

格雷夫斯病患者¹³¹I 治疗短期疗效的影响因素分析及模型预测

潘懿 周莹 王珊珊

江苏省原子医学研究所江苏省江原医院内科, 无锡 214063

通信作者: 王珊珊, Email: wangshanshan@jsnm.org

【摘要】 目的 探讨格雷夫斯病(GD)患者¹³¹I 治疗后短期疗效的影响因素, 构建个体化疗效预测模型。**方法** 回顾性队列研究。纳入 2018 年 1 月至 2024 年 6 月在江苏省原子医学研究所江苏省江原医院行¹³¹I 治疗的 406 例 GD 患者[男 115 例、女 291 例, 年龄(39.0±13.9)岁]。依据治疗后 6 个月甲状腺功能状态分为治愈组(甲状腺功能正常或减退)与未治愈组(甲状腺功能亢进), 比较 2 组患者基线资料、甲状腺功能指标、生化指标及治疗相关参数[甲状腺质量、摄碘率(2、6 与 24 h)、¹³¹I 治疗剂量、摄碘率高峰是否前移、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量]。采用单因素分析(χ^2 检验、Mann-Whitney *U* 检验)和多因素 logistic 回归筛选疗效预测因素。采用分层随机抽样将数据集按 8:2 划分为训练集($n=325$)与测试集($n=81$), 基于随机森林、极端梯度提升(XGBoost)、轻量级梯度提升机(LightGBM)、支持向量机(SVM)及 K 近邻(KNN)构建单一模型, 再以 Stacking 集成策略构建混合模型, 以 F1 分数、灵敏度、AUC 及准确性评价模型性能, 采用 Delong 检验比较模型间 AUC 差异, 校准曲线(含 Brier 评分)和决策曲线分析分别评估校准度与临床净获益。**结果** 治疗 6 个月后, 治愈 193 例, 未治愈 213 例。单因素分析显示, 摄碘率高峰是否前移、2 与 6 h 摄碘率、甲状腺质量、¹³¹I 治疗剂量、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量、游离三碘甲状腺原氨酸(FT₃)及促甲状腺激素受体抗体(TRAbs)在 2 组间的差异均有统计学意义($\chi^2=16.42$, *Z* 值: -4.59~-2.51, 均 $P<0.05$)。多因素分析显示, 摄碘率高峰是否前移[比值比(*OR*)=0.589, 95% *CI*: 0.366~0.949, $P=0.030$]、甲状腺质量(*OR*=0.987, 95% *CI*: 0.978~0.997, $P=0.011$)、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量(*OR*=1.006, 95% *CI*: 1.002~1.010, $P=0.008$)为短期疗效的影响因素。测试集中, 混合模型 F1 分数为 0.831、灵敏度为 0.845、准确性为 0.806, AUC 为 0.870, 优于各单一模型(*Z* 值: 2.85~6.20, 均 $P<0.05$)。混合模型的 Brier 评分最低(0.147), 校准曲线最接近对角线; 决策曲线分析显示, 其在较宽阈值概率范围内临床净获益最高。**结论** 摄碘率高峰是否前移、甲状腺质量及每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量是 GD 患者¹³¹I 短期疗效的影响因素。混合模型预测性能优于单一机器学习模型, 可为¹³¹I 个体化剂量调整提供参考。

【关键词】 格雷夫斯病; 放射疗法; 碘放射性同位素; 机器学习; 预测

基金项目: 江苏省医学重点学科(实验室)基金资助(ZDXYS202211); 无锡市科技发展资金项目(Y20252210)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20251112-00400

Analysis of short-term efficacy and influencing factors for ¹³¹I therapy in patients with Graves disease and model prediction

Pan Yi, Zhou Ying, Wang Shanshan

Department of Internal Medicine, Jiangsu Institute of Nuclear Medicine Jiangyuan Hospital of Jiangsu Province, Wuxi 214063, China

