

doi:10.3969/j.issn.1005-3697.2024.11.011

❖ 临床研究 ❖

# 基于机器学习的胰腺形态和临床特征预测 2 型糖尿病的风险研究

宋学亮<sup>1,2</sup>, 黄建<sup>2</sup>, 刘念<sup>1,2</sup>, 陈晓文<sup>2</sup>, 杨雄雄<sup>3</sup>, 严允靖<sup>2</sup>, 吴腾跃<sup>2</sup>

(川北医学院, 1. 附属医院放射科; 2. 医学影像学院; 3. 南充市中医医院放射科, 四川 南充 637000)

**【摘要】目的:** 探讨基于胰腺形态和临床特征建立机器学习模型预测 2 型糖尿病的风险效能。**方法:** 回顾性分析 187 例行腹部增强 CT 检查的患者资料, 包括 2 型糖尿病组 (T2DM) 106 例和正常对照组 (HC) 81 例, 按 7:3 比例分为训练集和测试集, 训练集 130 例 (T2DM 组 74 例, HC 组 56 例), 测试集 57 例 (T2DM 组 33 例, HC 组 24 例)。T2DM 组根据病程是否大于 5 年分为两个亚组: T2DM 长病程亚组 ( $n=55$ ) 和 T2DM 短病程亚组 ( $n=51$ )。收集 T2DM 组与 HC 组性别、年龄、血糖血脂等相关指标, 测量胰腺形态指标 (头部、颈部、体部、尾部直径)。采用 Logistic 回归分析和 Bagging 决策树分别建立 T2DM 风险预测模型, 并使用 Delong 检验比较两种模型的预测效能。**结果:** T2DM 长病程亚组胰头、颈、体、尾部直径均小于 T2DM 短病程亚组和 HC 组 ( $P<0.05$ ), T2DM 短病程亚组胰头和胰体直径小于 HC 组 ( $P<0.05$ )。T2DM 长病程亚组与短病程亚组的甘油三酯和极低密度脂蛋白水平均高于 HC 组 ( $P<0.05$ )。各组高密度脂蛋白水平比较: HC 组 > T2DM 短病程亚组 > T2DM 长病程亚组 ( $P<0.05$ )。T2DM 组胰头、颈、体、尾部直径与病程负相关 ( $P<0.05$ )。训练集中, Bagging 决策树模型预测效能优于 Logistic 回归模型 ( $P<0.05$ ), ROC 曲线下面积 (AUC) 分别为 0.962、0.883, 特异度 0.986、0.824, 敏感度 0.790、0.732。测试集中, Bagging 决策树和 Logistic 回归模型预测效能无统计学差异, AUC 分别为 0.899、0.886, 特异度 0.906、0.680, 敏感度 0.781、0.800。**结论:** 基于胰腺形态和临床特征建立的机器学习模型具有较高的 T2DM 风险预测效能。

**【关键词】** 2 型糖尿病; CT; 胰腺; 直径; 风险

**【中图分类号】** R587.1 **【文献标志码】** A

## Risk prediction of type 2 diabetes by machine learning-based pancreatic morphology and clinical features

SONG Xue-liang<sup>1,2</sup>, HUANG Jian<sup>2</sup>, LIU Nian<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-wen<sup>2</sup>, YANG Xiong-xiong<sup>3</sup>, YAN Yun-jing<sup>2</sup>, WU Teng-yue<sup>2</sup>

(1. Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College; 2. School of Medical Imaging, North Sichuan Medical College; 3. Department of Radiology, Nanchong Hospital of Traditional Chinese Medicine, Nanchong 637000, Sichuan, China)

