·论著·



本文亮点：

(1) 运用多因素logistic回归模型、限制性立方样条模型，筛选出糖尿病足溃疡（DFU）复发的独立危险因素，明确住院期间糖化血红蛋白水平≥9.0%时DFU复发风险明显增加。

(2) 构建贝叶斯网络模型，系统揭示了影响DFU复发的各因素间直接与间接关联网络，并进行模型推理。

Highlights:

(1) Multivariable logistic regression and restricted cubic spline models were applied to identify independent risk factors for diabetic foot ulcer (DFU) recurrence, and it was confirmed that the risk of DFU recurrence increased significantly when glycated hemoglobin was ≥9.0% during hospitalization.

(2) A Bayesian network model was constructed to systematically elucidate the network of direct and indirect associations among multiple factors affecting DFU recurrence, and the model inference was performed.

糖尿病足溃疡复发的影响因素分析及其贝叶斯网络模型的构建

马海荣[1]　郑丽然[2]　陈佳庚[3]　许雯艳[4]　崔雪灿[1]　王帅[2]　常柏[2]　王美君[2]

[1]天津中医药大学护理学院，天津　301617；[2]天津医科大学朱宪彝纪念医院糖尿病足科、天津市内分泌研究所、国家卫健委激素与发育重点实验室、天津市代谢性疾病重点实验室，天津　300134；[3]天津医科大学人事处，天津　301617；[4]天津医科大学护理学院，天津　301617

通信作者：王美君，Email：0532022@163.com

【摘要】　目的　探讨DFU复发的影响因素，构建预测糖尿病足溃疡（DFU）复发的贝叶斯网络模型，分析各影响因素间的关系及其对DFU复发的影响程度。　**方法**　该研究为回顾性队列研究。2016年4月—2020年4月，天津医科大学朱宪彝纪念医院糖尿病足科收治1 656例符合入选标准的住院DFU患者，其中男1 127例、女529例，年龄18~80岁。根据出院后5年内DFU复发情况，将患者分为复发组（552例）和未复发组（1 104例）。比较2组患者的性别，糖尿病病程、视网膜病变情况、溃疡部位、足部畸形、足截肢史，入院当天身体质量指数（BMI）、收缩压及D-二聚体、纤维蛋白原、总胆固醇、低密度脂蛋白（LDL）水平，住院期间糖化血红蛋白（HbA1c）水平，降糖方案、使用阿司匹林和他汀类药物情况。通过多因素logistic回归模型筛选影响患者DFU复发的独立危险因素；采用限制性立方样条模型分析在调整协变量后住院期间HbA1c水平与DFU复发的剂量-反应关系；构建预测DFU复发的贝叶斯网络模型，分析各影响因素间的关系及其对DFU复发的影响程度。绘制受试者操作特征（ROC）曲线评估贝叶斯网络模型对DFU复发的预测效能。　**结果**　2组患者性别、视网膜病变情况、

DOI：10.3760/cma.j.cn501225-20250805-00347

收稿日期　2025-08-05

引用本文：马海荣, 郑丽然, 陈佳庚, 等. 糖尿病足溃疡复发的影响因素分析及其贝叶斯网络模型的构建[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(11): 1-9. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20250805-00347.

Ma Hairong, Zheng Liran, Chen Jiageng, et al. Analysis of influencing factors of diabetic foot ulcer recurrence and construction of the Bayesian network model[J]. Chin J Burns Wounds, 2026, 42(11): 1-9. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20250805-00347.

溃疡部位、足部畸形、足截肢史、降糖方案、使用阿司匹林和他汀类药物情况（χ^2分别为 5.87、6.14、24.97、159.63、4.03、39.07、26.60、4.69，P<0.05），糖尿病病程，入院当天 BMI、收缩压和 D-二聚体、纤维蛋白原、总胆固醇、LDL 水平及住院期间 HbA1c 水平（Z 值分别为−7.20、−6.14、−5.57、−2.24、−9.09、−2.08、−7.74、−11.32，P<0.05）比较，差异均有统计学意义。多因素 logistic 回归分析显示，入院当天 BMI、收缩压、纤维蛋白原水平、LDL 水平，住院期间 HbA1c 水平，糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形，注射胰岛素、口服降糖药物+胰岛素等降糖方案，以及使用阿司匹林是 DFU 患者复发的独立危险因素（OR 分别为 1.06、1.01、1.31、1.47、1.19、1.04、1.71、6.59、1.82、1.60、1.85，95%CI 分别为 1.03~1.10、1.01~1.02、1.21~1.43、1.29~1.68、1.13~1.26、1.03~1.06、1.26~2.31、4.67~9.38、1.19~2.80、1.18~2.16、1.45~2.38）。限制性立方样条模型显示，调整协变量后，DFU 患者住院期间 HbA1c 水平≥9.0% 与 DFU 复发风险存在非线性剂量-反应关系（χ^2=15.01，P<0.05）。构建的贝叶斯网络模型由 10 个节点、14 条有向边组成，溃疡部位、使用阿司匹林情况、足部畸形、入院当天 LDL 水平和 BMI 与 DFU 复发直接相关；足部畸形对 DFU 复发的影响最大，其次是溃疡部位和使用阿司匹林情况。贝叶斯网络模型的 ROC 曲线下面积为 0.74（95%CI 为 0.70~0.78）。 **结论** 入院当天 BMI、收缩压及纤维蛋白原、LDL 水平，住院期间 HbA1c 水平，糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形，以及降糖方案、使用阿司匹林情况是患者 DFU 复发的独立危险因素，溃疡部位、使用阿司匹林情况、足部畸形、入院当天 LDL 水平和 BMI 与 DFU 复发直接相关。

【关键词】 糖尿病足； 溃疡； 复发； 影响因素分析； 贝叶斯网络； 限制性立方样条

基金项目：国家自然科学基金面上项目（81973614）；天津医科大学护理学科提升计划—科研专项基金（2024XKHL18）

Analysis of influencing factors of diabetic foot ulcer recurrence and construction of the Bayesian network model

Ma Hairong[1], Zheng Liran[2], Chen Jiageng[3], Xu Wenyan[4], Cui Xuecan[1], Wang Shuai[2], Chang Bai[2], Wang Meijun[2]

[1]School of Nursing, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; [2]National Health Commission Key Lab of Hormones and Development and Tianjin Key Lab of Metabolic Diseases, Diabetic Podiatry Department, Tianjin Medical University Chu Hsien-I Memorial Hospital & Institute of Endocrinology, Tianjin 300134, China; [3]Department of Human Resources, Tianjin Medical University, Tianjin 301617, China; [4]School of Nursing, Tianjin Medical University, Tianjin 301617, China