Corresponding author: Wang Shanshan, Email: wangshanshan@jsnm.org

【Abstract】 Objective To identify the factors influencing short-term efficacy of ¹³¹I therapy in Graves disease (GD) and construct an individualized efficacy prediction model. **Methods** A retrospective cohort study. A total of 406 GD patients (115 males, 291 females; age (39.0±13.9) years) who received ¹³¹I therapy at Jiangsu Institute of Nuclear Medicine Jiangyuan Hospital of Jiangsu Province between January 2018 and June 2024 were enrolled. Based on thyroid function status at 6 months post-treatment, patients were divided into cured group (euthyroid or hypothyroid) and uncured group (hyperthyroid). Baseline characteristics, thyroid function indicators, biochemical parameters, and treatment-related variables (thyroid mass, iodine uptake rates at 2, 6, and 24 h, ¹³¹I therapeutic dose, and whether the uptake peak shifted forward, and ¹³¹I therapeutic dose per gram of thyroid tissue) were compared between those 2 groups. Univariate analysis (χ^2 test, Mann-Whitney *U* test) and multivariate logistic regression were performed to identify effi-

cacy predictors. The dataset was randomly divided into training ($n=325$) and test ($n=81$) sets with a ratio of 8:2 using stratified random sampling method. Single models were constructed using random forest, extreme gradient boosting (XGBoost), light gradient boosting machine (LightGBM), support vector machine (SVM), and K-nearest neighbors (KNN), followed by a hybrid model with Stacking ensemble strategy. Performance was assessed by F1 score, sensitivity, AUC, and accuracy. Delong test was employed to compare AUC differences among models. Calibration curves (with Brier score) and decision curve analysis (DCA) were also used to evaluate model calibration and clinical net benefit. **Results** At 6 months post-treatment, 193 patients were cured and 213 were not. Univariate analysis showed significant differences between 2 groups in whether the uptake peak shifted forward, 2 h and 6 h iodine uptake rates, thyroid mass, ^{131}I therapeutic dose, ^{131}I therapeutic dose per gram of thyroid tissue, free triiodothyronine (FT_3), and thyroid-stimulating hormone receptor antibody (TRAb) ($\chi^2=16.42$, Z values: from -4.59 to -2.51 , all $P<0.05$). Multivariate analysis showed that whether the uptake peak shifted forward (odds ratio (OR)=0.589, 95% CI : 0.366–0.949, $P=0.030$), thyroid mass ($OR=0.987$, 95% CI : 0.978–0.997, $P=0.011$), and ^{131}I therapeutic dose per gram of thyroid tissue ($OR=1.006$, 95% CI : 1.002–1.010, $P=0.008$) were independent predictors of short-term efficacy. In the test set, the hybrid model achieved an F1 score of 0.831, sensitivity of 0.845, accuracy of 0.806, and AUC of 0.870, outperforming all 5 single models (Z values: 2.85–6.20, all $P<0.05$). The Brier score of the hybrid model was 0.147, which was the lowest among all models, with the calibration curve closest to the diagonal. Decision curve analysis showed that the hybrid model achieved the highest clinical net benefit across a wide range of threshold probabilities. **Conclusions** Whether the uptake peak shifted forward, thyroid mass, and therapeutic dose per gram of thyroid tissue are independent factors affecting short-term efficacy of ^{131}I therapy in GD. The hybrid model outperforms single models and may inform individualized dose adjustment.

[Key words] Graves disease; Radiotherapy; Iodine radioisotopes; Machine learning; Forecasting

Fund program: Jiangsu Provincial Medical Key Discipline (Laboratory) (ZDXYS202211); Wuxi Science and Technology Development Fund Project (Y20252210)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20251112-00400

格雷夫斯病(Graves disease, GD)是甲状腺功能亢进症(简称甲亢)最常见的病因,其发病率呈上升趋势^[1]。患者常表现为心悸、乏力、消瘦、多汗、眼球突出等,并可导致骨质疏松、诱发甲亢性心脏病等。目前,GD的治疗方法主要包括抗甲状腺药物(antithyroid drugs, ATD)、 ^{131}I 治疗及外科手术^[2]。其中, ^{131}I 治疗因操作简便、成本低、安全性及有效性高,已成为GD的一线治疗手段之一^[3],但其疗效可能受多种因素影响。当前关于GD患者 ^{131}I 治疗后的转归情况研究,多集中于对影响因素的分析。近年来,机器学习等方法在医学预测领域展现出显著优势^[4-5]。本研究通过量化患者的基线临床特征,利用机器学习算法构建模型,输出个体化治愈概率直观反映患者治愈可能性,为临床医师在现有剂量决策框架(如计算剂量法)下,实现 ^{131}I 个体化剂量精细调整提供客观、定量的决策依据。