**【Abstract】Objective:** To investigate the efficacy of machine learning model based on pancreatic morphology and clinical characteristics to predict the risk of type 2 diabetes. **Methods:** The data of 187 patients who underwent abdominal enhanced CT examination were collected, including 106 patients in the type 2 diabetes mellitus (T2DM) group and 81 patients in the healthy control (HC) group. There were 130 training sets (74 T2DM group, 56 HC group) and 57 test sets (33 T2DM group, 24 HC group) in a ratio of 7:3. The T2DM group was divided into two subgroups according to whether the duration of the disease was greater than 5 years; the T2DM long-duration subgroup ( $n=55$ ) and the T2DM short-duration subgroup ( $n=51$ ). Gender, age, the index of blood glucose and lipid were collected in T2DM group and HC group, and pancreatic morphological indexes (diameter of head, neck, body and tail) were measured. Logistic regression and Bagging decision tree were used to establish T2DM risk prediction models respectively, and Delong test was used to compare the prediction efficiency of the two models. **Results:** The diameters of the head, neck, body and tail of the pancreas in T2DM long-duration subgroup were smaller than those in T2DM short-duration subgroup and HC group ( $P<0.05$ ), and the diameters of the pancreatic head and body in T2DM short-duration subgroup were smaller than those in HC group ( $P<0.05$ ). The levels of triglyceride and very low density lipoprotein in T2DM long-duration subgroup and short-duration subgroup were higher than those in HC group ( $P<0.05$ ). The high density lipoprotein level in HC group was higher than that in T2DM short-duration subgroup ( $P<0.05$ ), and the high density lipoprotein level in short-duration subgroup was higher than that in long-duration subgroup ( $P<0.05$ ). The diameters of head, neck, body and tail of pancreas in T2DM group were negatively correlated with the duration of disease ( $P<0.05$ ). In the training set, Bagging decision tree

**基金项目:** 四川省科技厅自然科学基金 (2023NSFSC0646); 四川省卫生健康委科研项目 (19PJ203); 南充市市校合作项目 (20SXQT0303)

**作者简介:** 宋学亮 (2002-), 女, 硕士研究生。E-mail: 2231691948@qq.com

**通讯作者:** 刘念, 博士。E-mail: 232402432@qq.com

model had better predictive performance than Logistic regression model ( $P < 0.05$ ). The area under the curve (AUC) under ROC curve were 0.962 and 0.883, the specificity was 0.986 and 0.824, and the sensitivity was 0.790 and 0.732, respectively. In the test set, Bagging decision tree and Logistic regression model showed no statistical difference in prediction efficiency, with AUC of 0.899 and 0.886, specificity of 0.906 and 0.680, sensitivity of 0.781 and 0.800, respectively. **Conclusion:** The machine learning model based on pancreatic morphology and clinical features has high efficacy in T2DM risk prediction.

**【Key words】** Type 2 diabetes; CT; Pancreas; Diameter; Risk

中国约有 1.141 亿糖尿病患者,是目前世界上糖尿病患者最多的国家<sup>[1]</sup>。2 型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)的发病与遗传因素、肥胖、饮食习惯、生活方式、胰岛素抵抗有关,其中胰岛素抵抗为其主要因素<sup>[2]</sup>。胰岛素抵抗使胰岛素分泌相对缺乏,导致胰腺的有效生长因子减少和胰腺萎缩<sup>[3]</sup>。研究<sup>[4-5]</sup>发现胰腺萎缩与 T2DM 的发生有一定相关性,但 T2DM 和胰腺萎缩的因果关系尚无定论。现有研究<sup>[6-8]</sup>大多是关注 T2DM 患者的胰腺体积、脂肪沉积、密度,或正常人群的胰腺直径等方面,而关于 T2DM 患者胰腺直径的相关研究较少。此外,关于 T2DM 发病的临床风险因素较多,涉及遗传、肥胖、脂代谢紊乱、高血压、吸烟等因素<sup>[9]</sup>。因此,仅通过临床风险因素预测 T2DM 的发生较为困难,且缺乏稳定性。机器学习方法有助于提高风险模型的预测效能和稳定性,且目前尚未见基于临床特征和胰腺形态学指标建立机器学习模型预测 T2DM 发生风险的相关研究。基于此,本研究拟通过联合胰腺的 CT 形态指标和常见临床特征比较两种机器学习模型预测 T2DM 风险效能,有助于建立高效稳定的影像临床模型。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

