

SPECT-based radiomics nomogram for predicting efficacy of postoperative ^{131}I therapy in differentiated thyroid carcinoma

JIA Yingnan¹, WU Qian¹, WANG Yanan¹, LU Cunzhi^{1*}, ZHANG Senlin²

(1. Department of Nuclear Medicine, Xuzhou Central Hospital, Xuzhou 221009, China; 2. School of Health Science Research, China Medical University, Shenyang 110032, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of nomogram constructed based on SPECT radiomics for predicting the efficacy of postoperative ^{131}I therapy in differentiated thyroid carcinoma (DTC). **Methods** A total of 420 DTC patients who underwent postoperative SPECT examination and ^{131}I therapy were retrospectively collected. Based on the effectiveness 6 months after ^{131}I therapy, the patients were divided into satisfactory group ($n=320$) and unsatisfactory group ($n=100$). Texture features of lesions were extracted from pre-therapy SPECT images and selected using the least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression, and radiomics score (Radscore) was calculated. Multivariable logistic regression was performed with Radscore and clinical factors being significantly different between groups, then a nomogram was constructed. Receiver operating characteristic (ROC) curves were drawn, the area under the curves (AUC) were calculated, and decision curve analysis (DCA) was used to evaluate the predictive performance and clinical net benefit of the obtained nomogram. **Results** Significant differences of patients' age, tumor diameter, extrathyroidal extension, American Joint Committee on Cancer/Union for International Cancer Control (AJCC/UICC) stage, regional lymph node metastasis status and American Thyroid Association (ATA) risk stratification were observed between groups (all $P<0.05$). LASSO regression identified 4 key features associated with ^{131}I therapy efficacy, *i. e.* Coarseness, Histogram Variance, Short-Run Low Gray-Level Emphasis and Zone Size Variance. Radscore was significantly different between groups ($P<0.05$). Radscore, patients' age, tumor diameter, regional lymph node metastasis and extrathyroidal invasion status were all independent predictive factors for efficacy of postoperative ^{131}I therapy in DTC (all $P<0.05$), and the AUC of nomogram was 0.853. DCA indicated that this nomogram provided good clinical net benefit within a threshold probability range of 0.15 to 0.95. **Conclusion** Nomogram based on SPECT radiomics demonstrated good predictive performance for efficacy of postoperative ^{131}I therapy in DTC.

[Keywords] thyroid neoplasms; iodine radioisotopes; tomography, emission-computed, single-photon; radiomics; nomograms

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.01.011

SPECT 影像组学列线图用于预测术后 ^{131}I 治疗分化型甲状腺癌效果

贾英男¹, 吴倩¹, 王亚楠¹, 鹿存芝^{1*}, 张森林²

(1. 徐州市中心医院核医学科, 江苏 徐州 221009; 2. 中国医科大学健康科学研究院, 辽宁 沈阳 110032)

[摘要] **目的** 观察基于 SPECT 影像组学构建的列线图用于预测术后 ^{131}I 治疗分化型甲状腺癌 (DTC) 效果的价值。
方法 回顾性纳入 420 例接受术后 ^{131}I 治疗及此前 SPECT 检查的 DTC 患者, 根据治疗后 6 个月疗效将其分为满意组

[第一作者] 贾英男 (1992—), 女, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 主治医师。研究方向: 核素诊断与治疗。E-mail: shacongongtun33@163.com