Corresponding author: Wang Meijun, Email: 0532022@163.com

【Abstract】 **Objective** To explore the influencing factors of diabetic foot ulcer (DFU) recurrence, construct the Bayesian network model for predicting DFU recurrence, and investigate the interrelationships among these influencing factors and their effects on DFU recurrence. **Methods** This study was a retrospective cohort study. From April 2016 to April 2020, 1 656 hospitalized DFU patients who met the inclusion criteria were admitted to the Diabetic Podiatry Department of Tianjin Medical University Chu Hsien-I Memorial Hospital, including 1 127 males and 529 females, aged 18−80 years. According to DFU recurrence status within 5 years after discharge, the patients were divided into recurrence group (552 cases) and non-recurrence group (1 104 cases). The following indicators were compared between the two groups, including gender, duration of diabetes, retinopathy status, ulcer location, foot deformity, history of foot amputation, body mass index (BMI), systolic blood pressure, levels of D-dimer, fibrinogen, total cholesterol, and low-density lipoprotein (LDL) on the day of admission, level of glycated hemoglobin A1c (HbA1c) during hospitalization, hypoglycemic regimen, and use of aspirin and statins. A multivariate logistic regression model was used to identify independent risk factors for DFU recurrence. A restricted cubic spline model was applied to analyze the dose-response relationship between level of HbA1c during hospitalization and DFU recurrence after adjusting covariates. A Bayesian network model for predicting DFU recurrence was established to analyze the interrelationships among these influencing factors and their effects on DFU recurrence. The receiver operating characteristic (ROC) curve was plotted to evaluate the predictive performance of the Bayesian network model for DFU recurrence. **Results** There were statistically significant differences between the two groups of patients in gender, retinopathy status, ulcer location, foot deformity, history of foot amputation, hypoglycemic regimen, and use of aspirin and statins (with χ^2 values of 5.87, 6.14, 24.97, 159.63, 4.03, 39.07, 26.60, and 4.69, respectively, P<0.05), as well as duration of diabetes, BMI, systolic blood

pressure, and levels of D-dimer, fibrinogen, total cholesterol, and LDL on the day of admission, and level of HbA1c during hospitalization (with Z values of −7.20, −6.14, −5.57, −2.24, −9.09, −2.08, −7.74, and −11.32, respectively, P<0.05). Multivariate logistic regression analysis showed that BMI, systolic blood pressure, levels of fibrinogen and LDL on the day of admission, level of HbA1c during hospitalization, duration of diabetes, ulcer location, foot deformity, hypoglycemic regimens of injecting insulin and oral hypoglycemic agents + injecting insulin, and use of aspirin were the independent risk factors for DFU recurrence (with OR values of 1.06, 1.01, 1.31, 1.47, 1.19, 1.04, 1.71, 6.59, 1.82, 1.60, and 1.85, respectively, 95%CI of 1.03−1.10, 1.01−1.02, 1.21−1.43, 1.29−1.68, 1.13−1.26, 1.03−1.06, 1.26−2.31, 4.67−9.38, 1.19−2.80, 1.18−2.16, and 1.45−2.38, respectively, P<0.05). Restricted cubic spline model showed a non-linear dose-response relationship between level of HbA1c ⩾9.0% during hospitalization and DFU recurrence risk after adjusting covariates (χ^2=15.01, P<0.05). The constructed Bayesian network model consisted of 10 nodes and 14 directed edges. The model demonstrated that ulcer location, use of aspirin, foot deformity, and levels of LDL and BMI on the day of admission were directly associated with DFU recurrence; foot deformity posed the greatest risk for DFU recurrence, followed by ulcer location and use of aspirin. The area under the ROC curve for the Bayesian network model was 0.74 (95%CI of 0.70−0.78). **Conclusions** The BMI, systolic blood pressure, levels of fibrinogen and LDL on the day of admission, level of HbA1c during hospitalization, duration of diabetes, ulcer location, foot deformity, hypoglycemic regimens, and use of aspirin were the independent risk factors for DFU recurrence. The ulcer location, use of aspirin, foot deformity, and levels of LDL and BMI on the day of admission were directly associated with DFU recurrence.

【**Key words**】 Diabetic foot; Ulcer; Recurrence; Root cause analysis; Bayesian network; Restricted cubic spline

Fund program: General Program of National Natural Science Foundation of China (81973614); Special Scientific Research Fund of Nursing Discipline Promotion Program of Tianjin Medical University (2024XKHL18)

糖尿病足溃疡(diabetic foot ulcers,DFU)因治疗过程复杂、致残与致死风险高、医疗支出庞大以及预后效果不理想等特点而备受关注[1-2]。流行病学调查数据显示,DFU的复发概率接近60%[3],且复发患者遭遇截肢乃至生命威胁的风险显著提升[4-5],导致患者的经济负担持续加重[6]。2025版《中国糖尿病足防治实践指南》的统计数据显示,DFU的复发比例呈现逐年攀升态势[7-8]。尽管及时管控多重风险因素是预防DFU复发的核心环节,但创面愈合后预防复发的措施往往未能得到充分重视。研究表明,DFU复发的影响因素包括糖尿病病程、糖化血红蛋白(glycated hemoglobin,HbA1c)、降糖用药等[9-11],但对于各因素间的相互作用机制仍缺乏系统性的研究。本课题组前期研究因受限于样本规模较小,未能对这些影响因素进行依赖关系与因果链条的深入分析[12-15]。此外,界定DFU复发对应的HbA1c阈值,仍是当前亟待解决的关键问题[16-17]。在流行病学研究领域,贝叶斯网络凭借其能够精准识别变量间复杂依赖关系并实现因果推理的优势,已获得广泛应用[18-19]。该模型通过有向无环图直观呈现变量间的依赖特性,对影响因子的内在作用机制具有突出的解释效能[20-21]。基于此,本研究通过扩大样本量进一步探讨HbA1c水平与DFU复发风险的剂量-反应关系并构建贝叶斯网络模型,致力于分析DFU复发的影响因素,为临床建立系统的DFU预防方案提供科学依据,期望有助于提升患者生活质量、降低医疗成本。