资料与方法

1.研究对象。回顾性队列研究。纳入2018年1月至2024年6月期间于江苏省原子医学研究所江苏省江原医院行 ^{131}I 治疗的406例GD患者,其中男115例、女291例,年龄(39.0 ± 13.9)岁。

纳入标准:(1)首次接受 ^{131}I 治疗的GD患者(伴或不伴甲状腺结节);(2)临床资料及生化指标完整;(3) ^{131}I 治疗前3~7 d停用ATD且治疗后无

需继续ATD治疗。排除标准:(1)曾在外院行 ^{131}I 治疗;(2)曾行甲状腺手术;(3)伴肝肾功能损伤或粒细胞缺乏、粒细胞减少;(4)毒性多结节性甲状腺肿及毒性甲状腺腺瘤、亚急性甲状腺炎等其他原因所致的甲亢。

本研究已获得江苏省原子医学研究所伦理委员会批准(批号:YLK202510),豁免患者知情同意。

2.资料收集与疗效分组。所有患者分别于 ^{131}I 治疗前及治疗后1、3和6个月随访,采集血样并收集资料:(1)一般资料:性别、年龄、病程、ATD治疗史;(2)甲状腺功能指标:游离三碘甲状腺原氨酸(free triiodothyronine, FT_3)、游离甲状腺素(free thyroxine, FT_4)、促甲状腺激素(thyroid-stimulating hormone, TSH)、甲状腺过氧化物酶抗体(thyroid peroxidase antibody, TPOAb)、甲状腺球蛋白抗体(thyroglobulin antibody, TgAb)、TSH受体抗体(TSH receptor antibody, TRAb);(3)一般生化指标:白蛋白、球蛋白、丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase, ALT)、天冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase, AST);(4)治疗相关参数:甲状腺质量(螺旋CT测量)、摄碘率(2、6与24 h)、 ^{131}I 治疗剂量、每克甲状腺组织的 ^{131}I 治疗剂量。同时比较3个时间点的摄碘率,如2 h或6 h摄碘率高于24 h,则判定为摄碘率高峰前移。

以¹³¹I 治疗后 6 个月的甲状腺功能状态(依据 FT₃、FT₄、TSH)为判定标准,将患者分为治愈组[甲状腺功能正常或甲状腺功能减退症(简称甲减)]与未治愈组(甲亢)。

3. 数据处理与模型构建。采用分层随机抽样将数据集按 8:2 划分为训练集($n=325$)与验证集($n=81$),分别构建单一模型和混合模型。(1)单一模型。基于随机森林、极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)、轻量级梯度提升机(light gradient boosting machine, LightGBM)、支持向量机(support vector machine, SVM)及 K 近邻(K-nearest neighbors, KNN)5 种算法建立预测模型,以 F1 分数、灵敏度、AUC 及准确性评价模型性能。

(2)混合模型。采用 Stacking 集成的策略,以经贝叶斯优化调整超参数后的 XGBoost 和 LightGBM 为基模型,通过 5 折交叉验证生成概率特征,再输入以随机森林为元学习器的第二层模型,构建混合模型。采用与单一模型相同的指标进行性能对比。

4. 统计学处理。采用 R 4.3.1 软件分析数据。符合正态分布的定量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用两独立样本 t 检验比较组间差异;不符合正态分布的定量资料采用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,采用 Mann-Whitney U 检验比较组间差异。定性资料采用频数(百分数)表示,采用 χ^2 检验比较组间差异。采用 Pearson 相关系数矩阵评估变量间的多重共线性($r \geq 0.7$ 视为存在高度线性相关)。将单因素分析中有意义且无共线性的变量纳入多因素 logistic 回归,计算比值比(odds ratio, OR)及 95% CI。结局变量赋值:治愈=1,未治愈=0;自变量中,摄碘率高峰是否前移(否=0,是=1);甲状腺质量、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量、6 h 摄碘率、FT₃、TRAb 为连续变量,直接代入模型。采用 Delong 检验比较混合模型与单一模型的 AUC 差异。绘制校准曲线评估预测概率与实际观测概率的一致性,计算 Brier 评分(0~1 分;越小表示校准度越好)。进一步行决策曲线分析,评估模型在不同阈值概率下的临床净获益。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义(双侧检验)。

