et al. Radiation oncology and medical physics [J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015: 297158.
- [38] Popescu CC, Olivetto I, Patenaude V, et al. Inverse-planned, dynamic, multi-beam, intensity-modulated radiation therapy (IMRT): a promising technique when target volume is the left breast and internal mammary lymph nodes [J]. *Med Dosim*, 2006, 31(4): 283-291.
- [39] Coselmon MM, Moran JM, Radawski JD, et al. Improving IMRT delivery efficiency using intensity limits during inverse planning [J]. *Med Phys*, 2005, 32(5): 1234-1245.
- [40] Yeh HP, Huang YC, Wang LY, et al. Helical tomotherapy with a complete-directional-complete block technique effectively reduces cardiac and lung dose for left-sided breast cancer [J]. *Br J Radiol*, 2020, 93(1108): 20190792.
- [41] Ito M, Shimizu H, Aoyama T, et al. Efficacy of virtual block objects in reducing the lung dose in helical tomotherapy planning for cervical oesophageal cancer: a planning study [J]. *Radiat Oncol*, 2018, 13(1): 62.
- [42] Georg D, Julia F, Briot E, et al. Dosimetric comparison of an integrated multileaf-collimator versus a conventional collimator [J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42(11): 2285-2303.
- [43] Meshram MN, Pramanik S, Ranjith CP, et al. Dosimetric properties of equivalent-quality flattening filter-free (FFF) and flattened photon beams of Versa HD linear accelerator [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(3): 358-370.
- [44] Sasaki M, Tominaga M, Kamomae T, et al. Influence of multi-leaf collimator leaf transmission on head and neck intensity-modulated radiation therapy and volumetric-modulated arc therapy planning [J]. *Jpn J Radiol*, 2017, 35(9): 511-525.
- [45] Lydon JM. Theoretical and experimental validation of treatment planning for narrow MLC defined photon fields [J]. *Phys Med Biol*, 2005, 50(11): 2701-2714.
- [46] Grigorov GN, Chow JCL, Barnett RB. Dosimetry limitations and a dose correction methodology for step-and-shoot IMRT [J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(3): 637-652.
- [47] Butler EB, Teh BS, Grant WH 3rd, et al. Smart (simultaneous modulated accelerated radiation therapy) boost: a new accelerated fractionation schedule for the treatment of head and neck cancer with intensity modulated radiotherapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1999, 45(1): 21-32.
- [48] Dogan N, King S, Emami B, et al. Assessment of different IMRT boost delivery methods on target coverage and normal-tissue sparing [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2003, 57(5): 1480-1491.
- [49] He DF, Ma D, Jin E. Dynamic MRI-derived parameters for hot and cold spots: correlation with breast cancer histopathology [J]. *J BUON*, 2012, 17(1): 57-64.
- [50] Kataria T, Sharma K, Subramani V, et al. Homogeneity index: an objective tool for assessment of conformal radiation treatments [J]. *J Med Phys*, 2012, 37(4): 207-213.
- [51] Knöös T, Kristensen I, Nilsson P. Volumetric and dosimetric evaluation of radiation treatment plans: radiation conformity index [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1998, 42(5): 1169-1176.
- [52] Feuvret L, Noël G, Mazon JJ, et al. Conformity index: a review [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 64(2): 333-342.
- [53] Lu Y, Spelbring DR, Chen GT. Functional dose-volume histograms for functionally heterogeneous normal organs [J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42(2): 345-356.

[54] Ebert MA, Gulliford S, Acosta O, et al. Spatial descriptions of radiotherapy dose; normal tissue complication models and statistical associations[J]. *Phys Med Biol*, 2021, 66(12).

[55] Bentzen SM, Constine LS, Deasy JO, et al. Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic (QUANTEC): an introduction to the scientific issues[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(3 Suppl):S3-9.

[56] Benedict SH, Yenice KM, Followill D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101[J]. *Med Phys*, 2010, 37(8):4078-4101.

[57] Timmerman R. A story of hypofractionation and the table on the wall[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2022, 112(1):4-21.

[58] Wang K, Tepper JE. Radiation therapy-associated toxicity: etiology, management, and prevention[J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(5):437-454.

[59] Chavaudra J. [Last ICRU recommendations for the prescription, recording and reporting of external beam therapy] [J]. *Cancer Radiother*, 1998, 2(5):607-614.

[60] Zhou XT, Wang W, Zhou C, et al. Long-term outcomes of replanning during intensity-modulated radiation therapy in patients with nasopharyngeal carcinoma: an updated and expanded retrospective analysis[J]. *Radiother Oncol*, 2022, 170:136-142.

[61] Hua CH, Mascia AE, Seravalli E, et al. Advances in radiotherapy technology for pediatric cancer patients and roles of medical physicists: COG and SIOP Europe perspectives[J/OL]. *Pediatr Blood Cancer*, 2021, 68 Suppl 2 (Suppl 2): e28344 [2023-12-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33818892/>. DOI:10.1002/pbc.28344.

[62] Lee AW, Ng WT, Pan JJ, et al. International guideline for the delineation of the clinical target volumes (CTV) for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 126(1):25-36.

[63] Cereno RE, Mou B, Baker S, et al. Should organs at risk (OARs) be prioritized over target volume coverage in stereotactic ablative radiotherapy (SABR) for oligometastases? a secondary analysis of the population-based phase II SABR-5 trial[J]. *Radiother Oncol*, 2023, 182:109576.

[64] Chen YY, Zhang QX, Lu TZ, et al. Prioritizing sufficient dose to gross tumor volume over normal tissue sparing in intensity-modulated radiotherapy treatment of T4 nasopharyngeal carcinoma[J]. *Head Neck*, 2023, 45(5):1130-1140.

[65] Olson R, Jiang W, Liu M, et al. Treatment with stereotactic ablative radiotherapy for up to 5 oligometastases in patients with cancer: primary toxic effect results of the nonrandomized phase 2 SABR-5 clinical trial[J]. *JAMA Oncol*, 2022, 8(11):1644-1650.

收稿日期:2024-01-09 修回日期:2024-02-04 本文编辑:马骏

【本文文献著录格式】

岳金波,张焯,章文成,等. 放疗医生评估放疗计划中国专家共识[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2024, 31(8):453-470. DOI:10.16073/j.cnki.cjept.2024.08.01

中华肿瘤防治杂志编排规范
统计学分析方法的选择

对于定量资料,应根据所采用的设计类型、资料所具备的条件和分析目的,选用合适的统计学分析方法,不应盲目套用 *t* 检验和单因素方差分析;对于定性资料,应根据所采用的设计类型、定性变量的性质和频数所具备的条件及分析目的,选用合适的统计学分析方法,不应盲目套用成组 χ^2 检验;对于回归分析,应结合专业知识和散布图,选用合适的回归类型,不应盲目套用直线回归分析;对重复实验数据检验回归分析资料,不应简单化处理;对于多因素、多指标资料,要在一元分析的基础上,尽可能运用多元统计学分析方法,以便对各因素之间的交互作用和多指标之间的内在联系做出全面、合理的解释和评价。