[通信作者] 鹿存芝, 徐州市中心医院核医学科, 221009。E-mail: qingeyi93264@163.com

[收稿日期] 2025-08-18 **[修回日期]** 2025-12-05

($n=320$)与不满意组($n=100$)。于治疗前 SPECT 图像中提取病灶纹理特征,经最小绝对收缩和选择算子(LASSO)回归加以筛选并计算影像组学评分(Radscore);联合组间差异有统计学意义的临床参数、利用多因素 logistic 回归模型绘制列线图,以受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)及决策曲线分析(DCA)评估其预测效能及临床净收益。**结果** 组间患者年龄、病灶直径、腺外侵犯状态、美国癌症联合委员会/国际抗癌联盟(AJCC/UICC)分期、区域淋巴结转移及美国甲状腺协会(ATA)危险分层差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。经 LASSO 回归选出 4 个与术后 ^{131}I 疗效相关的关键特征,包括粗糙度、直方图方差、短游程低灰度增强及区域大小方差,组间 Radscore 差异有统计学意义($P<0.05$)。Radscore、患者年龄、肿瘤直径,以及区域淋巴结转移和腺外侵犯状态均为预测 DTC 术后 ^{131}I 疗效的独立因素(P 均 <0.05);所获列线图的 AUC 为 0.853, DCA 显示其在阈值概率 0.15~0.95 范围内列线图可带来较高临床净收益。**结论** SPECT 影像组学列线图能较好地预测 DTC 术后 ^{131}I 治疗效果。

[关键词] 甲状腺肿瘤;碘放射性同位素;体层摄影术,发射型计算机,单光子;影像组学;列线图

[中图分类号] R736.1; R817 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)01-0055-05

全球范围内甲状腺癌发病率及病死率均持续上升,其中分化型甲状腺癌(differentiated thyroid cancer, DTC)最为常见^[1];准确预测 ^{131}I 治疗 DTC 效果是临床关注要点。SPECT 日益广泛用于诊疗甲状腺癌^[2];基于 SPECT 影像组学可提取肿瘤纹理、形状等定量特征,用于诊断及评估预后^[3]。本研究观察基于 SPECT 影像组学的列线图用于预测术后 ^{131}I 治疗 DTC 效果的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性纳入 2023 年 1 月—12 月 420 例于徐州市中心医院接受甲状腺全切或次全切术后 SPECT 检查及 ^{131}I 治疗的 DTC 患者,男 365 例、女 55 例,年龄 43~80 岁、平均(62.0 ± 6.7)岁;根据治疗后 6 个月疗效进行分组,以颈部超声及 ^{131}I 全身显像未见残留或转移灶,且在甲状腺激素撤除后血清促甲状腺激素(thyroid-stimulating hormone, TSH) ≥ 30 mIU/L 的刺激状态下血清甲状腺球蛋白(thyroglobulin, Tg) <1.0 ng/ml 为疗效满意(满意组, $n=320$),不能满足上述任一项者为疗效不满意(不满意组, $n=100$)。满意组男 285 例、女 35 例,年龄 43~80 岁、平均(60.8 ± 6.4)岁;不满意组男 80 例、女 20 例,年龄 51~79 岁、平均(65.9 ± 5.9)岁。纳入标准:①经组织病理学诊断 DTC;②未合并其他肿瘤;③临床资料完整。排除标准:①合并严重肝肾功能不全;②于 ^{131}I 治疗前 3 个月接受化学治疗(化疗)及放射治疗(放疗)等;③失访。本研究经本院伦理委员会审查通过(LLWYH-2022-11-003);患者均签署知情同意。

记录患者一般资料。依据美国癌症联合委员会/国际抗癌联盟(American Joint Committee on Cancer/Union for International Cancer Control, AJCC/UICC)第 8 版 DTC 分期标准^[4]进行分期;无论有无腺

