

· 临床研究 ·

基于机器学习的女性压力性尿失禁发病风险预测模型建立及效能评价

时欣然¹, 庞震¹, 乔婷¹, 李晶晶², 王勤章¹

(石河子大学第一附属医院:1.泌尿外科,2.妇产科,新疆石河子 832000)

Establishing a risk prediction model for the onset of female stress urinary incontinence based on machine learning

SHI Xinran¹, PANG Zhen¹, QIAO Ting¹, LI Jingjing², WANG Qinzhang¹

(1.Department of Urology,2.Department of Gynecology and Obstetrics, The First Affiliated Hospital of Shihezi University, Shihezi 832000, China)

ABSTRACT: Objective To construct prediction models of female stress urinary incontinence (SUI), and evaluate the efficacy of each model, so as to provide reference for the early diagnosis of SUI. Methods Female SUI patients treated in our hospital during Oct. 2019 and Oct. 2023 and healthy women undergoing physical examination during the same period were involved. Women 42 days after delivery were included in the postpartum group ($n = 611$), and perimenopausal and postmenopausal women were included in the non-postpartum group ($n = 409$). The number of random seeds was set and the participants were divided into the training and verification sets in a ratio of 7 : 3. Relevant clinical data were collected, and meaningful variables were screened using single factor and Lasso regression, which were then incorporated into the K-nearest neighbor method (KNN), support vector machine (SVM), decision tree (DT) and random forest (RF) algorithms. The sensitivity, specificity, accuracy and area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of the models were calculated to screen out the optimal model. Results There were 352 SUI patients (57.6%) in the postpartum group. According to single factor and Lasso regression, significant variables included age, body mass index (BMI), maximum rapid muscle stage, parity, bladder neck mobility (BND), urethral rotation angle (URA), lateral perineal incision, past incontinence, and constipation. In the verification set, the AUC of KNN, SVM, DT and RF models were 0.881, 0.878, 0.750 and 0.905, respectively; the AUC, accuracy, F1 index and Kappa value of RF model were the largest. In the non-postpartum group, there were 260 SUI patients, accounting for 63.6%. The significant variables were age, BMI, maximum value and recovery time of fast muscle stage, mean value of slow muscle stage, post-resting stage variability, vaginal delivery, past incontinence, and constipation. In the verification set, the AUC of KNN, SVM, DT and RF models were 0.819, 0.805, 0.603 and 0.830, respectively; the AUC, accuracy, Kappa value of the RF model were the largest. Conclusion This study successfully established 4 prediction models for the incidence of SUI in women at 42 days postpartum, perimenopausal and postmenopausal women based on machine learning. Among them, the model adopting the RF algorithm had the best prediction efficiency.

KEY WORDS: stress urinary incontinence; prediction model; machine learning; decision tree; random forest; support vector machine; K-nearest neighbor method

摘要:目的 运用K最近邻法(KNN)、支持向量机(SVM)、决策树(DT)及随机森林(RF)构建女性压力性尿失禁(SUI)发病的预测模型,并评估各模型效能,为SUI的早期诊断提供参考。方法 回顾性分析2019年10月—2023年10月石河子大学第一附属医院泌尿外科及妇产科治疗的女性SUI患者及同期行健康查体女性的临床资料,将产后42 d女性纳入产后组($n = 611$),围绝经期与绝经后女性纳入非产后组($n = 409$)。设置随机种子数并以7 : 3的比例分为训练集与验证集。收集所有研究对象的相关临床资料,使用单因素及Lasso回归筛选有意义的变量,将其纳入KNN、SVM、DT及RF算法中并构建模型,分别计算模型的敏感度、特异度、准确度、曲线下面积(AUC)等,筛选出最优的模型。结果 产后组SUI患者为352例,占57.6%。根据单因素及Lasso回归,产后组筛选出有意义的变量为:年龄、身体质量指数(BMI)、快肌阶段最大值、孕次、膀胱颈移动度(BND)、尿道旋转角(URA)、会阴侧切、既往尿失禁史及便秘。在产后组验证集中KNN、SVM、DT、RF模型的AUC分别为0.881、0.878、0.750、0.905,RF模型的AUC、准确度、F1指数及Kappa值均最大。非产后组SUI患者为260例,占63.6%。根据单因素及Lasso回归,

收稿日期:2024-10-06

修回日期:2024-12-28

基金项目:2023 人才发展专项-兵团英才项目(No.CZ000821)

通信作者:王勤章,教授,硕士研究生导师。E-mail:wqz1969@sina.com

作者简介:时欣然,硕士研究生在读,住院医师。研究方向:盆底功能障碍性疾病。E-mail:20222114079@stu.shzu.edu.cn

非产后组筛选出有意义的变量为:年龄、BMI、快肌阶段最大值及恢复时间、慢肌阶段平均值、后静息阶段变异性、阴道分娩、既往尿失禁史及便秘。在非产后组验证集中KNN、SVM、DT、RF模型的AUC分别为0.819、0.805、0.603、0.830,RF模型的AUC、准确度、Kappa值均最大。**结论** 本研究基于机器学习成功建立4种产后42d女性,围绝经期及绝经后女性SUI发病的预测模型,其中采用RF算法的模型预测效率最佳。

关键词:压力性尿失禁;预测模型;机器学习;决策树;随机森林;支持向量机;K最近邻法

中图分类号:R699.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1009-8291.2025.03.004

压力性尿失禁(stress urinary incontinence, SUI)被定义为喷嚏、咳嗽、大笑、运动等腹压增加时,尿液不自主从尿道外口漏出^[1],世界卫生组织(World Health Organization, WHO)将其定为危害女性健康的常见慢性疾病之一。一项Meta分析显示近10年我国成年女性SUI的发病率高达23.2%^[2]。SUI会增加患者会阴部疼痛、会阴部及骶尾部皮炎、抑郁等风险,对女性的日常生活、正常的社会交往及医疗成本造成了巨大的负面影响^[3-4]。然而,目前的常用治疗方法如盆底肌训练、生物反馈电刺激等仅能短期缓解症状,尚无对患者损伤小且长期有效的治疗方案。因此,如何判断SUI的高危人群,对其提前采取干预措施以预防疾病的发生十分重要^[5]。

在医学相关研究中,logistic回归模型是最常用的预测模型之一,但由于SUI的发病因素复杂多样,不同病因与疾病的发生可能存在非线性关系,因此这种线性决策无法有效解决非线性问题。机器学习是一种基于数据的自动化建模技术,其在处理复杂、高维和交互式变量方面更具优势^[6]。本研究将面向两大SUI高危人群,即产后42d女性、围绝经期与绝经后女性,使用多种机器学习的方法构建SUI发病的模型,并对模型进行评价,为临床早筛、预防和早期干预女性SUI提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性分析2019年10月—2023年10月石河子大学第一附属医院泌尿外科及妇产科治疗的女性SUI患者及同期行健康查体女性的临床资料,将产后42d女性纳入产后组($n=611$),围绝经期与绝经后女性纳入非产后组($n=409$)。产后组为产后42~60d复查的女性;非产后组为45岁到最后1次月经停止后1年的女性。SUI诊断标准:①症状:出现喷嚏、咳嗽、大笑或运动等腹压增高时出现不自主的尿液自尿道口漏出;停止加压动作时尿流随即终止^[7];②检查:压力试验及指压试验阳性^[8]。纳入标准:①年龄 ≥ 18 岁;②理解能力正常,自愿参加本研究;③完成相关临床检查;④SUI患者符合SUI诊断标准。排除标准:①合并急迫性尿失禁;②既往行