1　对象与方法

1.1　伦理审批

本回顾性队列研究经天津医科大学朱宪彝纪念医院伦理委员会审查并通过,伦理批件号:DXBYYhMEC2016-20。

1.2　入选标准

纳入标准:(1)符合世界卫生组织(1999年)制订的糖尿病诊断标准的患者;(2)符合糖尿病足工作组2019年制订的DFU的诊断标准[22]的患者;(3)Wagner 2~4级的DFU住院患者;(4)年龄18~80岁。排除标准:(1)拒绝随访的患者;(2)随访期间死亡的患者;(3)病例资料不完善的患者。

1.3　一般资料及数据收集

2016年4月—2020年4月,天津医科大学朱宪彝纪念医院糖尿病足科收治1 656例符合入选标准的住院DFU患者,其中男1 127例、女529例,年龄18~80岁。根据出院后5年内DFU复发情况,将患者分为复发组(552例)和非复发组(1 104例)。

溃疡愈合定义为既往足溃疡创面处皮肤恢复完整，即创面完全上皮化且无任何渗出液[23]。溃疡复发定义为既往有足溃疡史的患者出现新的足溃疡，不论这次溃疡发生的部位是否与上次相同及2次溃疡出现的时间相隔多久[22,24]。

自患者出院后由经统一培训的临床医务人员进行电话随访，1年内随访时间为出院后1、3、6、12个月，之后每年进行1次随访，随访期限为5年，记录患者溃疡是否复发、复发具体部位等情况。

基于健康生态学模型并结合既往文献[9-11]，收集患者以下四类资料。(1)一般资料：年龄、性别及入院当天身体质量指数(body mass index，BMI)、收缩压、舒张压。(2)糖尿病及足部疾病特征：糖尿病病程、糖尿病肾病、视网膜病变、Wagner分级、下肢动脉疾病、周围神经病变、溃疡部位、足部畸形、足截肢史及入院当天踝肱指数。(3)实验室指标：住院期间HbA1c水平及入院当天尿素氮、D-二聚体、纤维蛋白原、24 h微量白蛋白、24 h尿蛋白、甘油三酯、总胆固醇、低密度脂蛋白(low-density lipoprotein，LDL)、高密度脂蛋白(high-density lipoprotein，HDL)、血肌酐水平。(4)用药情况：使用阿司匹林和他汀类药物情况、降糖方案(口服降糖药物、注射胰岛素、口服降糖药物+胰岛素)。

1.4 统计学处理

采用SPSS 21.0软件及R语言4.5.0进行数据处理。符合正态分布的计量资料数据以$\bar{x} \pm s$表示，2组间比较采用t检验；非正态分布的计量资料数据以$M(Q_1, Q_3)$表示，2组间比较采用Mann-Whitney U检验。计数资料数据以例数表示，2组间比较采用χ^2检验。将2组间比较差异有统计学意义的指标作为自变量，进行多因素logistic回归分析，筛选DFU复发的独立危险因素。以上检验均为双侧检验，$P<0.05$为差异有统计学意义。使用“rms”程序包绘制限制性立方样条模型[25]，将1 656例患者住院期间的HbA1c水平人为设定的第25、50、75百分位数处(分别为6.9、9.0、12.0%)作为样条节点，以9.0%作为参考($OR=1.0$)，在调整协变量(包括入院当天BMI、收缩压、纤维蛋白原水平、LDL水平和糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形、降糖方案、使用阿司匹林情况)后，建模并绘制住院期间HbA1c水平与DFU复发的关系的限制性立方样条曲线($P>0.05$表示存在近似线性关系，$P<0.05$表示存在非线性关系)。采用GeNIe5.0软件进行贝叶斯网络模型的构建和推理，模型的结构学习使用最大最小爬山算法，参数学习采用极大似然法，模型拟合通过贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion，BIC)和对数似然函数值(log-likelihood，LL)进行评估；模型的影响因素通过敏感性分析来增强结果的稳健性；模型的推理可通过点击相应节点添加证据对DFU患者复发进行概率预测。绘制受试者操作特征(receiver operating characteristic，ROC)曲线评估贝叶斯网络模型对DFU复发的预测效能。

2 结果

2.1 一般资料

2组患者性别，入院当天BMI、收缩压及D-二聚体、纤维蛋白原、总胆固醇、LDL水平，糖尿病病程、视网膜病变情况、溃疡部位、足部畸形、足截肢史，住院期间HbA1c水平，降糖方案、使用阿司匹林和他汀类药物情况比较，差异均有统计学意义($P<0.05$)；2组患者其余指标比较，差异均无统计学意义($P>0.05$)，见表1。

2.2 DFU复发的多因素logistic回归分析

以性别，入院当天BMI、收缩压及D-二聚体、纤维蛋白原、总胆固醇、LDL水平，糖尿病病程、视网膜病变、溃疡部位、足部畸形、足截肢史，住院期间HbA1c水平，以及降糖方案、使用阿司匹林和他汀类药物情况作为自变量，进行多因素logistic回归分析。结果显示，入院当天BMI、收缩压及纤维蛋白原、LDL水平，糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形，住院期间HbA1c水平，以及降糖方案、使用阿司匹林情况是患者DFU复发的独立危险因素($P<0.05$)，见表2。

2.3 HbA1c水平与DFU复发风险的剂量-反应关系

调整协变量后，DFU患者住院期间HbA1c水平≥9.0%与DFU复发风险存在非线性剂量-反应关系($\chi^2=15.01$，$P<0.001$)。见图1。

2.4 DFU复发的贝叶斯网络模型

将多因素logistic回归分析筛选出的DFU复发的独立危险因素用于构建贝叶斯网络模型，基于BIC从候选网络中筛选得到最优贝叶斯网络结构模型，模型BIC评分为−12 671.8；经期望最大化(expectation maximization)算法迭代收敛后，模型LL为−12 462，对数据的拟合效果良好。构建的贝叶斯网络模型由10个节点、14条有向边组成，其中使用

表 1　2组糖尿病足溃疡患者一般资料比较

Table 1　Comparison of general data of patients with diabetic foot ulcers between the two groups

组别	例数	年龄[岁，$M(Q_1,Q_3)$]	性别(例)		BMI[kg/m^2，$M(Q_1,Q_3)$]	收缩压[mmHg，$M(Q_1,Q_3)$]	舒张压[mmHg，$M(Q_1,Q_3)$]
			男	女			
复发组	552	64.00(56.25,69.00)	354	198	26.2(23.6,28.9)	140(130,155)	79(70,81)
非复发组	1 104	64.00(55.00,71.00)	773	331	24.8(22.3,27.4)	135(125,149)	80(70,83)
统计量值		Z=−0.57	χ^2=5.87		Z=−6.14	Z=−5.57	Z=−0.74
P值		0.570	0.009		0.001	0.001	0.458