回顾性分析 2020 年 1 月至 2023 年 2 月川北医学院进行腹部增强 CT 检查的患者资料,共收集 187 例,包括 T2DM 组( $n = 106$ )和正常对照组(HC 组, $n = 81$ )。根据病程是否大于 5 年将 T2DM 组分为两个亚组<sup>[10]</sup>: T2DM 短病程亚组[男性 28 例,女性 23 例,年龄( $60.33 \pm 11.16$ )岁,病程( $2.62 \pm 1.11$ 年)]和 T2DM 长病程亚组[男性 27 例,女性 28 例,年龄( $65.20 \pm 11.14$ )岁,病程( $10.09 \pm 5.13$ 年)]。CT 检查当天,收集受检者病程、性别、年龄、空腹血糖、糖化血红蛋白、高密度脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)、极低密度脂蛋白(VLDL)、甘油三酯(TG)等临床特征。

T2DM 组纳入标准:根据《中国 2 型糖尿病防治指南》中的诊断标准<sup>[11]</sup>,确诊为 T2DM,即静脉空腹血糖  $> 7.0$  mmol/L,糖负荷后 2 h  $> 11.1$  mmol/L,空

腹血糖  $\geq 7.0$  mmol/L 和(或)餐后 2 h 血糖  $\geq 11.1$  mmol/L。

正常对照组纳入标准:空腹血糖  $< 6.1$  mmol/L 及餐后 2 h 血糖  $< 7.8$  mmol/L 的正常糖耐量者; TG、HDL、LDL、VLDL 等血脂指标均正常。

排除标准:(1)胰腺器质性疾病和胰腺占位性病变,如急、慢性胰腺炎,胰腺肿瘤等;(2)胰腺手术史;(3)1 型糖尿病;(4)胰腺变异。

### 1.2 检查方法

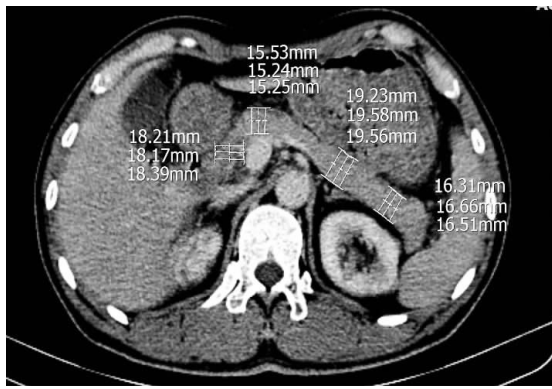
检查前告知受检者相关注意事项,签署知情同意书,所有检查均在医院伦理委员会的监督下进行。检查前对受检者进行屏气训练,并在 6 h 内禁食、禁水,扫描前 0.5 h 饮水 300 mL。行腹部螺旋 CT 平扫,仰卧位,头先进。扫描参数:管电压 120 kV,采用自动 mA 调制技术,设置采集层厚 1 mm,重建层厚 3 mm,重建间隔 3 mm,螺距 0.984 ~ 1.375,视野 45 ~ 50 cm  $\times$  45 ~ 50 cm,矩阵 512  $\times$  512。增强扫描使用非离子型对比剂碘克沙醇 60 ~ 70 mL,高压注射器团注,速率为 2 ~ 3 mL/s,动脉期扫描延迟时间为 26 ~ 30 s,门脉期为 60 ~ 70 s,平衡期为 90 ~ 120 s。