SUI相关治疗;③神经源性膀胱;④腹腔内占位性病变;⑤妊娠期妇女;⑥合并泌尿系统感染;⑦病历资料不全。本研究已通过石河子大学第一附属医院伦理委员会批准(KJ2023-403-01)。

1.2 纳入指标 根据本次研究的目的,结合既往研究结论以及实际研究对象的信息,产后组收集以下数据:年龄、身体质量指数(body mass index, BMI)、便秘史、既往尿失禁病史、是否阴道分娩、是否会阴侧切、孕次及产次,盆底四维超声检查数据包括膀胱颈移动度(bladder neck descent, BND)、膀胱尿道后角(posterior urethrovesical angle, PUVA)、尿道倾斜角(urethral tilt angle, UTA)、尿道旋转角(urethral rotation angle, URA)等,盆底肌电检查数据包括前静息阶段平均值及变异值,快肌阶段最大值、上升时间及恢复时间,慢肌阶段平均值、变异性及上升时间等。非产后组收集以下数据:年龄、BMI、是否绝经、是否初产妇、是否无痛分娩、便秘史、既往尿失禁病史、是否阴道分娩及会阴侧切,盆底肌电检查数据包括前静息阶段平均值及变异性,快肌阶段最大值、上升时间及恢复时间,慢肌阶段平均值、变异性、上升时间及恢复时间,后静息阶段平均值及变异性等。

1.3 样本量估计 依据1个变量对应至少10个样本(10 events per variables, 10 EPV)原则,产后组的初筛指标共29个,至少需290例样本,本研究最终纳入611例样本,其中SUI患者352例(57.6%);非产后组的初筛指标共21个,至少需要210例样本,本研究最终共纳入409例样本,其中SUI患者260例(63.6%)。

1.4 数据预处理 去除重复变量,删除缺失值超过10%的变量,对于未超过10%的缺失值,呈正态分布的连续型变量使用均值填补,非正态分布的连续型变量使用中位数填补,分类变量使用随机插补法进行填补。

1.5 统计学方法 使用R 4.4.1进行所有数据的统计分析,符合正态分布的计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,两组间比较采用独立样本 t 检验;不符合正态分布的资料以中位数(四分位间距)[$M(P25, P75)$]表示,组间比较采用非参数检验;计数资料用例数(%)表示,组间比较采用非参数检验;以 $P < 0.05$ 为差异有

统计学意义。

1.6 模型的构建与验证 本研究构建模型的4种方法是:①K最近邻法(K-nearest neighbor method, KNN)是最简单的分类器,通过“相似性”,即在特征空间中通过测量不同数据之间的距离对数据进行分类,由于其计算依赖于距离,因此在建模前需对数据进行标准化处理。使用网格寻优及交叉验证确定参数K,以构建最优模型。②支持向量机(support vector machine, SVM)是具有最大可能边际的线性分类器,即找出最优超平面(即分类边界),将不同类别的数据分开。SVM运算所包含的核函数将特征到高维空间的转换进行了数学上的简化,即在建立高维非线性空间和决策边界的同时,还能保持其有效性。通过网格寻优调整coef及核函数以确定最优模型。常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基核函数、sigmoid核函数。③决策树(decision tree, DT)是基于树形结构的一种分类器,其根据基尼指数评价因素的重要性从而构建树形结构,若满足该特征则进入下一节点的判断,若不满足则终止。通过对数据进行递归分割,生成树形。其中每个分支代表一个属性,每个节点代表一种类别。DT模型的算法拟将每个叶节点纯化,即为了提高模型的准确度,倾向于使每个叶节点仅有一个样本。因此为防止模型的过拟合,采用1倍标准差法对模型进行后剪枝。通过调整树深(tree_depth)、叶节点最小样本量(min_n)及模型复杂度(cost_complexity)对模型进行优化。④随机森林(random forest, RF)是一种集成学习方法,即组合多个弱学习器的结果构建一个强学习器,其通过在原始数据集中随机抽样构成不同子数据集并随机选取特征构建不同的DT,最后通过整合所有DT的预测结果构建最优模型。其与DT相比具有较高的准确性和稳定性。RF模型的缺点同样是容易过拟合,因此需寻找最优超参数以降低过拟合偏差。根据网格寻优结果调整决策树数量(ntree)、特征数(mtry)及最小样本量(min_n)对模型进行优化。

模型的构建均基于R 4.4.1中的tidymodels包。将连续型变量以原值输入,分类变量予以相应赋值(表1)。以是否患有SUI为因变量,对数据进行单因素logistic及Lasso回归分析,对其结果取交集,从而选出最优预测因子。将清洗过后的数据集以7:3的比例随机划分为训练集和验证集,在训练集上使用最优预测因子构建KNN、SVM、DT、RF 4种初步预测模型,通过网格搜索以寻找优超参数,以交叉验证确定最优超参数,再使用最优超参数构建模型,最后在验证集上评估4种不同模型。通过设置种子数及5

折交叉验证保证模型的可重复性以及避免模型的过拟合。

表1 分类变量赋值表

变量	赋值	变量	赋值
压力性尿失禁	否=0,是=1	初产妇	否=0,是=1
会阴侧切	否=0,是=1	绝经	否=0,是=1
阴道分娩	否=0,是=1	便秘史	否=0,是=1
无痛分娩	否=0,是=1	既往尿失禁病史	否=0,是=1

计算各模型的曲线下面积(area under the curve, AUC)、准确度、特异度、敏感度、Kappa值等指标,综合评估模型效能。AUC衡量分类器代表在不同阈值下将正例排在负例前面的概率,AUC值越大,代表分类器性能越好;敏感度代表正确检出患病者的比例,敏感度高的分类器,其漏诊率相对低;特异度代表正确判断未患病的比例,特异度较高,则可以减少漏诊的情况;准确度是正确判断患病及未患病的综合能力,多用于评估模型的可靠程度;F1指数综合考虑模型的精确性及全面性,F1指数较高则说明该模型正确识别患者的能力较强,同时其漏诊率也相对较低;Kappa值是衡量一致性的重要指标,其取值范围为-1~1,取值越接近1,表示该模型的诊断方法可靠性越高。

使用Delong检验比较训练集与验证集的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线性能。Delong检验通过计算各模型AUC的标准误差和协方差来比较训练集与验证集AUC有无差异。若 $P < 0.05$ 则表示训练集与验证集间AUC有差异,模型可能出现过拟合;若 $P \geq 0.05$,则表明训练集与验证集AUC无明显差异,该模型在训练集与验证集中表现均较好。

为了提高模型的可解释性,本文采用基于合作博弈论的SHAP算法计算各特征对模型的贡献度,该算法通过逐一剔除特征取值^[9],计算模型预测的准确性并对变量进行重要性排序,判别其对模型的贡献程度,蜂群图可绘制各个样本在不同特征下的SHAP值,点越靠右表示其对模型的正向影响越大,越靠左表示其对模型的负向影响越大。在实际临床工作中,通过收集患者的相应临床指标,将其纳入模型,可得到患者SHAP模型测力图并计算该样本Shap值,将其与基线Shap值比较,若大于基线值,则表示该患者罹患SUI的风险较高,反之则表示该患者罹患SUI的风险较低。