组别	例数	糖尿病病程[年，$M(Q_1,Q_3)$]	糖尿病肾病(例)		视网膜病变(例)		Wagner分级(例)			下肢动脉疾病(例)	
			无	有	无	有	2级	3级	4级	有	无
复发组	552	17(11,23)	272	280	228	324	185	178	189	506	46
非复发组	1 104	13(8,20)	591	513	527	577	363	368	373	1 023	81
统计量值		Z=−7.20	χ^2=5.07		χ^2=6.14		χ^2=0.20			χ^2=0.71	
P值		0.001	0.408		0.014		0.263			0.451	

组别	例数	周围神经病变(例)		溃疡部位(例)		足部畸形(例)		踝肱指数	足截肢史(例)	
		有	无	足底	非足底	有	无		有	无
复发组	552	544	8	143	409	180	372	0.90±0.29	250	302
非复发组	1 104	1 081	23	173	931	91	1 013	0.92±0.42	443	661
统计量值		χ^2=0.81		χ^2=24.97		χ^2=159.63		t=1.13	χ^2=4.03	
P值		0.369		0.001		0.001		0.262	0.045	

组别	例数	HbA1c[%，$M(Q_1,Q_3)$]	尿素氮[mmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]	D-二聚体[mg/L，$M(Q_1,Q_3)$]	纤维蛋白原[g/L，$M(Q_1,Q_3)$]	24 h微量白蛋白[mg，$M(Q_1,Q_3)$]
复发组	552	10.0(8.6,11.4)	6.0(4.6,7.4)	0.58(0.35,1.06)	4.44(3.62,5.43)	80.5(17.0,300.0)
非复发组	1 104	8.5(7.2,10.2)	5.8(4.5,7.6)	0.62(0.39,1.11)	3.78(2.85,5.01)	74.4(17.5,300.0)
统计量值		Z=−11.32	Z=−0.95	Z=−2.24	Z=−9.09	Z=−0.04
P值		0.001	0.342	0.025	0.001	0.964

组别	例数	24 h尿蛋白[g，$M(Q_1,Q_3)$]	甘油三酯[mmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]	总胆固醇[mmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]	LDL[mmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]	HDL[mmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]
复发组	552	0.25(0.10,1.66)	1.24(0.96,1.73)	4.39(3.71,5.20)	3.31(2.74,3.93)	0.95(0.79,1.12)
非复发组	1104	0.23(0.10,1.27)	1.28(0.98,1.74)	4.31(3.52,5.17)	2.87(2.29,3.62)	0.93(0.78,1.11)
统计量值		Z=−1.06	Z=−0.67	Z=−2.08	Z=−7.74	Z=−1.64
P值		0.288	0.505	0.038	0.001	0.103

组别	例数	血肌酐[μmol/L，$M(Q_1,Q_3)$]	降糖方案(例)			使用阿司匹林(例)		使用他汀类药物(例)	
			口服降糖药物	注射胰岛素	口服降糖药物+注射胰岛素	有	无	有	无
复发组	552	72.3(58.7,91.3)	106	82	364	287	265	228	324
非复发组	1 104	71.4(58.7,91.3)	374	122	608	427	677	518	586
统计量值		Z=−0.39	χ^2=39.07			χ^2=26.60		χ^2=4.69	
P值		0.695	0.001			0.001		0.032	

注：复发指出院后5年内糖尿病足溃疡复发；除糖化血红蛋白(HbA1c)为住院期间的水平，其他检测指标均为入院当天的水平；BMI为身体质量指数，LDL为低密度脂蛋白，HDL为高密度脂蛋白；1 mmHg=0.133 kPa

阿司匹林情况、溃疡部位、足部畸形、入院当天LDL和BMI与DFU复发直接相关，其余因素与DFU复发间接相关；足部畸形对DFU复发影响最大，其次是溃疡部位和使用阿司匹林。敏感性分析结果与上述结论一致。见图2。

2.5　贝叶斯网络模型的推理

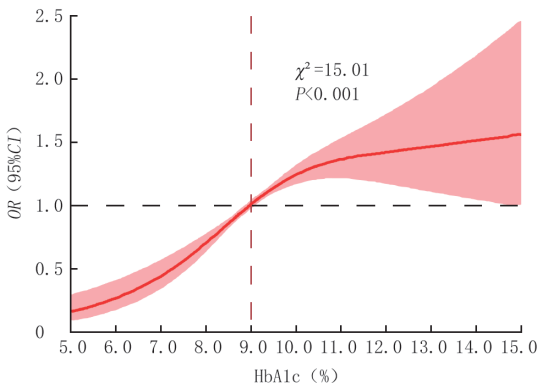
在模型中点击相应节点，如在不考虑其他因素（入院当天收缩压、纤维蛋白原水平、LDL水平及使用阿司匹林、溃疡部位、降糖方案）的情况下，点击住院期间HbA1c水平≥9.0%、糖尿病病程10~19年、

表 2　1 656 例患者 DFU 复发的多因素 logistic 回归分析结果

Table 2　Multivariate logistic regression analysis of DFU recurrence in 1 656 patients

因素	*OR*	95%*CI*	*P* 值
性别	1.00	0.77~1.31	0.984
入院当天 BMI(kg/m²)	1.06	1.03~1.10	<0.001
入院当天收缩压(mmHg)	1.01	1.01~1.02	0.002
糖尿病病程(年)	1.04	1.03~1.06	<0.001
视网膜病变(以无视网膜病变为参照)	1.09	0.85~1.41	0.494
溃疡部位(以非足底为参照)	1.71	1.26~2.31	<0.001
足部畸形(以无足部畸形为参照)	6.59	4.67~9.38	<0.001
足截肢史(以无截肢史为参照)	0.90	0.69~1.16	0.413
住院期间 HbA1c 水平(%)	1.19	1.13~1.26	<0.001
入院当天纤维蛋白原水平(g/L)	1.31	1.21~1.43	<0.001
入院当天 LDL 水平(mmol/L)	1.47	1.29~1.68	<0.001
降糖方案(以口服降糖药物为参照)			
注射胰岛素	1.82	1.19~2.80	<0.001
口服降糖药物+胰岛素	1.60	1.18~2.16	<0.001
使用阿司匹林(以未使用阿司匹林为参照)	1.85	1.45~2.38	<0.001