外侵犯或区域淋巴结转移,年龄 <55 岁且无远处转移者均为 I 期;年龄 ≥ 55 岁且 TNM 分期 T3~T4 或 N1 者为 II~III 期。

1.2 仪器与方法

1.2.1 ^{131}I 治疗 对已排除 ^{131}I 治疗禁忌证的 DTC 患者于甲状腺全切或次全切术后予口服 ^{131}I 治疗(每个疗程均一次口服给药)。为提高 ^{131}I 摄取,治疗前停用左甲状腺素 3~4 周并予低碘饮食 2 周,通过甲状腺激素撤除而使血清 TSH 升高;治疗前检测 TSH,于达到 TSH ≥ 30 mIU/L 后实施 ^{131}I 治疗;初次治疗剂量 3.70~5.55 GBq(100~150 mCi),由 2 名具有 15 年以上经验的核医学科副主任及以上职称医师根据术后病理分期、放射性摄取异常增高的可见病灶范围及既往治疗情况等综合决定具体剂量,并根据随访结果判断是否增加疗程。于治疗后 3~7 d 进行全身 ^{131}I 显像(图 1)评估疗效,必要时行 SPECT/CT 进一步定位,同时检测血清 Tg 及甲状腺球蛋白抗体(thyroglobulin antibody, TgAb)。

1.2.2 SPECT 显像 采用 Siemens Symbia intevo6 SPECT 系统、配通用低能平行孔准直器。以 $^{99\text{Tc}}\text{-MDP}$ 为显像剂(南京江原安迪科公司)进行骨扫描,参数:低能高分辨准直器,能峰 140 keV,窗宽 20%,矩阵 256 \times 1 024;以碘为显像剂进行全身显像,参数:高能准直器,能峰 360 keV,窗宽 20%,矩阵 256 \times 1 024。

1.3 处理图像 以 DICOM 格式导出 ^{131}I 治疗前 SPECT 图,并于 Siemens 工作站以统一矩阵、层厚和像素间距进行重建。利用统一窗宽、窗位和放大倍数,由主治医师及以上职称医师沿甲状腺床区域内放射性摄取异常增高的可见病灶外缘逐层勾画 ROI,尽量排除生理性摄取及伪影,存在多灶病变时勾画所有病灶并合并为一个 ROI;由副主任及以上职称医师复核,意见不一致时提请主任医师仲裁。归一化处理图像及 ROI 并