### 1.3 数据测量

在 PACS 上利用直线测量工具对门脉期薄层图像进行测量,分别测量胰头、胰颈、胰体、胰尾直径。见图 1 及图 2。测量标准如下:胰头直径取肠系膜上静脉的右侧垂直连接至胰前缘最宽径;胰颈直径为肠系膜上静脉前方与胰腺长轴相垂直的径线;胰体直径取椎体左缘正前方垂直连接至胰前缘最宽径;胰尾直径在左肾或左肾上腺上极正前方测取<sup>[12]</sup>,测量时避开邻近血管及边缘组织,测量 3 次取平均值。

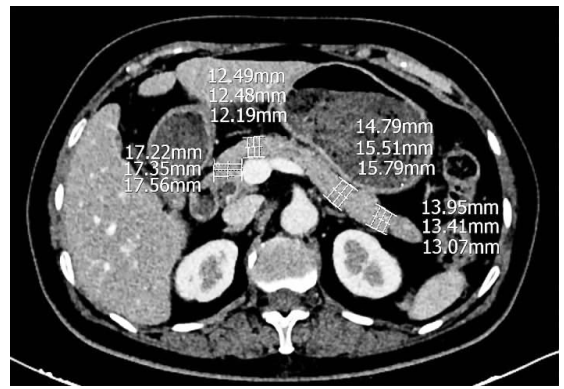
### 1.4 预测模型的构建

数据集以 7:3 比例分为训练集和测试集,训练集 130 例(T2DM 组 74 例,HC 组 56 例),测试集 57 例(T2DM 组 33 例,HC 组 24 例),将两组间差异有统计学意义的指标采用 Logistic 回归和 Bagging 决策树分别建立 T2DM 风险预测模型。绘制出模型的曲线下面积(AUC)、敏感度、特异度、准确度及精确度等参数指标来对模型的预测价值进行评估,通过 Delong 检验对比两种模型 AUC 的差值。



男, 51 岁, 2 型糖尿病 2 年, 胰头、胰颈、胰体、胰尾平均直径测量值分别为 18.26 mm、15.34 mm、19.46 mm、16.49 mm。

图 1 T2DM 短病程亚组胰腺直径测量



女, 67 岁, 2 型糖尿病 7 年, 胰头、胰颈、胰体、胰尾平均直径测量值分别为 17.49 mm、12.66 mm、16.83 mm、13.36 mm。

图 2 T2DM 长病程亚组胰腺直径测量

### 1.5 统计学分析

采用 SPSS 22.0 软件和 R4.1.1 软件进行统计学分析。计量资料符合正态分布使用  $(\bar{x} \pm s)$  进行描述, 组间比较采用独立样本  $t$  检验; 不符合正态分布的资料采用 Mann-Whitney  $U$  检验。对各组间的计量资料进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 Bonferroni 校正的事后两两比较。采用 Spearman 分别分析胰腺头部、颈部、体部、尾部直径与病程、糖化血红蛋白的相关性。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 各组患者一般资料比较

各组间的性别、年龄均无统计学差异 ( $P > 0.05$ )。T2DM 短病程亚组、T2DM 长病程亚组 VLDL、TG 水平均高于 HC 组 ( $P < 0.05$ ); 各组 HDL 水平比较: HC 组  $>$  T2DM 短病程亚组  $>$  T2DM 长病程亚组 ( $P < 0.05$ ), 各组间的 LDL 水平无统计学差异 ( $P > 0.05$ )。见表 1。

表 1 各组间一般资料和临床特征比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

组别	HC 组	T2DM 短病程亚组	T2DM 长病程亚组	$F/t/\chi^2$ 值	$P$ 值
男/女 (例)	35/46	28/23	27/28	0.865	0.423
年龄 (岁)	60.99 ± 13.12	60.33 ± 11.16	65.20 ± 11.14	2.713	0.069
病程 (年)	-	2.62 ± 1.11	10.09 ± 5.13*	-12.391	<0.001
VLDL (mmol/L)	0.71 ± 0.29	1.28 ± 0.29**	1.05 ± 0.50**	24.878	<0.001
TG (mmol/L)	1.25 ± 0.25	4.12 ± 1.03#	1.95 ± 0.09#	38.760	<0.001
LDL (mmol/L)	2.79 ± 0.85	2.62 ± 1.20	1.05 ± 0.97	0.022	0.978
HDL (mmol/L)	1.21 ± 0.28	0.85 ± 0.04#	0.43 ± 0.12*	9.030	<0.001