2 结果

2.1 产后组与非产后组女性患SUI的临床资料及单

因素分析 产后组与非产后组的临床资料比较及单因素分析结果见表 2、3。

表 2 产后组中非 SUI 与 SUI 患者的临床资料及单因素分析

[$M(P_{25}, P_{75})$]

项目	临床资料				单因素分析		
	非 SUI 组($n=259$)	SUI 组($n=352$)	t/Z 值	P 值	OR 值	95%CI	P 值
年龄/岁	29.0(27.0,32.0)	30.0(28.0,34.0)	-3.0	0.003	1.06	1.03~1.10	<0.001
BMI	24.2(22.8,25.2)	25.2(24.4,26.6)	-7.9	<0.001	1.17	1.10~1.25	<0.001
孕次*			-4.8	<0.001			
1	132(51.0)	127(36.1)					
2	84(32.4)	108(30.7)			1.34	0.92~1.94	0.130
3	30(11.6)	66(18.8)			2.29	1.39~3.75	0.001
4	8(3.1)	29(8.2)			3.77	1.66~8.55	0.002
5	3(1.2)	17(4.8)			5.89	1.69~20.58	0.005
6	2(0.8)	5(1.4)			2.60	0.50~13.64	0.259
产次*			-2.7	0.006			
0	5(1.9)	4(1.1)					
1	181(69.9)	206(58.5)			1.42	0.38~5.38	0.603
2	59(22.8)	133(37.8)			2.82	0.73~10.87	0.133
3	4(1.5)	9(2.6)			2.81	0.48~16.43	0.251
4	7(2.7)	0			0	0~Inf	0.978
5	2(0.8)	0			0	0~Inf	0.988
6	1(0.4)	0			0	0~Inf	0.992
会阴侧切*			-10.9	<0.001			
否	230(88.8)	161(45.7)					
是	29(11.2)	191(54.3)			9.41	6.06~14.60	<0.001
既往尿失禁病史*			-2.4	0.016			
否	152(58.7)	172(48.9)					
是	107(41.3)	180(51.1)			1.49	1.08~2.06	0.016
便秘史*			-3.0	0.003			
否	146(56.4)	155(44.0)					
是	113(43.6)	197(56.0)			1.64	1.19~2.27	0.003
阴道分娩*			-4.2	<0.001			
否	120(46.3)	105(29.8)					
是	139(53.7)	247(70.2)			2.03	1.45~2.84	<0.001
盆底肌电检查							
前静息阶段平均值/ μV	5.7(3.5,8.4)	5.4(3.3,7.4)	-1.6	0.114	0.96	0.92~1.01	0.094
前静息阶段变异性	0.1(0.1,0.2)	0.2(0.1,0.2)	-1.0	0.311	0.87	0.53~1.44	0.599
快肌阶段最大值/ μV	35.6(25.3,47.9)	30.0(20.7,40.9)	-4.6	<0.001	0.98	0.97~0.99	<0.001
快肌阶段上升时间/s	0.4(0.3,0.5)	0.4(0.3,0.6)	-0.4	0.671	0.88	0.48~1.61	0.671
快肌阶段恢复时间/s	0.5(0.4,0.6)	0.5(0.4,0.7)	-0.4	0.662	0.95	0.71~1.27	0.737
慢肌阶段平均值/ μV	36.3(32.6,41.8)	34.0(28.7,38.9)	-4.3	<0.001	0.97	0.95~0.99	<0.001
慢肌阶段变异性	0.2(0.2,0.3)	0.2(0.2,0.3)	-0.9	0.350	1.18	0.62~2.25	0.615
慢肌阶段上升时间/s	0.4(0.2,0.6)	0.4(0.3,0.7)	-0.5	0.587	1.04	0.75~1.44	0.810
慢肌阶段恢复时间/s	0.9(0.7,1.7)	1.0(0.7,1.9)	-1.5	0.126	1.03	0.88~1.19	0.737
后静息阶段平均值/ μV	5.2(2.9,7.6)	4.9(2.9,7.0)	-0.4	0.646	0.98	0.94~1.03	0.459
后静息阶段变异性	0.1(0.1,0.2)	0.1(0.1,0.2)	-0.9	0.375	0.97	0.50~1.90	0.935
盆底四维超声检查							
BND/mm	25.0(22.0,27.0)	29.0(26.0,32.0)	-12.8	<0.001	1.26	1.20~1.32	<0.001
PUVA/°	114.0(101.0,127.5)	117.0(103.0,127.5)	-1.2	0.215	1.00	1.00~1.01	0.219
Val_PUVA/°	136.0(118.0,152.0)	139.0(121.5,158.0)	-2.1	0.036	1.01	1.00~1.01	0.014
UTA/°	22.0(12.5,31.0)	19.0(12.0,33.0)	-0.3	0.746	1.00	0.99~1.01	0.862

续表 2

项目	临床资料				单因素分析		
	非 SUI 组(<i>n</i> =259)	SUI 组(<i>n</i> =352)	<i>t</i> / <i>Z</i> 值	<i>P</i> 值	OR 值	95%CI	<i>P</i> 值
URA/°	25.0(22.0,28.0)	28.0(22.0,35.0)	-6.0	<0.001	1.08	1.06~1.11	<0.001
R_PMT/mm	4.7(4.1,5.5)	4.6(4.0,5.4)	-0.7	0.457	0.93	0.80~1.08	0.356
L_PMT/mm	12.0(10.5,14.9)	4.5(3.9,5.2)	-0.6	0.505	0.93	0.81~1.07	0.298
LHA/cm ²	12.0(10.5,14.9)	13.2(11.2,15.3)	-3.4	0.001	1.09	1.03~1.15	0.002
Val_LHA/cm ²	19.7(14.2,25.0)	21.0(16.0,27.0)	-2.2	0.027	1.03	1.00~1.05	0.026

BMI: 身体质量指数; SUI: 压力性尿失禁; BND: 膀胱颈移动度; PUVA: 膀胱尿道后角; Val_PUVA: Valsalva 时膀胱尿道后角; UTA: 尿道倾斜角; URA: 尿道旋转角; R_PMT: 右耻骨肌厚度; L_PMT: 左耻骨肌厚度; LHA: 肛提肌裂孔面积; Val_LHA: Valsalva 时肛提肌裂孔面积; * 以例(%)表示。

表 3 非产后组中非 SUI 与 SUI 患者的临床资料及单因素分析

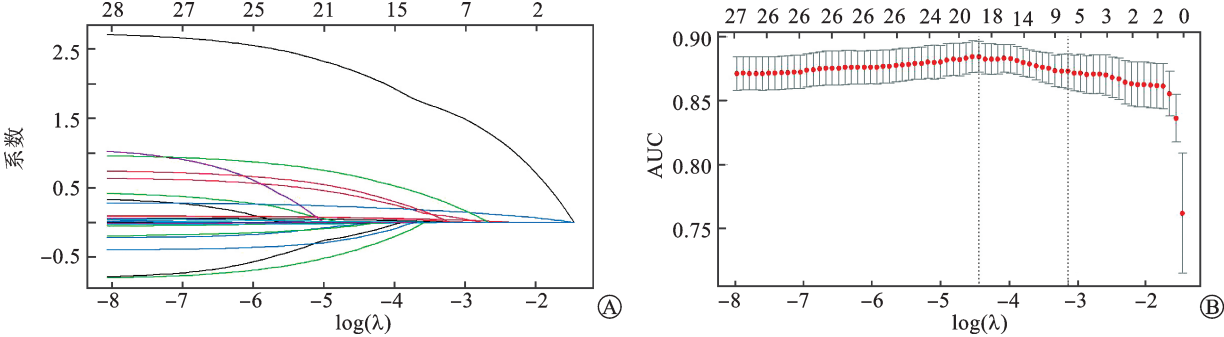
[*M*(*P*25, *P*75)]