注：BMI 为身体质量指数，HbA1c 为糖化血红蛋白，LDL 为低密度脂蛋白；1 mmHg=0.133 kPa



注：红色虚线表示参考线，红色实线表示 *OR*，红色区域表示 95%*CI*，黑色虚线对应 *OR* 为 1.0；调整的协变量包括入院当天身体质量指数、收缩压、纤维蛋白原水平、低密度脂蛋白水平及糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形、降糖方案、使用阿司匹林情况；HbA1c 为糖化血红蛋白

图 1　1 656 例患者住院期间 HbA1c 水平与糖尿病足溃疡复发的关系限制性立方样条曲线

Figure 1　Restricted cubic spline curve showing the association between the level of HbA1c during hospitalization and diabetic foot ulcer recurrence in 1 656 patients

有足部畸形、入院当天 BMI 为>24.9~29.9 kg/m²时，患者 DFU 复发的风险概率为 73%，见图 3。

2.6　贝叶斯网络模型对 DFU 复发的预测效能

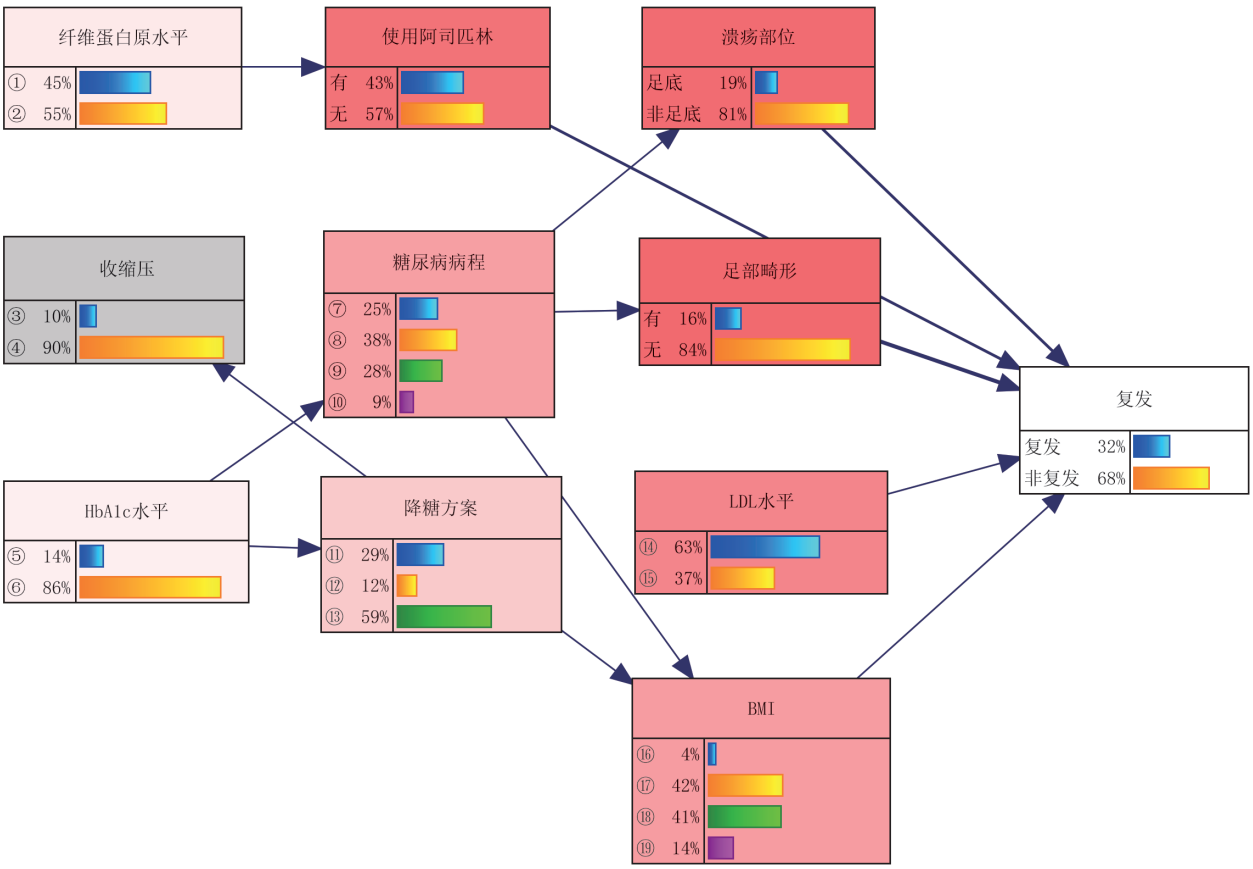
贝叶斯网络模型的 ROC 曲线下面积为 0.74（95%*CI* 为 0.70~0.78），说明模型对 DFU 复发具有一定的预测价值，见图 4。

3　讨论

糖尿病足溃疡是糖尿病严重的并发症之一。DFU 的复发涉及多方面的影响因素[26-27]，本研究中多因素 logistic 回归分析结果显示，入院当天 BMI、收缩压及纤维蛋白原、LDL 水平，住院期间 HbA1c 水平，糖尿病病程、溃疡部位、足部畸形，以及降糖方案、使用阿司匹林是 DFU 复发的独立危险因素。本研究中限制性立方样条模型显示住院期间 HbA1c≥9.0% 会增加 DFU 复发的风险，与王银荣等[17]的研究结果一致，可能是 HbA1c 水平影响组织修复，导致 DFU 愈合困难，从而使 DFU 复发风险升高。

本研究构建的贝叶斯网络模型直观展示了变量间的因果关系，BIC 评分和期望最大化算法计算的 LL 表明模型拟合效果较好[18]。本研究构建的贝叶斯网络模型显示溃疡部位、使用阿司匹林情况、入院当天 BMI 和 LDL、足部畸形与 DFU 复发直接相关，其余因素与 DFU 复发间接相关，且足部畸形对 DFU 复发影响最大。糖尿病病程长（>10 年）已被确认为 DFU 复发的独立危险因素[10]，这与慢性高血糖对神经血管系统的累积损伤密切相关。在降糖治疗方面，口服降糖药物与胰岛素联合应用的患者，其 DFU 复发风险是采用其他治疗方案患者的 3.4 倍[28]，可能反映采用该方案的患者胰岛功能衰竭更严重或面临更严峻的血糖管理挑战。多项研究表明，HbA1c 水平>7.5% 的患者 DFU 复发风险是其他患者的 4.1 倍[29]。此外，有研究表明，纤维蛋白原水平与 DFU 的严重程度（Wagner 分级≥2 级）呈正相关[29-31]，这种相关性可能提示纤维蛋白原参与创面局部炎症，影响血液高凝状态及组织损伤过程。也有关于 BMI 与 DFU 复发关联的研究，例如在苏丹的一项研究中，超重患者（BMI≥25 kg/m²）的 DFU 患病率为 56%，而非超重患者（BMI<25 kg/m²）的 DFU 患病率为 46%[32]，低体重人群（BMI<18.5 kg/m²）可能由于营养不良、代谢异常导致 DFU 的发生[33]。此外，收缩压升高（≥120 mmHg）虽未达到高血压诊断标准，但其持续性增高可能导致血管弹性下降、内皮功能受损，进而损害足部血流灌注，增加局部组织缺血缺氧的风险，从而为 DFU 复发创造条件[16]。因此，尽早对这些因素进行干预，能有效降低 DFU 复发风险。