\*  $P < 0.05$ , 与 T2DM 短病程亚组比较; #  $P < 0.05$ , 与 HC 组比较。

### 2.2 各组间胰腺头颈体尾直径差异

T2DM 长病程亚组的胰头、胰颈、胰体、胰尾直径均低于 T2DM 短病程亚组和 HC 组 ( $P < 0.05$ )。T2DM 短病程亚组胰头、胰体直径小于 HC 组 ( $P < 0.05$ )。T2DM 短病程亚组胰颈、胰尾与 HC 组直径

无统计学差异 ( $P > 0.05$ )。见表 2。

表 2 各组间胰腺头颈体尾直径差异 ( $\bar{x} \pm s$ )

部位	HC 组	T2DM 短病程亚组	T2DM 长病程亚组	$F$ 值	$P$ 值
胰头 (mm)	22.44 ± 2.52	21.12 ± 3.05#	19.10 ± 3.17**	22.146	<0.001
胰颈 (mm)	15.71 ± 2.89	14.95 ± 2.88	13.56 ± 3.09**	8.800	<0.001
胰体 (mm)	19.04 ± 3.63	17.40 ± 3.16**	16.02 ± 3.08**	13.581	<0.001
胰尾 (mm)	14.40 ± 2.72	13.75 ± 2.92	12.59 ± 2.80**	6.859	0.001

\*  $P < 0.05$ , 与 T2DM 短病程亚组比较; #  $P < 0.05$ , 与 HC 组比较。

### 2.3 T2DM 组胰腺头颈体尾直径与病程、糖化血红蛋白的相关性

T2DM 组病程与胰头 ( $r = -0.383, P = 0.001$ )、胰颈 ( $r = -0.266, P = 0.006$ )、胰体 ( $r = -0.203, P = 0.036$ )、胰尾 ( $r = -0.258, P = 0.008$ ) 直径均呈负相关关系。T2DM 组糖化血红蛋白水平与胰头、胰颈、胰体、胰尾直径均无相关性 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 机器学习模型的建立与诊断价值

通过 Bagging 决策树和 Logistic 回归分析分别建立基于胰头、胰颈、胰体、胰尾直径联合临床特征 TG、VLDL 和 HDL 水平的模型。训练集中, Bagging 决策树模型预测效能优于 Logistic 回归模型 ( $P < 0.001$ ), ROC 曲线下面积 (AUC) 分别为 0.962、0.883, 特异度 0.986、0.824, 敏感度 0.790、0.732, 准确度 0.885、0.785。测试集中, Bagging 决策树和 Logistic 回归模型预测效能无统计学差异, AUC 分别为 0.899、0.886, 特异度 0.906、0.680, 敏感度 0.781、0.800。见表 3 及图 3。

表 3 两种模型预测效能及 Delong 检验结果

组别	模型	AUC 值	95% CI	敏感度	特异度	准确度	F1 score	$P$ 值
训练集	Bagging 决策树	0.962	0.933 - 0.990	0.986	0.750	0.885	0.907	<0.001
	Logistic 回归	0.883	0.825 - 0.940	0.824	0.732	0.785	0.813	
测试集	Bagging 决策树	0.899	0.815 - 0.982	0.906	0.680	0.807	0.841	0.644
	Logistic 回归	0.886	0.804 - 0.969	0.781	0.800	0.789	0.806	