结 果

1. 患者组间比较(表 1)。治疗 6 个月后,治愈组 193 例、未治愈组 213 例。摄碘率高峰是否前移($\chi^2 = 16.42, P < 0.001$)、2 h 摄碘率($Z = -4.59, P < 0.001$)、6 h 摄碘率($Z = -4.48, P < 0.001$)、甲状腺质量($Z = -4.03, P < 0.001$)、¹³¹I 治疗剂量($Z = -3.41, P <$

0.001)、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量($Z = -2.51, P = 0.012$)、FT₃($Z = -2.91, P = 0.004$)及 TRAb($Z = -2.64, P = 0.008$) 在 2 组间的差异均有统计学意义。

2. 疗效预测因素分析。经多重共线性检查,剔除 2 h 摄碘率及¹³¹I 治疗剂量。将 6 h 摄碘率、摄碘率高峰是否前移、甲状腺质量、每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量、FT₃、TRAb 纳入多因素 logistic 回归,结果显示摄碘率高峰是否前移($OR = 0.589, 95\% CI: 0.366 \sim 0.949, P = 0.030$)、甲状腺质量($OR = 0.987, 95\% CI: 0.978 \sim 0.997, P = 0.011$)与治愈概率呈负相关(即不利于治愈),每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量($OR = 1.006, 95\% CI: 1.002 \sim 1.010, P = 0.008$)与治愈概率呈正相关(即有利于治愈)。

3. 不同预测模型的性能对比(表 2)。训练集中,随机森林、XGBoost、LightGBM 的 F1 分数均在 0.915 以上,AUC 高于 0.974;KNN 的 F1 分数达 0.999,AUC 为 1.000。但测试集中各模型性能普遍下降,提示存在过拟合,以 KNN 最明显(训练集 AUC=1.000,测试集 AUC=0.814)。但测试集各单一模型的 AUC 仍保持在 0.800 以上,其中随机森林、XGBoost、LightGBM 整体优于 SVM 和 KNN;三者的 F1 分数也均在 0.800 以上,灵敏度以随机森林最高,XGBoost 和 LightGBM 略低。混合模型在测试集中的 F1 分数 0.831、灵敏度 0.845、准确性 0.806、AUC 0.870。Delong 检验结果显示,混合模型 AUC 高于随机森林($Z = 2.85, P = 0.010$)、XGBoost($Z = 3.58, P < 0.001$)、LightGBM($Z = 2.85, P = 0.004$)、SVM($Z = 6.20, P < 0.001$)及 KNN($Z = 5.37, P < 0.001$)。校准曲线显示,混合模型 Brier 评分最低(0.147),低于随机森林(0.152)、XGBoost(0.152)、LightGBM(0.153)、KNN(0.173)和 SVM(0.174),曲线最接近对角线,校准度较好。决策曲线分析亦显示,在较宽的阈值概率范围内,混合模型的临床净获益高于各单一模型。

讨 论

¹³¹I 治疗是 GD 的主要治疗手段之一,其原理是¹³¹I 通过发射 β 射线诱导甲状腺细胞凋亡和坏死,从而减少甲状腺激素合成^[6-7]。患者主要转归为甲亢、甲状腺功能正常及甲减。尽管¹³¹I 治疗安全性良好,但仍可能诱发或加重 Graves 眼病^[8],治疗 1 周后可能出现短暂性白细胞总数减少^[9],部分患者伴有轻微性腺功能减退^[10-11]等。此外,虽然大量研究表明,规范使用¹³¹I 治疗甲亢的总体癌症风险未明显增加^[12-13],但辐射理论上仍是甲状腺癌的

表 1 治愈组和未治愈组格雷夫斯病(GD)患者的临床资料比较

组别	例数	性别(例)		是否使用 MMI(例)		是否使用 PTU(例)		RAIU 高峰是否前移(例)		是否结节(例)	
		男	女	是	否	是	否	是	否	是	否
治愈组	193	63	130	163	30	12	181	48	145	60	133
未治愈组	213	52	161	183	30	23	190	95	118	74	139
检验值		2.98 ^a		0.06 ^a		2.15 ^a		16.42 ^a		0.46 ^a	
P 值		0.084		0.784		0.142		<0.001		0.499	