项目	临床资料				单因素分析		
	非 SUI 组(<i>n</i> =149)	SUI 组(<i>n</i> =260)	<i>t</i> / <i>Z</i> 值	<i>P</i> 值	OR 值	95%CI	<i>P</i> 值
年龄/岁	56.0(47.0,67.0)	53.0(49.0,60.0)	-0.9	0.351	1.00	0.98~1.01	0.554
BMI	24.7(23.5,25.3)	25.2(24.3,26.4)	-5.1	<0.001	1.20	1.08~1.33	<0.001
绝经*			-2.2	0.027			
否	50(33.6)	61(23.5)					
是	99(66.4)	199(76.5)			1.65	1.06~2.57	0.028
初产妇*			-0.1	0.921			
否	89(59.7)	154(59.2)					
是	60(40.3)	106(40.8)			1.02	0.68~1.54	0.921
无痛分娩*			-1.4	0.151			
否	134(89.9)	244(93.8)					
是	15(10.1)	16(6.2)			0.59	0.28~1.22	0.154
会阴侧切*			-3.5	<0.001			
否	81(54.4)	95(36.5)					
是	68(45.6)	165(63.5)			2.07	1.37~3.12	<0.001
既往尿失禁史*			-3.8	<0.001			
否	95(63.8)	114(43.8)					
是	54(36.2)	146(56.2)			2.25	1.49~3.41	<0.001
便秘史*			-6.1	<0.001			
否	117(78.5)	124(47.7)					
是	32(21.5)	136(52.3)			4.01	2.53~6.36	<0.001
阴道分娩*			-6.3	<0.001			
否	94(63.1)	81(31.2)					
是	55(36.9)	179(68.8)			3.78	2.47~5.77	<0.001
盆底肌电检查							
前静息阶段平均值/ μ V	5.6(3.3,7.9)	4.9(2.5,7.0)	-2.1	0.032	1.00	0.98~1.02	0.796
前静息阶段变异性	0.2(0.1,0.2)	0.2(0.1,0.3)	-1.7	0.095	2.40	1.08~5.31	0.031
快肌阶段最大值/ μ V	33.5(29.0,39.0)	32.0(27.0,34.8)	-4.1	<0.001	0.92	0.89~0.95	<0.001
快肌阶段上升时间/s	0.5(0.4,0.6)	0.5(0.4,0.7)	-0.4	0.718	0.97	0.56~1.66	0.905
快肌阶段恢复时间/s	0.5(0.4,0.9)	0.5(0.4,0.8)	-0.7	0.494	0.82	0.66~1.03	0.082
慢肌阶段平均值/ μ V	29.6(25.5,36.0)	26.9(23.6,29.6)	-4.5	<0.001	0.94	0.91~0.97	<0.001
慢肌阶段变异性	0.3(0.2,0.4)	0.3(0.2,0.4)	-0.3	0.754	1.84	0.76~4.46	0.179
慢肌阶段上升时间/s	0.4(0.3,1.0)	0.5(0.3,0.9)	-1.4	0.139	1.16	0.83~1.63	0.385
慢肌阶段恢复时间/s	1.0(0.7,2.5)	1.3(0.7,2.8)	-1.5	0.121	1.13	0.96~1.34	0.148
后静息阶段平均值/ μ V	5.0(2.8,7.5)	4.8(2.5,7.0)	-1.5	0.121	0.96	0.90~1.01	0.126
后静息阶段变异性	0.2(0.1,0.2)	0.1(0.1,0.2)	-1.6	0.105	0.50	0.26~0.95	0.036

BMI: 身体质量指数; SUI: 压力性尿失禁; * 以例(%)表示。

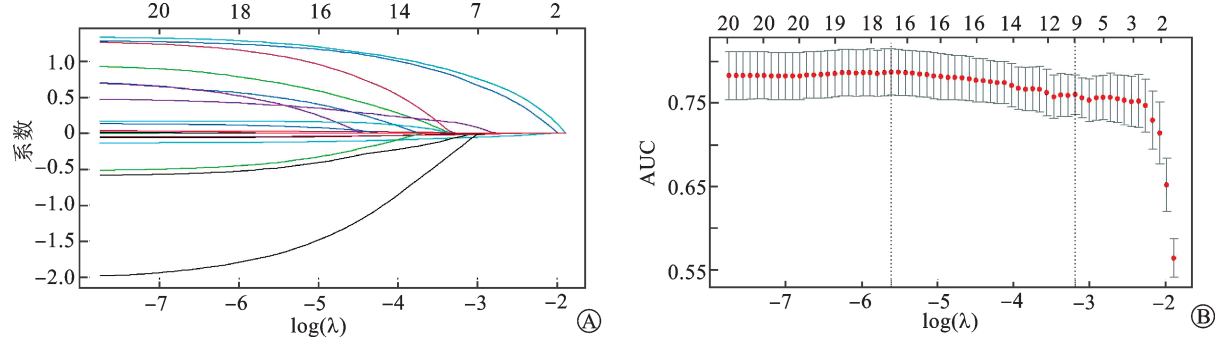
2.2 Lasso 回归分析结果 为降低多重共线性以及过拟合偏差对模型的影响,采用 Lasso 回归进一步筛选变量。以是否患有 SUI 为因变量,分别对产后组及非产后组进行 Lasso 回归分析。使用最低标准的 5 折交叉验证确定最优 λ ,绘制二项偏差与 $\log \lambda$ 的关系曲线,在最小标准($\lambda = \min$)和最小标准的 1 倍标准差($\lambda = 1 \text{ se}$)最优值处画虚线垂直线,选取 $\lambda = 1 \text{ se}$

时的结果。产后组 $\lambda = 0.035 \ 92$,筛选出的最佳预测因素为:年龄、BMI、快肌阶段最大值、孕次、BND、URA、会阴侧切、既往尿失禁史及便秘(图 1)。非产后组 $\lambda = 0.041 \ 06$ 时,筛选出的最佳预测因素为:年龄、BMI、快肌阶段最大值及恢复时间、慢肌阶段平均值、后静息阶段变异性、阴道分娩、既往尿失禁史及便秘(图 2)。