此外，本研究构建的贝叶斯网络模型在因果推



注：复发指出院后5年内糖尿病足溃疡复发；每个节点对应的百分比为患者占比；线条越粗代表对DFU复发的影响越大；颜色越红代表该因素对DFU复发的敏感性越高；①、②分别表示入院当天纤维蛋白原水平2.0~4.0 g/L、<2.0或>4.0 g/L，③、④分别表示入院当天收缩压<120 mmHg（1 mmHg=0.133 kPa）、≥120 mmHg，⑤、⑥分别表示住院期间糖化血红蛋白（HbA1c）水平<9.0%、≥9.0%，⑦、⑧、⑨、⑩分别表示糖尿病病程<10年、10~19年、>19~29年、>29年，⑪、⑫、⑬分别表示降糖方案中口服降糖药、胰岛素、口服降糖药+胰岛素，⑭、⑮分别表示入院当天低密度脂蛋白（LDL）水平<3.4 mmol/L、≥3.4 mmol/L，⑯、⑰、⑱、⑲分别表示入院当天身体质量指数（BMI）<18.5 kg/m^2、18.5~24.9 kg/m^2、>24.9~29.9 kg/m^2、>29.9 kg/m^2

图2　预测1 656例患者糖尿病足溃疡复发的贝叶斯网络模型

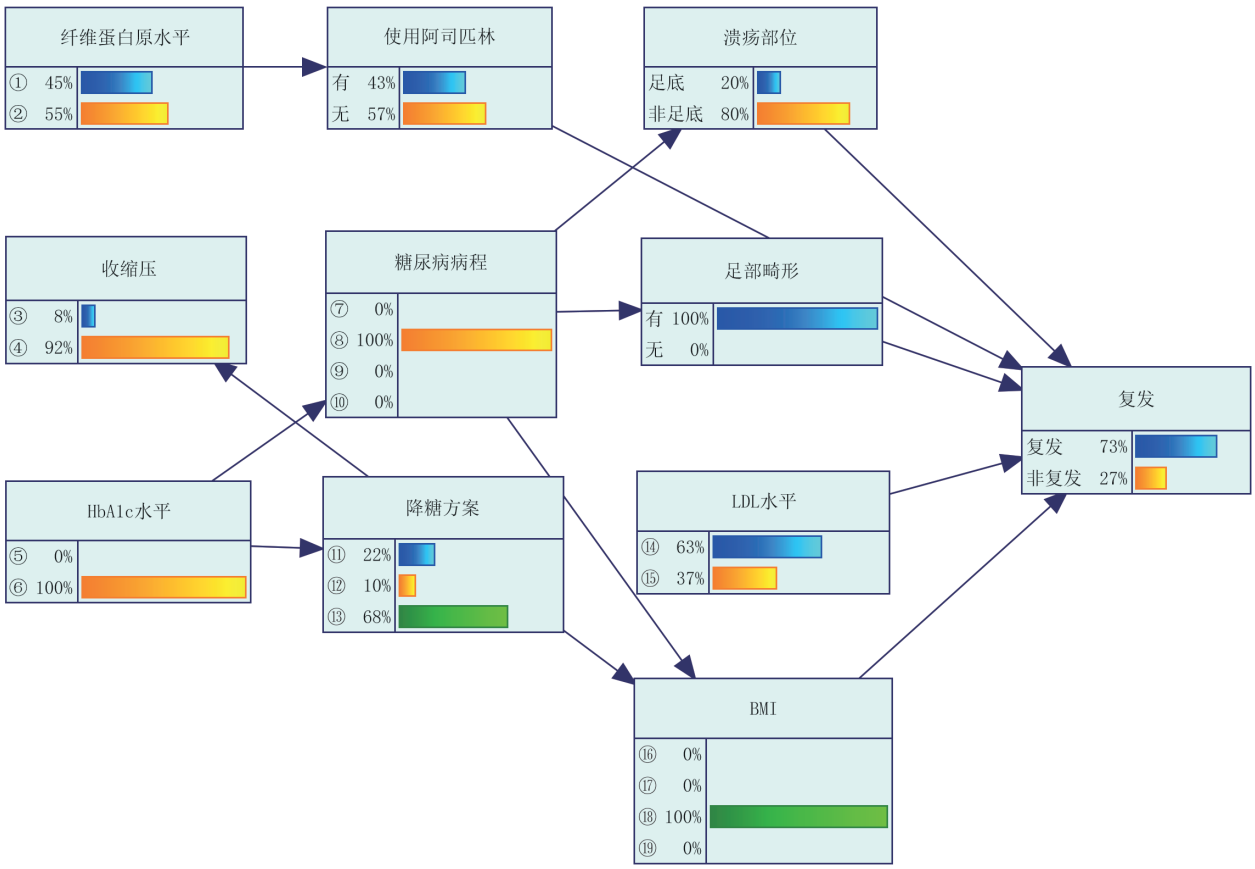
Figure 2　A Bayesian network model for predicting diabetic foot ulcer recurrence in 1 656 patients

理中，点击相应节点，如住院期间HbA1c水平≥9.0%、病程10~19年、有足部畸形、BMI>24.9~29.9 kg/m^{2}时，DFU复发风险的概率为73%。DFU复发可能是足部畸形影响患者的步态和行走功能，导致局部皮肤受压、磨损，进而引发溃疡[34-35]，医护人员应对患者强化日常足部护理指导并开展针对性的康复训练，提升患者生活质量，从整体上打破“畸形-损伤-溃疡”的恶性循环。此外，多项研究显示，LDL水平是DFU愈合不良和复发的独立预测因素[36]。阿司匹林通常是预防心血管疾病的药物，它作为DFU复发风险增高的影响因素，可能是由于该药物影响血液凝固，延缓创面愈合。创面愈合本身就是一个轻微的炎症过程，初期需要血小板聚集来止血并启动修复过程。阿司匹林抑制了血小板功能，从而延缓创面愈合[37]。然而，糖尿病患者服用阿司匹林是否会导致DFU复发还需要进一步探讨，其中的机制也有待深入挖掘。此外，本研究的贝叶斯网络模型的ROC曲线下面积为0.74，说明模型对DFU复发风险具有一定的预测效能。