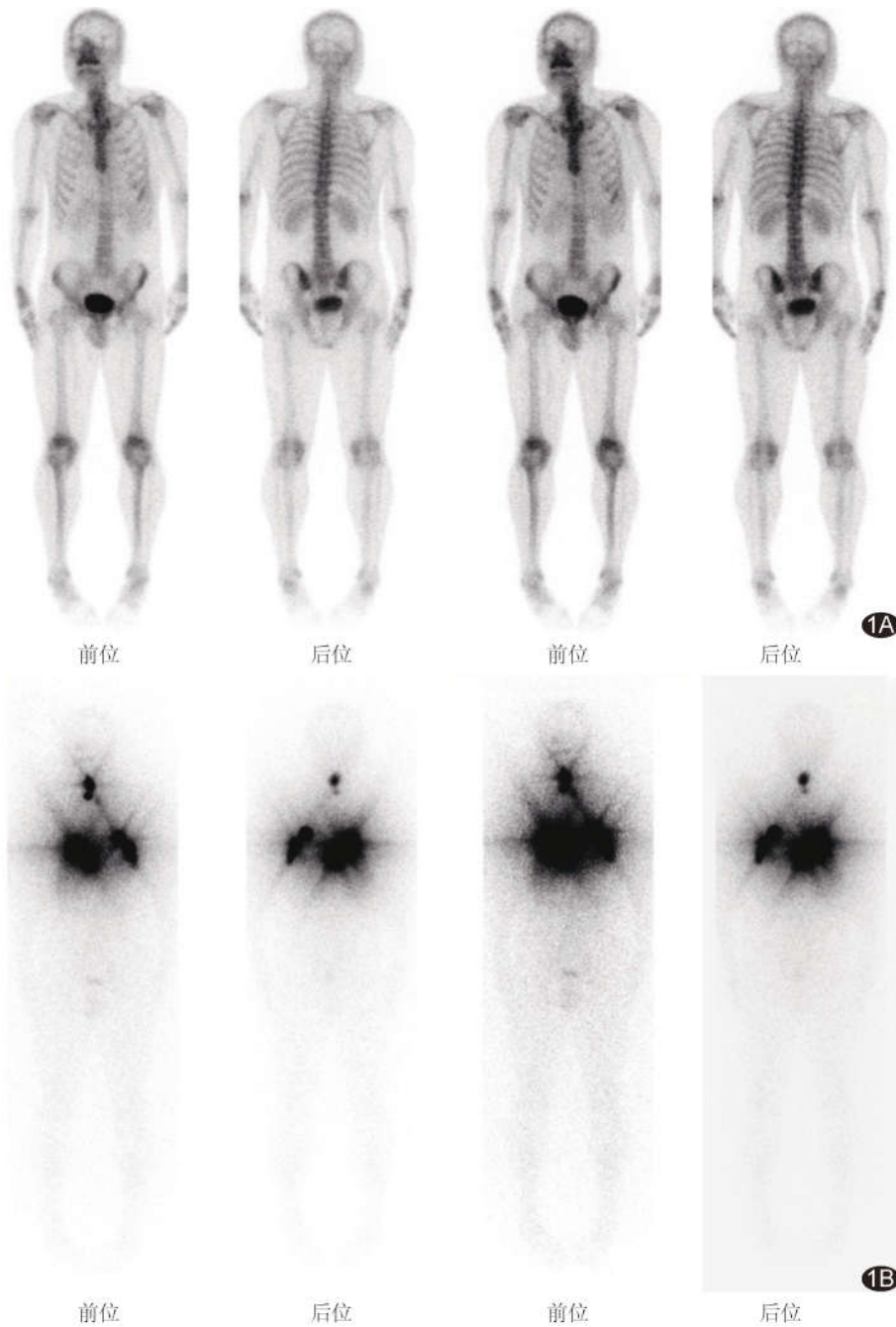


图 1 满意组患者,男,49 岁,DTC 术后 A. 首次¹³¹I 治疗前骨⁹⁹Tc^m-MDP SPECT 显像图; B. 首次¹³¹I 治疗后全身碘 SPECT 显像图

理特征,再以最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归筛选对于评估疗效有意义的特征,并以回归模型计算影像组学评分(radiomics score, Radscore)。

1.4 统计学分析 采用 R 3.6.1 统计分析软件。以 $\bar{x} \pm s$ 描述服从正态分布计量资料,组间行独立样本 *t* 检验;以中位数(上下四分位数)描述不服从正态分布计量资料,组间行 Mann-Whitney U 检验。以频数描述计数资料,组间行 χ^2 检验。针对 Radscore 及组间差异有统计学意义的一般资料进行多因素 logistic 回归,筛选可用于预测¹³¹I 治疗效果的独立因素并绘制列线图。绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线、计算曲线下面积(area under the curve, AUC)评价列线图的预测效能,以决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评估其临床净收益。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料 组间患者年龄差异有统计学意义(*P* < 0.05),见表 1。

2.2 病灶特征 组间肿瘤直径、腺外侵犯、AJCC/UICC 分期、区域淋巴结转移及美国甲状腺协会(American Thyroid Association,

ATA)危险分层差异均有统计学意义(*P* 均 < 0.001),见表 2。

导入 Matlab 软件,提取灰度共生矩阵、灰度游程矩阵、灰度区域大小矩阵、局部灰度差分矩阵及直方图等纹

表 1 420 例 DTC 患者一般资料比较

组别	性别(例)		年龄(岁)	体质量指数(kg/m ²)	受教育程度(例)		高血压病史(例)	糖尿病病史(例)	冠心病病史(例)	脑卒中病史(例)
	男	女			初中及以下	高中及以上				
满意组(<i>n</i> =320)	285	35	60.8±6.4	22.67±3.87	189	131	165	78	72	30
不满意组(<i>n</i> =100)	80	20	65.9±5.9	22.56±3.83	57	43	54	23	20	11
χ^2/t 值	5.498		-7.045	0.249	0.134		0.181	0.079	0.278	0.228
<i>P</i> 值	0.019		<0.001	0.402	0.715		0.670	0.779	0.598	0.633