A:Lasso 回归系数分布图;B:Lasso 回归模型中最佳参数(λ)的选择;AUC:曲线下面积。

图 1 产后组 Lasso 回归筛选特征变量



A:Lasso 回归系数分布图;B:Lasso 回归模型中最佳参数(λ)的选择;AUC:曲线下面积。

图 2 非产后组 Lasso 回归筛选特征变量

2.3 训练集与验证集的临床资料比较 将清洗过后的数据集以 7 : 3 的比例随机划分为训练集和验证集

以便后续建模。产后组及非产后组的训练集与验证集临床资料比较,差异均无统计学意义($P > 0.05$,表 4、5)。

表 4 产后组训练集与验证集临床资料比较					[M(P25,P75)]				
项目	训练集 (n=428)	验证集 (n=183)	t/ Z 值	P 值	项目	训练集 (n=428)	验证集 (n=183)	t/ Z 值	P 值
年龄/岁	30.0(27.0,33.0)	30.0(28.0,33.0)	-0.5	0.584	尿失禁既往史*			0	0.994
BMI	24.8(23.8,26.0)	24.9(23.8,25.9)	-0.3	0.739	否	227(53.0)	97(53.0)		
孕次*			-0.5	0.640	是	201(46.9)	86(47.0)		
1	185(43.2)	74(40.4)			便秘史*			-0.2	0.979
2	131(30.6)	61(33.3)			否	211(49.3)	90(49.2)		
3	68(15.9)	28(15.3)			是	217(50.7)	93(50.8)		
4	25(5.8)	12(6.6)			快肌阶段	32.9(23.1,43.4)	31.6(21.7,44.5)	-0.1	0.888
5	15(3.5)	5(2.7)			最大值/ μV				
6	4(0.9)	3(1.6)			BND/mm	27.0(24.0,29.0)	27.0(24.5,30.0)	-0.5	0.588
会阴侧切*			-0.7	0.474	URA/ $^{\circ}$	27.0(22.0,31.0)	26.0(22.0,30.5)	-0.6	0.561
否	270(63.1)	121(66.1)							
是	158(36.9)	62(33.9)							

BMI: 身体质量指数;BND: 膀胱颈移动度;URA: 尿道旋转角;* 以例(%)表示。快肌阶段最大值属于盆底肌电检查数据;BND 及 URA 属盆底四维超声检查数据。

表 5 非产后组训练集与验证集临床资料比较

[$M(P25, P75)$]

项目	训练集($n=287$)	验证集($n=122$)	t/Z 值	P 值
BMI	24.9(24.1, 25.8)	25.1(24.1, 25.8)	-1.3	0.210
阴道分娩 [*]			-1.7	0.089
否	115(40.0)	60(49.2)		
是	172(60.0)	62(50.8)		
既往尿失禁史 [*]			-0.4	0.720
否	145(50.5)	64(52.5)		
是	142(49.5)	58(47.5)		
便秘史 [*]			-0.4	0.679
否	171(59.6)	70(57.4)		
是	116(40.4)	52(42.6)		
快肌阶段最大值/ μV	32.5(28.0, 36.0)	32.1(27.1, 35.5)	-0.9	0.344
慢肌阶段平均值/ μV	27.2(23.9, 31.2)	28.4(25.4, 31.9)	-1.5	0.147
后静息阶段变异性	0.1(0.1, 0.2)	0.1(0.1, 0.2)	-1.5	0.131

BMI: 身体质量指数; ^{*} 以例(%)表示。快肌阶段最大值、慢肌阶段平均值及后静息阶段变异性属于盆底肌电检查数据。

2.4 KNN 模型及效能 产后组: 在 $K=40$ 时模型效能最优, 训练集的 $AUC=0.898$ (95% $CI: 0.871 \sim 0.926$), 验证集的 $AUC=0.881$ (95% $CI: 0.833 \sim 0.929$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.521$)。非产后组: 在 $K=50$ 时模型效能最优, 训练集的 $AUC=0.864$ (95% $CI: 0.822 \sim 0.905$), 验证集的 $AUC=0.819$ (95% $CI: 0.743 \sim 0.895$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.312$)。

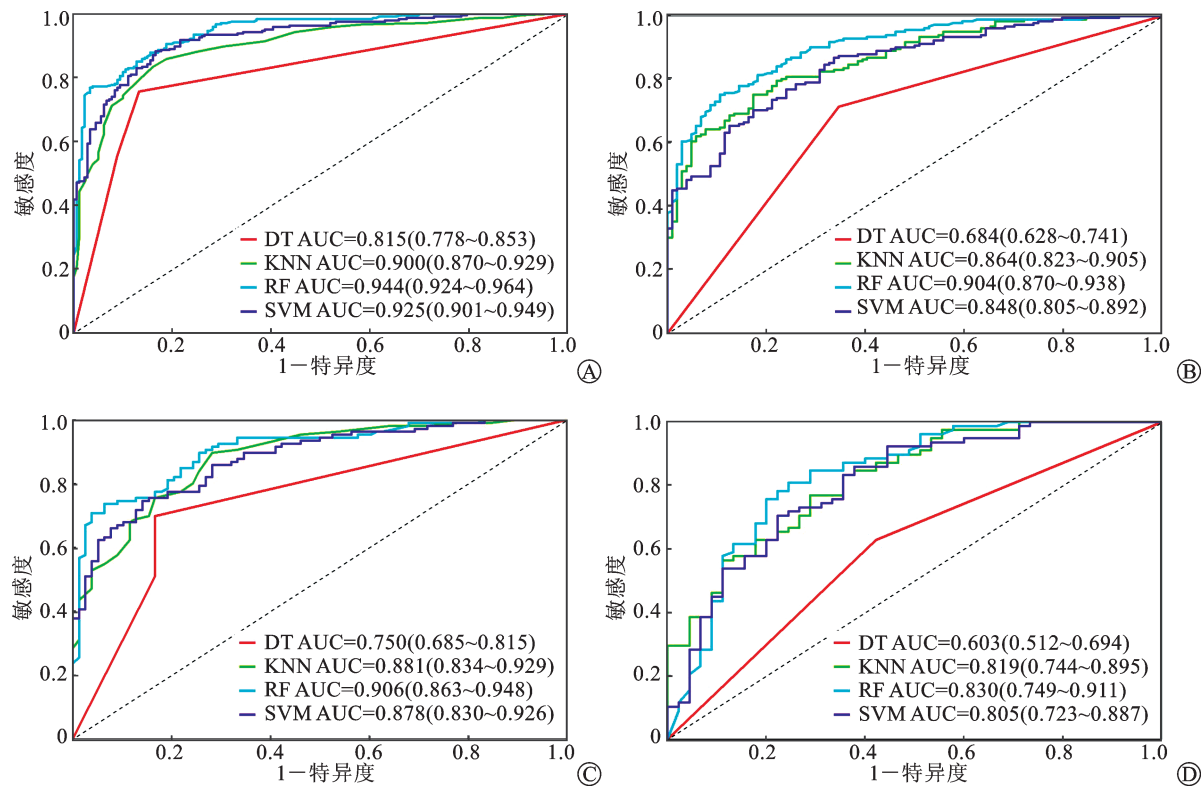
2.5 SVM 模型及效能 产后组: 在使用径向基核函数、 C 参数 = 1.36, $\gamma=0.023$ 时模型效能最优, 训练集的 $AUC=0.925$ (95% $CI: 0.902 \sim 0.948$), 验证集的 $AUC=0.878$ (95% $CI: 0.830 \sim 0.925$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.087$)。非产后组: 在使用径向基核函数、 C 参数 = 0.062, $\gamma=0.046$ 时模型效能最优, 训练集的 $AUC=0.848$ (95% $CI: 0.804 \sim 0.892$), 验证集的 $AUC=0.804$ (95% $CI: 0.722 \sim 0.887$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.361$)。

2.6 DT 模型及效能 产后组最大树深为 5, 叶节点最小样本量为 165, 模型复杂度为 0.092 4。非产后组最大树深为 8, 叶节点最小样本量为 164, 模型复杂度为 0.092 4。产后组: 训练集的 $AUC=0.815$ (95%