组别	年龄 (岁; $\bar{x}\pm s$)	病程 [个月; $M(Q_1,Q_3)$]	摄碘率[%; $M(Q_1,Q_3)$]			甲状腺质量 [g; $M(Q_1,Q_3)$]
			2 h	6 h	24 h	
治愈组	39.7±13.4	12.00(3.00,72.00)	53.35(39.90,67.80)	75.50(64.40,84.70)	78.80(71.30,85.50)	35.93(26.22,51.86)
未治愈组	38.4±14.4	24.00(6.00,72.00)	65.50(48.80,75.00)	83.60(72.50,88.10)	80.90(73.60,87.60)	43.78(29.66,68.67)
检验值	0.99 ^b	-1.06	-4.59	-4.48	-1.80	-4.03
P 值	0.321	0.290	<0.001	<0.001	0.071	<0.001

组别	¹³¹ I 治疗剂量[MBq; $M(Q_1,Q_3)$]	单位 ¹³¹ I 治疗剂量 ^c [MBq; $M(Q_1,Q_3)$]	TSH[mU/L; $M(Q_1,Q_3)$]	FT ₃ [pmol/L; $M(Q_1,Q_3)$]	FT ₄ [pmol/L; $M(Q_1,Q_3)$]	TPOAb [kU/L; $M(Q_1,Q_3)$]
治愈组	178.71(129.50,271.21)	4.95(4.43,5.77)	0.005(0.005,0.006)	14.07(9.56,25.36)	35.83(25.30,55.94)	223.50(90.90,445.50)
未治愈组	215.71(155.40,333.00)	4.81(4.29,5.35)	0.005(0.005,0.006)	18.64(10.22,31.28)	42.23(25.28,70.46)	209.90(47.49,378.30)
检验值	-3.41	-2.51	-0.65	-2.91	-1.21	-1.32
P 值	<0.001	0.012	0.516	0.004	0.225	0.187

组别	TgAb [kU/L; $M(Q_1,Q_3)$]	TRAb [U/L; $M(Q_1,Q_3)$]	ALT [U/L; $M(Q_1,Q_3)$]	AST [U/L; $M(Q_1,Q_3)$]	白蛋白 (g/L; $\bar{x}\pm s$)	球蛋白 (g/L; $\bar{x}\pm s$)
治愈组	152.60(30.43,466.20)	10.17(5.92,19.75)	27.00(18.00,41.00)	22.00(16.00,29.00)	40.03±3.51	24.10±3.96
未治愈组	146.50(24.67,551.90)	14.93(6.26,27.72)	25.00(16.00,38.00)	20.00(15.00,28.00)	40.66±3.81	24.14±4.10
统计值	-0.22	-2.64	-1.14	-1.66	-1.73 ^b	-0.10 ^b
P 值	0.825	0.008	0.256	0.097	0.085	0.924

注:^a检验值为 χ^2 值,^b检验值为 t 值,余检验值为 Z 值,^c单位指每克甲状腺组织;MMI为甲硫咪唑,PTU为丙硫氧嘧啶,RAIU为放射性碘摄取率,TSH为促甲状腺激素,FT₃为游离三碘甲状腺原氨酸,FT₄为游离甲状腺素,TPOAb为甲状腺过氧化物酶抗体,TgAb为甲状腺球蛋白抗体,TRAb为促TSH受体抗体,ALT为丙氨酸氨基转移酶,AST为天冬氨酸氨基转移酶

表 2 训练集和测试集中各模型预测性能

组别	模型类别	F1 分数	灵敏度	AUC	准确性
训练集($n=325$)	随机森林	0.943	0.950	0.989	0.939
	XGBoost	0.915	0.926	0.974	0.908
	LightGBM	0.929	0.937	0.981	0.923
	SVM	0.838	0.824	0.909	0.829
	KNN	0.999	0.998	1.000	0.999
	混合模型	0.962	0.983	0.994	0.959
测试集($n=81$)	随机森林	0.811	0.812	0.862	0.787
	XGBoost	0.806	0.799	0.860	0.783
	LightGBM	0.800	0.795	0.860	0.775
	SVM	0.768	0.741	0.809	0.741
	KNN	0.768	0.770	0.814	0.737
	混合模型	0.831	0.845	0.870	0.806

注:XGBoost 为极端梯度提升,LightGBM 为轻量级梯度提升机,SVM 为支持向量机,KNN 为 K 近邻

诱发因素。降低¹³¹I 剂量虽可减少辐射暴露,却会直接影响疗效,导致治愈率下降。因此,甄别影响患者治愈率的关键临床因素,建立个体化疗效预测工具,对优化治疗决策具有重要价值。