2.3 组间 Radscore 比较 经 LASSO 回归筛选出 4 个 DTC 术后¹³¹I 治疗前与疗效相关的关键 SPECT 特征,包括粗糙度、直方图方差、短游程低灰度增强及区域大小方差。满意组 Radscore (-2.66 ± 0.72) 与不满意组 (0.89 ± 0.26) 差异有统计学意义 ($t=74.087, P<0.001$)。

2.4 列线图 多因素 logistic 回归分析显示, Radscore、年龄, 肿瘤直径, 以及区域淋巴结转移和腺外侵状态均为¹³¹I 治疗效果的独立预测因素 (P 均 <0.05); Radscore 较高、年龄较大、肿瘤直径较大, 以及区域淋巴结转移及腺外侵犯均增加疗效不满意风险, 见表 3。以 logistic 回归模型构建的预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的列线图见图 2。

2.5 列线图预测效能 线列图的 ROC 曲线见图 3; 其在最佳截断值下的敏感度为 85.42%、特异度为 68.62%, AUC 为 0.853。

2.6 临床净收益 DCA 曲线 (图 4) 显示, 0.15~0.95 阈值范围内, 列线图可带来较高临床净收益。

3 讨论

DTC 患者 5 年生存率超过 98%, 但仍有部分患者术后复发或因残留病灶而需接受¹³¹I 治疗, 后者中又有约 1/3 病例需经多次治疗方能有效控制病情^[5]。目前多依据¹³¹I 全身显像及相关血清学指标评估疗效^[6], 而基于 TNM 分期及复发风险分层预测¹³¹I 治疗价值的价值或许有限^[7]。

既往研究^[8-9]表明, 影像组学参数在预测治疗反应及预后方面优于传统的 SPECT 摄取值。本研究基于 SPECT 图像提取病灶

表 2 420 例 DTC 病灶特征

组别	病理分型(例)			位置(例)		直径(cm)	多灶性(例)
	乳头状	滤泡型	其他	单侧	双侧		
满意组(n=320)	263	48	9	245	75	2.89±1.23	164
不满意组(n=100)	83	15	2	75	25	3.89±1.67	47
χ^2/t 值	0.198			0.103		-6.479	0.550
P 值	0.906			0.748		<0.001	0.458

组别	甲状腺外侵犯(例)	AJCC/UICC 分期(例)			区域淋巴结转移(例)	ATA 分层(例)		
		I 期	II 期	III 期		低危	中危	高危
满意组(n=320)	180	210	110	0	131	170	140	10
不满意组(n=100)	35	59	40	1	65	45	40	15
χ^2/t 值	13.770	191.725			17.725	26.811		
P 值	<0.001	<0.001			<0.001	<0.001		

表 3 预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的多因素 logistic 回归分析结果

参数项	B 值	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值(95% CI)
Radscore	0.592	1.647	6.016	<0.001	4.685(3.294, 5.193)
年龄(岁)	0.659	1.358	2.748	<0.001	2.634(1.973, 3.016)
肿瘤直径(cm)	0.883	2.153	8.264	<0.001	7.538(6.594, 8.125)
区域淋巴结转移	0.981	2.961	4.329	<0.001	3.967(2.149, 4.637)
腺外侵犯	0.571	1.847	5.684	<0.001	4.112(3.251, 5.682)