综上所述，本研究通过多因素logistic回归、限制性立方样条和贝叶斯网络模型，系统识别并验证了影响DFU复发的关键因素和网络结构。贝叶斯网络模型进一步凸显了足部畸形作为DFU复发的最强预测因子，为临床风险预警提供了直观、可靠的工具。本研究也有一定的局限性：首先，本研究随访时间较长导致的失访率偏高，可能对研究结果的代表性和统计效能产生一定影响；其次，未能充分考虑不同结局事件之间的相互影响，从而影响对DFU复发风险估计的准确性。

利益冲突　所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明　马海荣：资料整理、研究设计、分析数据、撰写论文



注：①、②分别表示入院当天纤维蛋白原2.0~4.0 g/L、<2.0或>4.0 g/L，③、④分别表示入院当天收缩压<120 mmHg（1 mmHg=0.133 kPa）、≥120 mmHg，⑤、⑥分别表示住院期间糖化血红蛋白（HbA1c）水平<9.0%、≥9.0 %，⑦、⑧、⑨、⑩分别表示糖尿病病程<10年、10~19年、>19~29年、>29年，⑪、⑫、⑬分别表示降糖方案中口服降糖药、胰岛素、口服降糖药+胰岛素，⑭、⑮分别表示入院当天低密度脂蛋白（LDL）水平<3.4 mmol/L、≥3.4 mmol/L，⑯、⑰、⑱、⑲分别表示入院当天身体质量指数（BMI）<18.5 kg/m^2、18.5~24.9 kg/m^2、>24.9~29.9 kg/m^2、>29.9 kg/m^2

图3　预测1 656例患者糖尿病足溃疡复发的贝叶斯网络模型推理

Figure 3　Inference of the Bayesian network model for predicting diabetic foot ulcer recurrence in 1 656 patients

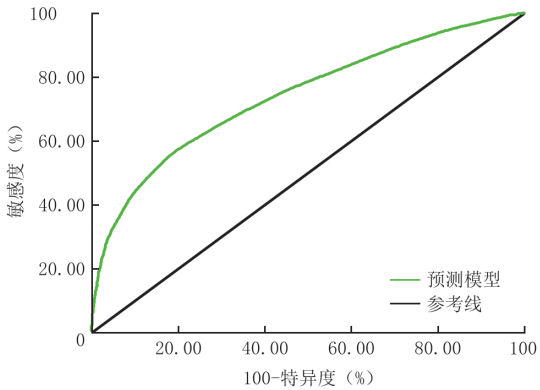


图4　预测1 656例患者糖尿病足溃疡复发的贝叶斯网络模型的受试者操作特征曲线

Figure 4　Receiver operating characteristic curve of the Bayesian network model for predicting diabetic foot ulcer recurrence in 1 656 patients

初稿：郑丽然、陈佳庚、许雯艳、崔雪灿、王帅：数据收集、提供论文写作意见；常柏：提供论文写作意见、经费保障；王美君：文稿审阅和修改，经费支持

参考文献

［1］ Armstrong DG, Tan TW, Boulton AJM, et al. Diabetic foot ulcers: a review[J]. JAMA, 2023, 330(1):62-75. DOI: 10.1001/jama.2023.10578.

［2］ Armstrong DG, Boulton AJM, Bus SA. Diabetic foot ulcers and their recurrence[J]. N Engl J Med, 2017, 376(24): 2367-2375. DOI: 10.1056/NEJMra1615439.

［3］ Khalifa WA.Risk factors for diabetic foot ulcer recurrence: a prospective 2-year follow-up study in Egypt[J].Foot (Edinb), 2018,35:11-15.DOI:10.1016/j.foot.2017.12.004.

［4］ Huang ZH,Li SQ,Kou Y,et al.Risk factors for the recurrence of diabetic foot ulcers among diabetic patients: a meta-analysis [J]. Int Wound J, 2019, 16(6): 1373-1382. DOI: 10.1111/iwj.13200.

［5］ 胡慧萍,陈明卫.糖尿病足溃疡愈合及截肢的相关因素分析[J].安徽医科大学学报,2016(11):1634-1637.DOI:10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2016.11.018.

［6］ 王柯鑫,张国艳,丁利萍,等.基于CiteSpace慢性病经济毒性研究热点的可视化分析[J].医学与哲学,2023,44(22):76-80.DOI:10.12014/j.issn.1002-0772.2023.22.17.

［7］ 中华医学会烧伤外科学分会,长三角一体化糖尿病足专病联盟,《中华烧伤与创面修复杂志》编辑委员会.中国糖尿病足防治实践指南（Ⅰ）[J].中华烧伤与创面修复杂志,2025,41(11):