本研究分析了 406 例行¹³¹I 治疗的 GD 患者的基线临床特征、治疗前生化指标及治疗方案参数,通

过多因素分析识别疗效预测因素。结果发现,摄碘率高峰是否前移、甲状腺质量及每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量是短期疗效的影响因素。摄碘率被视为影响¹³¹I 治疗效果的重要指标,但既往多探讨 24 h 摄碘率与治疗结果的相关性^[14-15],结论并不一致。本研究发现摄碘率高峰前移与治愈概率呈负相关($OR=0.589,95\% CI:0.366\sim0.949,P=0.030$),这提示摄碘动力学的时间特征可能比单一时间点摄碘率更能反映甲状腺对¹³¹I 的摄取规律和治疗反应。此外,甲状腺质量每增加 1 g,治愈概率降低约 1.3%($OR=0.987,95\% CI:0.978\sim0.997,P=0.011$);每克甲状腺组织的¹³¹I 治疗剂量每增加 1 MBq,治愈概率提高约 0.6%($OR=1.006,95\% CI:1.002\sim1.010,P=0.008$),与既往研究结论一致^[14,16]。

机器学习模型在疾病预测和风险评估方面已有较多应用^[17]。在 GD 领域,机器学习主要集中于甲状腺疾病诊断及早期甲减的预测,关于¹³¹I 治疗 GD 预后预测的报道相对有限^[18-19]。Duan 等^[14]对 471 例接受¹³¹I 治疗的 GD 患者应用多种机器学习算法,预

测治疗后 6 个月甲减发生情况,模型 AUC 为 0.74, F1 分数为 0.74,但该研究仅限于早期预后及对甲减的预测。本研究分别构建了预测疗效的单一与混合模型,结果显示 5 个单一模型测试集 AUC 为 0.809~0.862, F1 分数为 0.768~0.811;混合模型测试集 AUC 达 0.870, F1 分数达 0.831,高于任一单一模型,可实现治疗前的个体化疗效风险评估。对于预测为未治愈的患者,医师在采用计算剂量法时可考虑适当提高计划给予的单位甲状腺组织活度,以改善疗效;对于预测为治愈的患者,可采用相对保守的单位活度,以降低永久性甲减的发生风险。基于此,GD 治疗模式可从单一的¹³¹I 治疗剂量模式,转向基于预测模型的“风险自适应”个体化剂量模式。

当前模型仍存在局限性。首先,作为单中心回顾性研究,模型在不同人群中的泛化能力有待多中心前瞻性研究确认。其次,随访仅 6 个月,无法观察甲状腺功能正常者的远期甲亢复发风险,亦难以区分未治愈患者中的延迟缓解或复发。再次,模型为静态预测,未纳入随访期间的治疗反应数据及方案调整信息。未来可通过动态更新,整合实时随访数据优化现有模型,实现对患者复发风险的动态预警。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