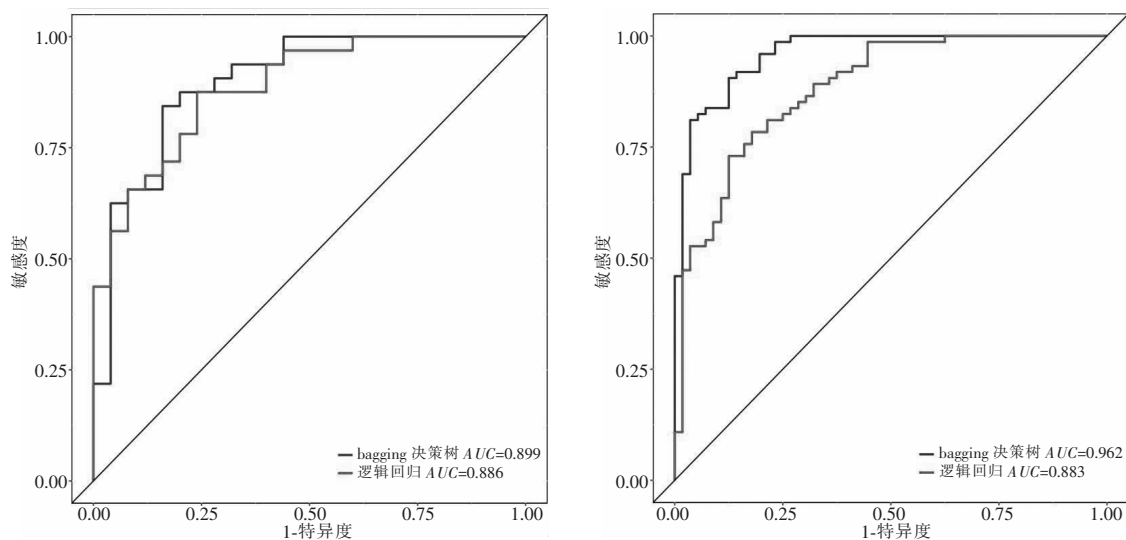


图3 Bagging 决策树和逻辑回归模型训练集、测试集 ROC 曲线比较

A. 训练集的 ROC 曲线; B. 测试集的 ROC 曲线。

### 3 讨论

随着人们生活质量的提升和物质条件的改善, T2DM 发病率越来越高, 随着病程的增加, 远期并发症也越来越严重。因此, 早期预测 T2DM 的发生风险和病程进展, 实现早期预防, 并延缓糖尿病前期转变为糖尿病, 有助于改善 T2DM 患者的生活质量。本研究从影像解剖以及临床指标角度出发, 研究胰腺头颈体尾直径和临床指标与 T2DM 的风险关系, 发现 T2DM 长病程亚组胰腺头部、颈部、体部、尾部直径均小于 T2DM 短病程亚组, 且胰腺头颈体尾直径随着糖尿病病程的延长而减小。本研究结果与既往研究结果一致<sup>[5,13-14]</sup>。金丹等<sup>[5]</sup>发现, T2DM 患者随病程进展胰腺萎缩明显, 胰体比减小。胰腺体积与胰岛素分泌能力密切相关, 胰腺萎缩使胰岛素分泌不足, 进而发展为胰岛素抵抗, 胰岛素抵抗是 T2DM 的主要因素<sup>[7]</sup>。胰头和胰体中储存的  $\beta$  细胞相似, 而糖尿病患者的胰腺头部的胰岛  $\beta$  细胞最先损失<sup>[14]</sup>。随着糖尿病病程进展, T2DM 患者胰岛  $\beta$  细胞缺乏和  $\beta$  细胞凋亡进一步增加<sup>[15]</sup>, 进而导致胰岛素抵抗, 进一步加重了胰腺的萎缩造成胰腺不可逆损害<sup>[2]</sup>。因此, T2DM 和胰腺萎缩存在相互因果关系, 随着病程的进展, 胰腺萎缩越严重, 进一步加重糖尿病病情。