1029-1049.DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20250801-00345.
［8］ 中华医学会烧伤外科学分会,长三角一体化糖尿病足专病联盟,《中华烧伤与创面修复杂志》编辑委员会. 中国糖尿病足防治实践指南(Ⅱ)[J]. 中华烧伤与创面修复杂志,2025,41(12):1111-1131. DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20251029-00448.
［9］ Monteiro-Soares M, Boyko EJ, Ribeiro J, et al. Risk stratification systems for diabetic foot ulcers: a systematic review[J].Diabetologia,2011,54(5):1190-1199.DOI:10.1007/s00125-010-2030-3.
［10］ 康艳楠. 糖尿病足复发的影响因素与风险预测模型研究[D]. 天津:天津中医药大学,2022. DOI: 10.27368/d. cnki. gtzyy.2022.000286.
［11］ Petersen BJ, Linde-Zwirble WT, Tan TW, et al. Higher rates of all-cause mortality and resource utilization during episodes-of-care for diabetic foot ulceration[J]. Diabetes Res Clin Pract, 2022,184:109182. DOI: 10.1016/j.diabres.2021.109182.
［12］ Chen D,Wang M,Shang X,et al.Development and validation of an incidence risk prediction model for early foot ulcer in diabetes based on a high evidence systematic review and meta-analysis[J]. Diabetes Res Clin Pract,2021,180:109040. DOI:10.1016/j.diabres.2021.109040.
［13］ Wang M,Chen D,Fu H,et al.Development and validation of a risk prediction model for the recurrence of foot ulcer in type 2 diabetes in China: a longitudinal cohort study based on a systematic review and meta-analysis[J].Diabetes Metab Res Rev,2023,39(4):e3616.DOI:10.1002/dmrr.3616.
［14］ 王美君,许洪梅,葛甜甜,等. 糖尿病足患者溃疡愈合后5年复发和死亡的随访结果及其危险因素分析[J]. 中华糖尿病杂志,2021,13(3):227-232. DOI:10.3760/cma.j.cn115791-20200707-00422.
［15］ Chen D,Wang M,Shang X,et al.Development and validation of an incidence risk prediction model for early foot ulcer in diabetes based on a high evidence systematic review and meta-analysis[J]. Diabetes Res Clin Pract,2021,180:109040. DOI:10.1016/j.diabres.2021.109040.
［16］ 莫泽纬,陈道雄,高勇义,等. 初发糖尿病足溃疡患者足溃疡复发影响因素分析[J]. 中国热带医学,2018,18(7):716-719.DOI:10.13604/j.cnki.46-1064/r.2018.07.21.
［17］ 王银荣,邱晓堂,潘莉. 糖尿病足溃疡患者愈合后复发的影响因素分析及风险预测模型构建[J]. 军事护理,2023,40(5):62-65. DOI:10.3969/j.issn.2097-1826.2023.05.015.
［18］ 刘星雨,饶庆雨,刘祖婷,等. 基于贝叶斯网络的个体化风险评估模型及R语言实现[J]. 中国循证医学杂志,2024,24(11):1325-1331. DOI: 10.7507/1672-2531.202405072.
［19］ Lau CL, Smith CS. Bayesian networks in infectious disease eco-epidemiology[J]. Rev Environ Health, 2016, 31(1):173-177.DOI:10.1515/reveh-2015-0052.
［20］ Mancini F, Sousa FS, Hummel AD, et al. Classification of postural profiles among mouth-breathing children by learning vector quantization[J]. Methods Inf Med, 2011, 50(4):349-357.DOI:10.3414/ME09-01-0039.
［21］ 魏珍,张雪雷,饶华祥,等. 禁忌搜索算法的贝叶斯网络模型在冠心病影响因素分析中的应用[J]. 中华流行病学杂志,2016,37(6): 895-899. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-6450.2016.06.031.
［22］ Bus SA,Lavery LA,Monteiro-Soares M,et al.Guidelines on the prevention of foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2019 update) [J]. Diabetes Metab Res Rev,2020,36 Suppl 1:e3269.DOI:10.1002/dmrr.3269.
［23］ van Netten JJ,Bus SA,Apelqvist J,et al.Definitions and criteria for diabetes-related foot disease (IWGDF 2023 update) [J]. Diabetes Metab Res Rev, 2024, 40(3): e3654. DOI: 10.1002/dmrr.3654.
［24］ van Netten JJ, Bus SA, Apelqvist J, et al. Definitions and criteria for diabetic foot disease[J]. Diabetes Metab Res Rev, 2020, 36 Suppl 1:e3268. DOI: 10.1002/dmrr.3268.
［25］ 罗剑锋,金欢,李宝月,等. 限制性立方样条在非线性回归中的应用研究[J]. 中国卫生统计,2010,27(3): 229-232. DOI:10.3969/j.issn.1002-3674.2010.03.002.
［26］ 解其华,魏迎凤,徐园园,等. 糖尿病足溃疡感染患者血清脂联素、D二聚体及NLR水平与病情严重程度及预后的相关性[J]. 中华内分泌外科杂志,2023,17(6):670-674.DOI:10.3760/cma.j.cn.115807-20220722-00198.
［27］ 梅柯强,刘泽慧,祝蓉,等.2型糖尿病足溃疡加重的危险因素及细菌感染特征分析[J]. 重庆医科大学学报,2025,50(6):770-777.DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.003761.
［28］ 郭晓蕙,纪立农,陆菊明,等.2009年中国成人2型糖尿病患者口服降糖药联合胰岛素治疗后血糖达标状况调查[J]. 中华糖尿病杂志,2012,4(8):474-478. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-5809.2012.08.007.
［29］ Li XH, Guan LY, Lin HY. Fibrinogen: a marker in predicting diabetic foot ulcer severity[J]. J Diabetes Res, 2016:2358321. DOI: 10.1155/2016/2358321.
［30］ 黄泳清,沈洁,袁思捷,等. 红细胞分布宽度、纤维蛋白原与D-二聚体预测糖尿病足发生发展风险的价值[J]. 中国组织工程研究,2019,23(23):3716-3721. DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.1319.
［31］ 王娟,赵子源,李凤翱. 糖尿病足感染患者炎症因子与D-二聚体和CD64及纤维蛋白原对病情严重程度评估及预后价值[J]. 中华医院感染学杂志,2020,30(3):373-377. DOI:10.11816/cn.ni.2020-190583.
［32］ Pinzur M, Freeland R, Juknelis D. The association between body mass index and foot disorders in diabetic patients[J]. Foot Ankle Int, 2005, 26(5): 375-377. DOI: 10.1177/107110070502600506.
［33］ Ahadi M, Molooghi K, Masoudifar N, et al. A review of non-alcoholic fatty liver disease in non-obese and lean individuals[J]. J Gastroenterol Hepatol, 2021, 36(6):1497-1507.DOI:10.1111/jgh.15353.
［34］ Keukenkamp R,Busch-Westbroek TE,Barn R,et al.Foot ulcer recurrence, plantar pressure and footwear adherence in people with diabetes and Charcot midfoot deformity: a cohort analysis[J]. Diabet Med, 2021, 38(4): e14438. DOI:10.1111/dme.14438.
［35］ 申金付,蒋瑞妹,王卓群,等. 2型糖尿病患者糖尿病足溃疡复发情况及影响因素[J]. 中华烧伤杂志,2020,36(10):947-952. DOI:10.3760/cma.j.cn501120-20190726-00315.
［36］ Sun Y, Zhou Y, Dai Y, et al. Predictors of post-healing recurrence in patients with diabetic foot ulcers: a systematic review and meta-analysis[J]. J Tissue Viability, 2024,33(4):542-549.DOI:10.1016/j.jtv.2024.07.002.
［37］ Zhang J, Shang S, Liu W, et al. Effect of aspirin on platelet-rich plasma of diabetes mellitus with lower extremity atherosclerosis[J]. Future Sci OA, 2024, 10(1):2413827.