$CI: 0.778 \sim 0.852$), 验证集的 $AUC=0.750$ (95% $CI: 0.684 \sim 0.815$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.089$)。非产后组: 训练集的 $AUC=0.684$ (95% $CI: 0.627 \sim 0.740$), 验证集的 $AUC=0.603$ (95% $CI: 0.512 \sim 0.693$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.138$)。

2.7 RF 模型及效能 产后组: 在 $n_{tree}=461$, $m_{try}=5$, 每个叶节点包含的 min_n 为 48。训练集的 $AUC=0.946$ (95% $CI: 0.924 \sim 0.964$), 验证集的 $AUC=0.905$ (95% $CI: 0.863 \sim 0.948$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.107$)。非产后组: 在 $n_{tree}=461$, $m_{try}=5$, 每个叶节点包含的 min_n 为 48, 训练集的 $AUC=0.903$ (95% $CI: 0.869 \sim 0.937$), 验证集的 $AUC=0.830$ (95% $CI: 0.749 \sim 0.911$), Delong 检验二者 AUC 差异无统计学意义 ($P=0.101$)。

2.8 模型性能评估 基于 KNN、SVM、DT、RF 机器学习方法分别对产后组及非产后组构建 SUI 发病的预测模型, ROC 曲线见图 3。本文计算了各模型的 AUC 、敏感度、特异度、准确度、 $F1$ 指数、 $Kappa$ 值, 以求更加综合的评估模型的性能, 各模型效能指标见表 6。在产后组与非产后组分析中, RF 模型的 AUC 最大, 同时其准确度、 $Kappa$ 值最高, 即该模型预测效能最高。



A:产后组各模型在训练集的 ROC 曲线;B:非产后组各模型在训练集的 ROC 曲线;C:产后组各模型在验证集的 ROC 曲线;D:非产后组各模型在验证集的 ROC 曲线。ROC:受试者工作特征;AUC:曲线下面积;KNN:K 最近邻法;SVM:支持向量机;DT:决策树;RF:随机森林。

图 3 各模型在训练集、验证集中识别压力性尿失禁的 ROC 曲线

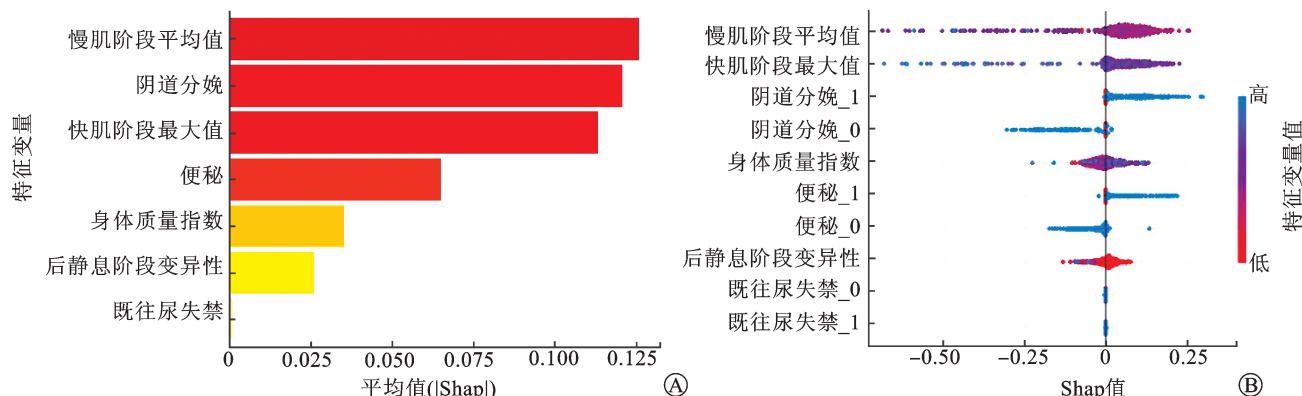
表 6 各模型在训练集、验证集中识别压力性尿失禁的效能

组别	模型	AUC	敏感度	特异度	准确度	F1 指数	Kappa 值
产后组训练集	KNN	0.900	0.833	0.840	0.836	0.854	0.667
	SVM	0.925	0.882	0.834	0.862	0.880	0.717
	DT	0.815	0.756	0.867	0.803	0.816	0.608
	RF	0.944	0.768	0.967	0.852	0.857	0.709
产后组验证集	KNN	0.881	0.802	0.756	0.783	0.810	0.556
	SVM	0.878	0.802	0.731	0.772	0.802	0.533
	DT	0.750	0.698	0.833	0.755	0.767	0.515
	RF	0.905	0.736	0.910	0.810	0.817	0.624
非产后组训练集	KNN	0.864	0.753	0.827	0.780	0.813	0.549
	SVM	0.848	0.868	0.663	0.794	0.843	0.544
	DT	0.684	0.714	0.654	0.692	0.747	0.356
	RF	0.904	0.753	0.894	0.804	0.830	0.605
非产后组验证集	KNN	0.819	0.654	0.756	0.691	0.729	0.381
	SVM	0.805	0.782	0.644	0.732	0.787	0.425
	DT	0.603	0.628	0.578	0.610	0.671	0.197
	RF	0.830	0.679	0.822	0.732	0.763	0.465

AUC:曲线下面积;KNN:K 最近邻法;SVM:支持向量机;DT:决策树;RF:随机森林。

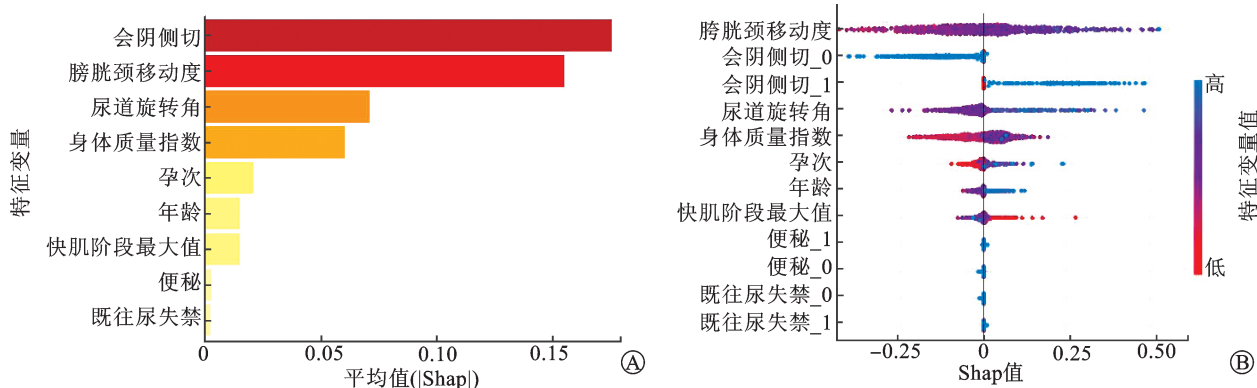
2.9 模型的可解释性 图4可见在非产后组排名前5的影响因素依次为:慢肌阶段平均值、阴道分娩、快肌阶段最大值、便秘及BMI。图5可见在产后组排名前5的影响因素依次为:会阴侧切、BND、URA、BMI、孕次。由于本研究缺乏外部验证组,故分别在