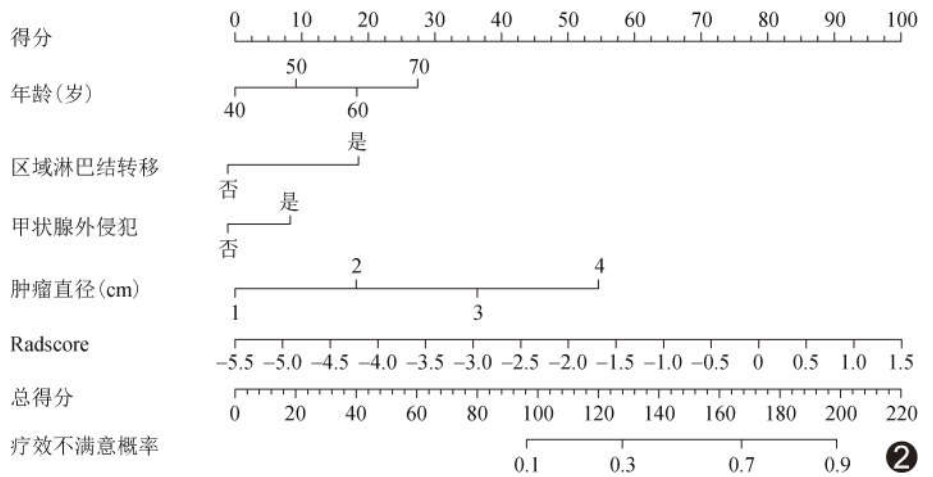


图 2 基于 SPECT 影像组学所获预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的列线图

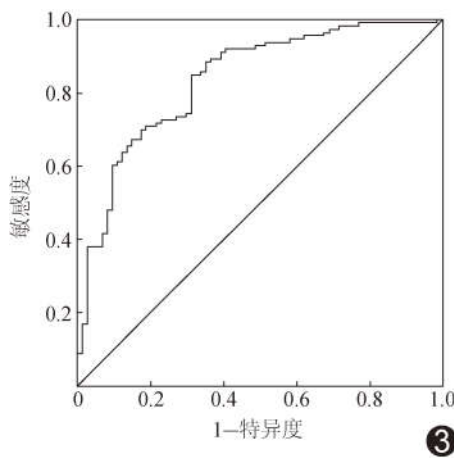


图 3 列线图预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的 ROC 曲线

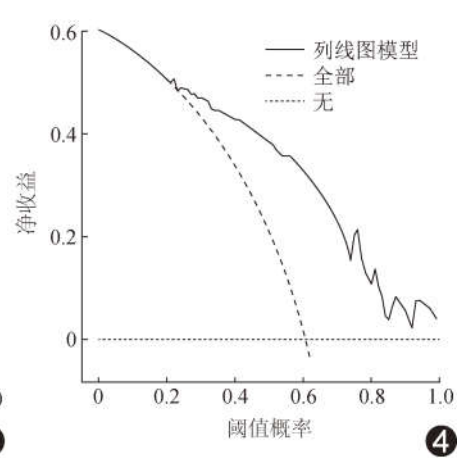


图 4 列线图预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的 DCA 图

纹理特征,以 LASSO 回归加以筛选后得到 4 个 DTC 术后¹³¹I 治疗前与疗效相关的关键 SPECT 特征,即粗糙度、直方图方差、短游程低灰度增强及区域大小方差并计算 Radscore,结果显示组间 Radscore 差异有统计学意义,提示其可能在一定程度上反映肿瘤异质性且与预后相关。

本研究多因素 logistic 回归分析结果显示,Radscore、年龄、肿瘤直径,以及区域淋巴结转移和腺外侵犯均为 DTC 术后¹³¹I 治疗效果的独立预测因素,且 Radscore 较高、年龄较大、肿瘤直径较大,以及存在区域淋巴结转移和腺外侵犯增加疗效不满意风险。分析原因:①年龄较大患者 DTC 远处转移并发生突变的概率较高,可致预后不良^[10];②肿瘤直径较大,以及存在区域淋巴结转移和腺外侵犯者多为晚期病例,对大部分治疗的反应性均较差,临床预后较差^[11-12];③Radscore 高提示肿瘤内部异质性较高,更可能转移或突变^[13]。