志谢 上海大学理学院数学系姜洁教授对统计方法使用给予指导

作者贡献声明 潘懿:研究设计、统计学分析、论文撰写;周莹:数据收集及分析;王珊珊:数据整理、论文审阅

参 考 文 献

- [1] Barajas Galindo DE, Ramos Bachiller B, González Roza L, et al. Increased incidence of Graves' disease during the SARS-CoV2 pandemic[J]. Clin Endocrinol (Oxf), 2023, 98(5): 730-737. DOI: 10.1111/cen.14860.
- [2] Lee SY, Pearce EN. Hyperthyroidism: a review[J]. JAMA, 2023, 330(15): 1472-1483. DOI: 10.1001/jama.2023.19052.
- [3] Liu X, Wong C, Chan W, et al. Outcomes of Graves' disease patients following antithyroid drugs, radioactive iodine, or thyroidectomy as the first-line treatment[J]. Ann Surg, 2021, 273(6): 1197-1206. DOI: 10.1097/SLA.0000000000004828.
- [4] Dack E, Christe A, Fontanellaz M, et al. Artificial intelligence and interstitial lung disease: diagnosis and prognosis[J]. Invest Radiol, 2023, 58(8): 602-609. DOI: 10.1097/RLI.0000000000000974.
- [5] 牟玮,田捷. PET/CT、SPECT/CT 影像组学:沟通宏观影像和微观分子的桥梁[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(2): 65-67. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20231212-00134. Mu W, Tian J. Radiomics in PET/CT and SPECT/CT: the bridge between macroscopic images and microscopic molecules[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(2): 65-67. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20231212-00134.
- [6] Khan M, Hussain A, Ahmad S, et al. Outcomes of radioactive iodine (¹³¹I) therapy among hyperthyroid patients[J]. Pak J Med Sci, 2023, 39(6): 1685-1689. DOI: 10.12669/pjms.39.6.7567.
- [7] 中华医学会核医学分会. ¹³¹I 治疗格雷夫斯甲亢指南(2021 版)[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2021, 41(4): 242-253. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20201109-00405. Chinese Society of Nuclear Medicine. Clinical guidelines for ¹³¹I treatment of Graves' hyperthyroidism (2021 edition)[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 41(4): 242-253. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20201109-00405.
- [8] Plazinska MT, Sawicka-Gutaj N, Czarnywojtek A, et al. Radioiodine therapy and Graves' disease-myths and reality[J]. PLoS One, 2020, 15(1): e0226495. DOI: 10.1371/journal.pone.0226495.
- [9] Yamashita K, Morimoto S, Kimura S, et al. Transient leukopenia after radioactive iodine treatment in patients with Graves' disease: a retrospective cohort study[J]. J Endocr Soc, 2021, 5(5): bv-ab039. DOI: 10.1210/jendso/bvab039.
- [10] Ceccarelli C, Canale D, Battisti P, et al. Testicular function after ¹³¹I therapy for hyperthyroidism[J]. Clin Endocrinol (Oxf), 2006, 65(4): 446-452. DOI: 10.1111/j.1365-2265.2006.02613.x.
- [11] Cebi Sen C, Yumusak N, Atilgan HI, et al. Effect of amifostine on sperm DNA fragmentation and testes after radioiodine treatment[J]. J Vet Res, 2017, 61(4): 509-515. DOI: 10.1515/jvetres-2017-0064.
- [12] Shim SR, Kitahara CM, Cha ES, et al. Cancer risk after radioactive iodine treatment for hyperthyroidism: a systematic review and meta-analysis[J]. JAMA Netw Open, 2021, 4(9): e2125072. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2021.25072.
- [13] Kim KJ, Choi J, Kim KJ, et al. Cancer risk in Graves disease with radioactive ¹³¹I treatment: a nationwide cohort study[J]. J Nucl Med, 2024, 65(5): 693-699. DOI: 10.2967/jnumed.123.266531.
- [14] Duan L, Zhang HY, Lv M, et al. Machine learning identifies baseline clinical features that predict early hypothyroidism in patients with Graves' disease after radioiodine therapy[J]. Endocr Connect, 2022, 11(5): e220119. DOI: 10.1530/EC-22-0119.
- [15] Damle N, Bal C, Kumar P, et al. The predictive role of 24h RAIU with respect to the outcome of low fixed dose radioiodine therapy in patients with diffuse toxic goiter[J]. Hormones (Athens), 2012, 11(4): 451-457. DOI: 10.14310/horm.2002.1377.
- [16] Szumowski P, Abdelrazek S, Kociura Sawicka A, et al. Radioiodine therapy for Graves' disease-retrospective analysis of efficacy factors[J]. Endokrynol Pol, 2015, 66(2): 126-131. DOI: 10.5603/EP.2015.0019.
- [17] 张乐乐,陆路,葛昭,等.影像组学与深度学习模型预测甲状腺乳头状癌¹³¹I 治疗疗效的可行性分析[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(9): 543-548. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240904-00312. Zhang LL, Lu L, Ge Z, et al. Feasibility analysis of radiomics and deep learning models in predicting the efficacy of ¹³¹I therapy for papillary thyroid cancer[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2025, 45(9): 543-548. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20240904-00312.
- [18] Pantic N, Pantic B, Odalovic S, et al. Multiple machine learning models for the prediction of an early response to radioactive iodine therapy in hyperthyroidism: ablative dose concept[J]. Thyroid Res, 2026, 19(1): 19. DOI: 10.1186/s13044-026-00299-2.
- [19] Lu L, Meng D, Mo S, et al. Evaluating the efficacy of the ResNet50 deep learning model utilizing thyroid scintigraphy images for predicting the outcomes of initial iodine-131 therapy in patients with Graves' disease[J]. Nucl Med Commun, 2026, 47(3): 286-297. DOI: 10.1097/MNM.0000000000002094.

(收稿日期:2025-11-12)