本研究中, T2DM 短病程亚组和 T2DM 长病程亚组的 TG 和 VLDL 水平均高于 HC 组。HC 组 HDL 水平高于 T2DM 短病程亚组, T2DM 短病程亚组 HDL 水平高于 T2DM 长病程亚组。而各组间 LDL 水平无统计学差异。Yang 等<sup>[16-17]</sup>研究表明 T2DM 组 TG、VLDL、TG 和 HDL 比值水平高于 HC 组, 且与 T2DM 的发生风险正相关, 与本研究结果基本一致。

TG 与 VLDL 被认为是预测 T2DM 最有潜在价值的生物学指标, T2DM 发展早期,  $\beta$  细胞通过增加胰岛素分泌、提高基础胰岛素水平和加强肝脏周期来响应肝脏胰岛素抵抗, 而肝脏输出的 VLDL 增加, 同时增加胰腺循环中 TG 水平<sup>[18]</sup>, 脂肪毒性代谢产物将导致易感个体的  $\beta$  细胞功能障碍, 当  $\beta$  细胞失代偿时就会出现 T2DM<sup>[19]</sup>。Steiner 等<sup>[20]</sup>研究表明过量的富含 TG 的 VLDL 颗粒可能通过阻止胰岛素附着到其受体上而损害胰岛素的作用, 导致细胞对胰岛素的反应性降低, 从而降低了胰岛素的利用效率, 所以高水平的 TG 和 VLDL 可能通过增加胰岛素抵抗来增加患 T2DM 的风险。因此, TG 与 VLDL 水平的相互作用可能是 T2DM 的危险因素。

本研究纳入胰腺形态学指标胰腺头、颈、体、尾直径结合 HDL、LDL、VLDL、TG 等临床指标, 通过筛选特征建立 Bagging 决策树和 Logistic 回归 T2DM 风险预测模型, 发现训练集的 Bagging 决策树模型预测效能优于 Logistic 回归模型, AUC 分别为 0.962、0.883, 特异度 0.986、0.824, 敏感度 0.790、0.732, 准确度 0.885、0.785。Joshi 等<sup>[21]</sup>通过收集年龄、体质量指数、血型、血糖和怀孕频率等临床指标建立 T2DM 风险预测模型, 其模型的预测准确率为 77.73%, 蔡晓艺等<sup>[7]</sup>将胰腺细胞外体积分数与标准化碘浓度联合诊断 T2DM 的敏感度、特异度及 AUC 分别为 76.50%、83.30% 及 0.824。本研究通过机器学习方法建立预测 T2DM 风险的 Bagging 决策树模型明显优于既往的常规临床模型, 且精确率与召回率的调和均值为 0.907, 提示机器学习方法有助提高常规临床特征的预测价值。

综上, 糖尿病患者的胰头、颈、体、尾部直径与病程负相关, 基于胰腺形态和临床特征建立的机器学习

习模型具有较高的 T2DM 风险预测效能,有助于早期识别 T2DM。

### 参考文献

[1] Sun H, Saeedi P, Karuranga S, *et al.* IDF Diabetes Atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045 [J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2022, 183: 109119.

[2] Nagaratnam S, Rajoo S, Bidin MBL, *et al.* A cross-sectional study to assess beta-cell function in individuals with recently diagnosed young-onset type 2 diabetes mellitus and its' complications [J]. *Journal of the ASEAN Federation of Endocrine Societies*, 2023, 38 (2): 20 - 27.

[3] Wigger L, Barovic M, Brunner AD, *et al.* Multi-omics profiling of living human pancreatic islet donors reveals heterogeneous beta cell trajectories towards type 2 diabetes [J]. *Nature Metabolism*, 2021, 3 (7): 1017 - 1031.

[4] 张贤梅, 孙勤国, 谢谢, 等. 低剂量多次链脲佐菌素诱导 2 型糖尿病及其并发症模型的建立及评价 [J]. *海南医学院学报*, 2020, 26 (11): 820 - 824.