综上,SPECT 影像组学列线图能较好地预测 DTC 术后¹³¹I 治疗效果。本研究的主要局限性在于为单中心、回顾性分析,未设置验证集和测试集,亦未与其他影像学方法进行比较;有待后续通过多中心、前瞻性研究进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:贾英男研究设计、图像分析、撰写文章;吴倩和王亚楠研究设计、图像分析;鹿存芝修改文章;张森林统计分析。

[参考文献]

- [1] 张芷悦,何慧婧,单广良,等. 甲状腺癌的流行病学现状及其影响因素研究进展[J]. 中国癌症杂志, 2025, 35(1): 21-29.
- [2] VENTURA D, DITTMANN M, BÜTHER F, et al. Diagnostic performance of [¹⁸F] TFB PET/CT compared with therapeutic activity [¹³¹I] iodine SPECT/CT and [¹⁸F] FDG PET/CT in recurrent differentiated thyroid carcinoma[J]. J Nucl Med, 2024, 65(2): 192-198.
- [3] FUSCO R, GRANATA V, SIMONETTI I, et al. An informative review of radiomics studies on cancer imaging: The main findings, challenges and limitations of the methodologies[J]. Curr Oncol, 2024, 31(1): 403-424.
- [4] LAMARTINA L, GRANI G, ARVAT E, et al. 8th edition of the AJCC/TNM staging system of thyroid cancer: What to expect (ITCO# 2)[J]. Endocr Relat Cancer, 2018, 25(3): L7-L11.
- [5] LIU Y, WANG Y, ZHANG W. Scoring system and a simple nomogram for predicting radioiodine refractory differentiated thyroid cancer: A retrospective study[J]. EJNMMI Res, 2022, 12(1): 45.
- [6] AVRAM A M, GIOVANELLA L, GREENSPAN B, et al. SNMMI procedure standard/EANM practice guideline for nuclear medicine evaluation and therapy of differentiated thyroid cancer: Abbreviated version[J]. J Nucl Med, 2022, 63(6): 15N-35N.
- [7] LU L, LI Q, GE Z, et al. Development of a predictive nomogram for intermediate-risk differentiated thyroid cancer patients after fixed 3.7 GBq (100 mCi) radioiodine remnant ablation[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2024, 15: 1361683.
- [8] LI S, ZHOU B. A review of radiomics and genomics applications in cancers: The way towards precision medicine [J]. Radiat Oncol, 2022, 17(1): 217.
- [9] 张立甲,高毅,姜涵,等. SPECT 联合血清脂联素鉴别诊断甲状腺良、恶性结节[J]. 中国介入影像与治疗学, 2022, 19(6): 352-355.
- [10] PASQUAL E, SCHONFELD S, MORTON L M, et al. Association between radioactive iodine treatment for pediatric and young adulthood differentiated thyroid cancer and risk of second primary malignancies [J]. J Clin Oncol, 2022, 40 (13): 1439-1449.
- [11] REINECKE M J, AHLERS G, BURCHERT A, et al. Second primary malignancies induced by radioactive iodine treatment of differentiated thyroid carcinoma: A critical review and evaluation of the existing evidence [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 49(9): 3247-3256.
- [12] BUSAIDY N L, KONDA B, WEI L, et al. Dabrafenib versus dabrafenib + trametinib in BRAF-mutated radioactive iodine refractory differentiated thyroid cancer: Results of a randomized, phase 2, open-label multicenter trial[J]. Thyroid, 2022, 32(10): 1184-1192.
- [13] LIU J, LIU Y, LIN Y, et al. Radioactive iodine-refractory differentiated thyroid cancer and redifferentiation therapy [J]. Endocrinol Metab (Seoul), 2019, 34(3): 215-225.