产后组和非产后组随机抽取1例样本纳入计算。患者1(图6A)其样本SHAP高于基线SHAP,正确预测该患者SUI发病高风险。患者2(图6B)其样本SHAP低于基线SHAP,正确预测该患者SUI发病低风险。



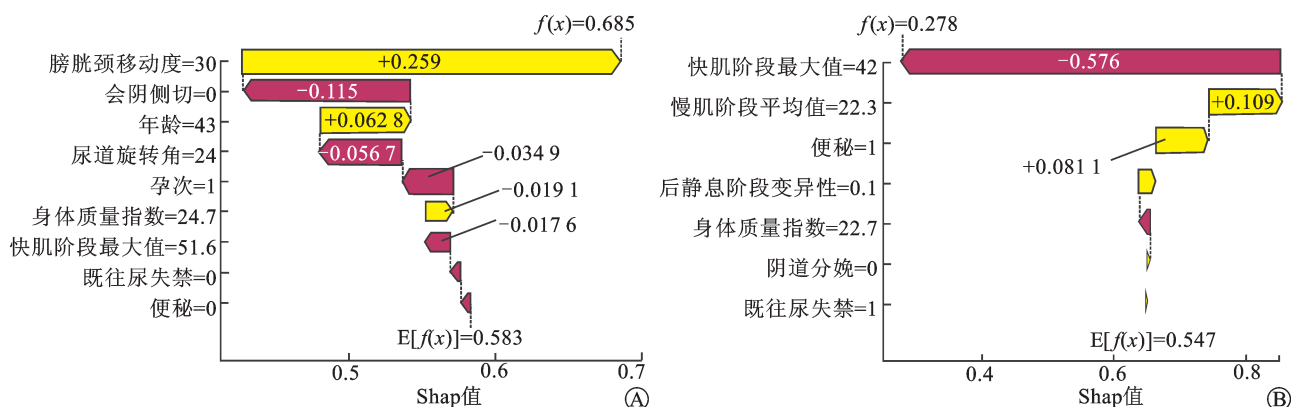
A:非产后组随机森林模型平均排序的变量重要性图;B:非产后组随机森林模型各变量对结果产生了何种影响。

图4 非产后组随机森林模型可视化解释



A:产后组随机森林模型平均排序的变量重要性图;B:产后组随机森林模型各变量对结果产生了何种影响。

图5 产后组随机森林模型可视化解释



A:产后组随机森林模型预测患者1发生压力性尿失禁的SHAP模型预测力图;B:非产后组随机森林模型预测患者2发生压力性尿失禁的SHAP模型预测力图。

图6 SHAP模型预测力图

3 讨论

SUI是在女性中高发的一种盆底功能障碍性疾病

病,其不仅降低了女性的生活质量,也提高了医疗成本。目前临床多采用盆底肌训练、生物反馈电刺激等方法治疗SUI,但疗效却参差不齐。因此,对高危人

群进行疾病的早期筛查,针对其暴露的危险因素制定干预方案,可以有效降低医疗成本及疾病负担。

机器学习具有良好的分析和预测能力,且已被运用于多种临床分析及辅助诊断中。ZHANG 等^[10]收集产后女性的一般资料及分娩资料,使用逻辑回归构建产后女性 SUI 发病的预测模型并绘制列线图,模型 AUC 为 0.746。FU 等^[11]使用内部验证逻辑回归、RF 和极端梯度增强(extreme gradient boosting, XGBoost)模型对脱垂术后患者 SUI 的发生率进行预测,XGBoost 模型表现出较好的预测性能。目前大部分研究多聚焦于产后及脱垂术后 SUI 发生率的预测,且常使用逻辑回归构建模型,这可能存在模型代表性不足、非线性关系因素处理欠佳等缺点。本研究结合本院病历资料,针对产后 42 d 的女性(产后组)及围绝经期与绝经后女性(非产后组)分别使用多种机器学习的方法构建 SUI 发病的预测模型,并对模型进行择优选择,提高可解释性,以期构建适用性较高的模型。

考虑到单纯 logistic 回归无法有效解决非线性问题,而 Lasso 回归能降低变量间的多重共线性问题^[12],因此本研究使用单因素 logistic 回归及 Lasso 回归分析筛选纳入模型的特征变量,结果显示年龄、BMI、快肌阶段最大值、孕次、BND、URA、会阴侧切、既往尿失禁史及便秘为产后 42 d 女性发生 SUI 的高危因素;年龄、BMI、快肌阶段最大值及恢复时间、慢肌阶段平均值、后静息阶段变异性、阴道分娩、既往尿失禁史及便秘为围绝经期与绝经后女性发生 SUI 的高危因素。使用医学中常用的几个机器学习方法进行建模:DT 是常见的模型之一,可解释性高,运算简单,但易出现拟合偏差;RF 是在 DT 基础上进行的一种算法,以随机抽样在一定程度上降低了 DT 的拟合偏差,擅长处理复杂数据;SVM 是二元分类的广义线性分类算法,具有稀疏性、稳定性和简便性的特点^[13];KNN 以距离度量进行分类,是简便快捷的分类器。将上述高危因素纳入以上 4 种模型,分析 AUC、准确度等指标,发现 RF 在两组表现均最佳,并使用该模型对两组进行变量重要性分析,结果显示在非产后组排名前 5 的影响因素依次为:慢肌阶段平均值、阴道分娩、快肌阶段最大值、便秘及 BMI;在产后组排名前 5 的影响因素依次为:会阴侧切、BND、URA、BMI 及孕次,同既往 SUI 危险因素的研究结果基本一致^[14-17]。值得注意的是,在非产后组,慢肌的肌力水平与阴道分娩为最重要的 2 个因素,这可能是由于年龄的增加和阴道分娩,均导致盆底肌力衰弱、弹性减退,无法对抗额外增加的腹压,使得膀胱内

压高于尿道内压,最终导致 SUI 的发生^[14]。在产后组,会阴侧切、BND 是最为重要的 2 个因素。同王莹等^[18]结论一致,会阴侧切可影响局部神经传递并损伤盆底多层肌肉,增加 SUI 的风险,BND 的升高提示在应力情况下,膀胱颈与尿道发生了更大的位移,导致压力传导比例降低^[15],进而导致 SUI 的发生。本研究最后使用 SHAP 方法使模型可视化并以测力图量化患者的发病风险,随机抽取的 2 例患者均被准确预测是否发病。

本研究存在以下局限性:①本研究属单中心、回顾性研究,在数据记录时可能有回忆偏倚、报告偏倚等,这可能导致收集的数据质量不高。②本研究对缺失值的处理方法可适当提高数据质量,从而提高模型的准确性及稳定性,但被删除的变量可能包含有价值的信息,导致模型无法捕捉变量之间的潜在关系,对于缺失值的填补方法可能改变原有数据的分布情况,影响变量之间的关系,从而降低模型的性能。③结合本院的实际情况,产后组女性在产后 42 d 常规行产后盆底功能筛查,相关检查包括盆底四维超声及盆底肌电功能检查,而非产后组女性,仅常规行盆底肌电筛查。盆底超声可提供盆底器官的位置、形态、结构等信息,缺乏此部分数据可能导致对非产后组女性的盆底解剖结构评估欠缺,无法准确捕捉疾病相关特征,导致模型对疾病的预测准确性降低。针对此现象,拟在后续的研究中完善非产后组女性的盆底四维超声检查,收集相关数据后进一步完善模型的构建。同时,收集其他医院就诊的女性患者的相关数据,构成外部验证集,进一步评估并提高模型的性能。