[5] 金丹, 于建忠, 张海军, 等. 初诊 2 型糖尿病患者胰腺体积变化特点及与疾病预后的相关性研究 [J]. *临床内科杂志*, 2023, 40 (11): 750 - 753.

[6] 王琳霞, 张小明, 李文波. 影像技术在胰腺脂肪浸润与 2 型糖尿病相关性研究中的应用进展 [J]. *国际医学放射学杂志*, 2022, 45 (3): 327 - 331.

[7] 蔡晓艺, 季旸, 王国华, 等. 双能量 CT 测量胰腺细胞外体积分数及标准化碘浓度评估 2 型糖尿病 [J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39 (3): 385 - 388.

[8] 刘念, 黄小华, 杨雄雄, 等. 胰胆管汇合类型和夹角与复发性急性胰腺炎的相关性研究 [J]. *实用放射学杂志*, 2020, 36 (8): 1253 - 1256.

[9] Yuan S, Larsson SC. An atlas on risk factors for type 2 diabetes: a wide-angled Mendelian randomisation study [J]. *Diabetologia*, 2020, 63 (11): 2359 - 2371.

[10] Zhao Y, Liu L, Zuo L, *et al.* A novel risk score model for the differential diagnosis of type 2 diabetic nephropathy: a multicenter study [J]. *Journal of Diabetes Research*, 2023, 2023: 5514767.

[11] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南 (2020 年版) (上) [J]. *中国实用内科杂志*, 2021, 41 (8): 668 - 695.

[12] Lu J, Guo M, Wang H, *et al.* Association between pancreatic atrophy and loss of insulin secretory capacity in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. *Journal of Diabetes Research*, 2019, 2019: 6371231.

[13] 王嵩, 赵殿辉, 许骅. 胰腺形态和密度的 CT 评价及临床相关性的研究 [J]. *医学影像学杂志*, 2001, 11 (6): 349 - 351.

[14] Wang X, Misawa R, Zielinski MC, *et al.* Regional differences in islet distribution in the human pancreas—preferential beta-cell loss in the head region in patients with type 2 diabetes [J]. *PLoS One*, 2013, 8 (6): e67454.

[15] Khin PP, Lee JH, Jun HS. Pancreatic beta-cell dysfunction in type 2 diabetes [J]. *European Journal of Inflammation*, 2023, 21.

[16] Yang T, Liu Y, Li L, *et al.* Correlation between the triglyceride-to-high-density lipoprotein cholesterol ratio and other unconventional lipid parameters with the risk of prediabetes and type 2 diabetes in patients with coronary heart disease: a RCSCD-TCM study in China [J]. *Cardiovascular Diabetology*, 2022, 21 (1): 93.

[17] Jasim OH, Mahmood MM, Ad'hiah AH. Significance of lipid profile parameters in predicting pre-diabetes [J]. *Archives of Razi Institute*, 2022, 77 (1): 277 - 284.

[18] Adiels M, Olofsson SO, Taskinen MR, *et al.* Overproduction of very low-density lipoproteins is the hallmark of the dyslipidemia in the metabolic syndrome [J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2008, 28 (7): 1225 - 1236.

[19] Al-Mrabeh A. Pathogenesis and remission of type 2 diabetes: what has the twin cycle hypothesis taught us? [J]. *Cardiovascular Endocrinology & Metabolism*, 2020, 9 (4): 132 - 142.

[20] Steiner G, Vranic M. Hyperinsulinemia and hypertriglyceridemia, a vicious cycle with atherogenic potential [J]. *International Journal of Obesity*, 1982, 6 (Suppl 1): 117 - 124.

[21] Joshi RD, Dhakal CK. Predicting type 2 diabetes using logistic regression and machine learning approaches [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (14): 7346.

(收稿日期: 2024 - 06 - 22

修回日期: 2024 - 09 - 12)