综上所述,本研究结果提示盆底肌电检查及产后盆底四维超声检查对 SUI 的诊断有一定贡献,因此在 SUI 疾病的筛查工作中,若条件允许可完善这 2 种检查,以便更好地评估女性盆底的解剖结构及盆底肌力的变化。同时,根据当前相关研究并结合本研究结果可知,SUI 的发生与盆底解剖结构的改变以及盆底肌力的减弱密切相关。针对此原因,建议对轻中度 SUI 患者行盆底生物反馈电刺激,以刺激盆底肌有节律的收缩,改善盆底肌血液循环,从而减轻漏尿症状;对于重度患者可在评估患者病情及身体状况后行尿道悬吊术,以加强女性中段尿道的支托力从而达到控尿的目的。本研究结论可帮助高危人群实现 SUI 的早期筛查,并针对其暴露的危险因素,采取相应治疗及预防措施,进一步提高女性的生活质量。

参考文献:

- [1] 周艳艳,丁家森,高瞻,等.女性压力性尿失禁中医诊疗指南

- (2023)[J].中医杂志,2024,65(13):1408-1416.
- [2] 金鑫悦,黄锦华,尤晓凤,等.近10年中国成年女性压力性尿失禁患病率及影响因素的Meta分析[J].中国疗养医学,2024,33(3):24-29.
- [3] BEECKMAN D.A decade of research on incontinence-associated dermatitis (IAD):evidence, knowledge gaps and next steps[J].J Tissue Viability,2017,26(1):47-56.
- [4] REIS AM, BRITO LGO, LUNARDI ALB, et al. Depression, anxiety, and stress in women with urinary incontinence with or without myofascial dysfunction in the pelvic floor muscles: a cross-sectional study[J].Neurourol Urodyn, 2021, 40(1):334-339.
- [5] 王元毅.新疆南疆地区女性压力性尿失禁的人工神经网络模型构建[D].新疆:石河子大学,2021.
- [6] 郑睿颖,刘根焰.机器学习在感染性疾病临床预测模型中的应用进展[J].中国血吸虫病防治杂志,2023,35(3):317-321.
- [7] 杨欣,王建六,孙秀丽,等.北京大学女性压力性尿失禁诊疗指南(草案)[J].中国妇产科临床杂志,2012,13(2):158-160.
- [8] 中华医学会妇产科学分会妇科盆底学组.女性压力性尿失禁诊断和治疗指南(2017)[J].中华妇产科杂志,2017,52(5):289-293.
- [9] BI Y, XIANG D, GE Z, et al. An interpretable prediction model for identifying N⁷-methylguanosine sites based on XGBoost and SHAP[J].Mol Ther Nucleic Acids,2020,22:362-372.
- [10] ZHANG D, ZHOU M, ZHANG M, et al. Development and external validation of clinical predictive model for stress urinary incontinence in Chinese women: a multicenter retrospective study[J]. BMC Womens Health,2024,24(1):532.
- [11] FU L, HUANG G, SUN Z, et al. Predicting the occurrence of stress urinary incontinence after prolapse surgery: a machine learning-based model[J].Ann Transl Med,2023,11(6):251.
- [12] 孟祥勇,秦嘉怡,陈文生.基于机器学习的早期胃癌淋巴结转移预测模型构建与验证[J].陆军军医大学学报,2024,46(21):2432-2442.
- [13] 王厚清,刘瑜,谭夏秋,等.基于机器学习的预测前列腺癌生化复发的多基因模型的构建[J].临床泌尿外科杂志,2024,39(12):1107-1111.
- [14] 胡洋,楼叶琳,张恒,等.盆底超声与盆底肌电生理参数评估产后女性压力性尿失禁的相关性研究[J].浙江医学,2022,44(10):1099-1103.
- [15] 邓肖群,龙晓莉,陈浩,等.盆底超声参数及盆底肌电生理参数与女性产后尿失禁患者病情严重程度的相关性研究[J].临床和实验医学杂志,2024,23(8):868-872.
- [16] 郝雨,钱彪,倪钊,等.初步探索新疆阿拉尔地区女性压力性尿失禁患者盆底超声的特征改变[J].吉林医学,2020,41(12):2890-2894.
- [17] 于津,谢军.产后压力性尿失禁危险因素的探讨及其预测模型的构建[J].同济大学学报(医学版),2022,43(3):421-426.
- [18] 王莹,文英,马琳,等.会阴侧切分娩助产对经阴道自然分娩产后盆底功能的影响[J].中国当代医药,2021,28(32):109-112.

(编辑 闫玉梅)

(上接第195页)

- [21] THE COMMITTEE FOR ESTABLISHMENT OF THE CLINICAL GUIDELINES FOR NOCTURIA OF THE NEUROGENIC BLADDER SOCIETY. Clinical guidelines for nocturia[J].Int J Urol,2010,17(5):397-409.
- [22] SMITH M, DAWSON S, ANDREWS RC, et al. Evaluation and treatment in urology for nocturia caused by nonurological mechanisms: guidance from the PLANET study[J].Eur Urol Focus, 2022,8(1):89-97.
- [23] CUI J, BO Q, ZHANG N, et al. Fluid intake-to-bed time, nocturia frequency and the risk of urothelial carcinoma of the bladder: a case-control study[J].J Cancer,2017,8(16):3268-3273.
- [24] SMITH A, WEIN A. Current pharmacotherapy of nocturia[J].Expert Opin Pharmacother,2013,14(7):885-894.
- [25] HASAN F, TU YK, LIN CM, et al. Comparative efficacy of exercise regimens on sleep quality in older adults: a systematic review and network meta-analysis[J].Sleep Med Rev, 2022, 65:101673.
- [26] HER J, CHO MK. Effect of aromatherapy on sleep quality of adults and elderly people: a systematic literature review and meta-analysis[J].Complement Ther Med,2021,60:102739.
- [27] CHEN CT, TUNG HH, FANG CJ, et al. Effect of music therapy on improving sleep quality in older adults: a systematic review and meta-analysis[J].J Am Geriatr Soc,2021,69(7):1925-1932.
- [28] GUPTA CC, IRWIN C, VINCENT GE, et al. The relationship between diet and sleep in older adults: a narrative review[J].Curr Nutr Rep,2021,10(3):166-178.
- [29] ARLANDIS S, BØ K, COBUSSEN-BOEKHORST H, et al. European association of urology guidelines on the management of female non-neurogenic lower urinary tract symptoms. Part 2: underactive bladder, bladder outlet obstruction, and nocturia[J].Eur Urol,2022,82(1):60-70.
- [30] KAGA K, YAMANISHI T, SHIBATA C, et al. The efficacy of compression stockings on patients with nocturia: a single-arm pilot study[J].Cureus,2022,14(8):e28603.
- [31] XIA ZD, HU D, WILSON JM, et al. How echographic image analysis of venous oedema reveals the benefits of leg elevation[J].J Wound Care,2004,13(4):125-128.
- [32] EVERAERT K, HERVÉ F, BOSCH R, et al. International Continence Society consensus on the diagnosis and treatment of nocturia[J].Neurourol Urodyn,2019,38(2):478-498.

(编辑 闫玉梅)