· 疾病控制 ·

2型糖尿病患者外周动脉疾病风险预测模型研究

杜雨欣[1]，余欢[1]，李雅倩[1]，唐美丽[2]，刘宜苑[2]，余艳梅[2]，刘雪彦[2]

1.暨南大学护理学院，广东 广州 510632；2.暨南大学附属第一医院，广东 广州 510630

摘要：目的 构建2型糖尿病（T2DM）患者外周动脉疾病（PAD）风险预测模型，为PAD风险评估与早期筛查提供依据。**方法** 选择2018年12月—2020年12月在暨南大学附属第一医院住院治疗的T2DM患者为研究对象，通过电子病历系统收集患者性别、年龄等基本信息，空腹血糖、糖化血红蛋白等实验室指标，以及足部胼胝、足部异常感觉和电流感觉阈值（CPT）等足部筛查指标。研究对象按7∶3比例随机分为训练集和验证集。采用LASSO回归和多因素logistic回归模型筛选预测因子，构建列线图预测模型。采用受试者操作特征曲线下面积（AUC）、Hosmer-Lemeshow检验和决策曲线分析评估模型的预测性能。**结果** 纳入T2DM患者972例，其中男性535例，占55.04%；女性437例，占44.96%。年龄M（Q_R）为59.00（18.00）岁。检出PAD 84例，检出率为8.64%。训练集681例，PAD 59例；验证集291例，PAD 25例。多因素logistic回归分析结果显示，年龄（OR=1.053，95%CI：1.027~1.080）、足部异常感觉（疼痛，OR=4.517，95%CI：1.610~12.667）和CPT（OR=1.094，95%CI：1.022~1.171）是T2DM患者PAD的预测因子。构建的列线图预测模型在训练集中AUC值、灵敏度和特异度分别为0.771、0.780和0.701，当风险阈值概率为1%~26%时，临床净获益较高；在验证集中AUC值、灵敏度和特异度分别为0.752、0.800和0.628；当风险阈值概率为1%~43%时，临床净获益较高。Hosmer-Lemeshow检验结果显示，模型在训练集和验证集中校准度良好（均P>0.05）。**结论** 采用年龄、足部异常感觉和CPT 3个预测因子构建的列线图预测模型有较好的区分度、校准度和临床净获益，可用于预测T2DM患者PAD风险。

关键词：2型糖尿病；外周动脉疾病；预测模型；列线图

中图分类号：R587.1 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5087（2026）10-1012-05

Prediction model for the risk of peripheral arterial disease among patients with type 2 diabetes mellitus

DU Yuxin[1], YU Huan[1], LI Yaqian[1], TANG Meili[2], LIU Yiyuan[2], YU Yanmei[2], LIU Xueyan[2]

1.School of Nursing, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

2.The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510630, China

Abstract: Objective To establish a prediction model for the risk of peripheral arterial disease (PAD) among patients with type 2 diabetes mellitus (T2DM), so as to provide a basis for risk assessment and early screening of PAD. **Methods** Patients with T2DM hospitalized at the First Affiliated Hospital of Jinan University from December 2018 to December 2020 were selected as study subjects. Basic information, including gender and age, laboratory indicators, including fasting blood glucose and glycated hemoglobin, and foot screening indicators, including foot calluses, abnormal foot sensations and current perception threshold (CPT), were collected through the electronic medical record system. The study subjects were randomly divided into a training set and a validation set at a ratio of 7∶3. Predictors were screened using LASSO regression and multivariable logistic regression, and a nomogram prediction model was established. The predictive performance of the model was evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (AUC),

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.10.008

基金项目：广东省数字孪生人重点实验室（华南理工大学）基金项目（2022B1212010004）；2025年疏附县科技局计划项目（SF2025006）

作者简介：杜雨欣，硕士研究生在读，护理专业

通信作者：刘雪彦，E-mail：10181541@qq.com

the Hosmer-Lemeshow test and decision curve analysis. **Results** A total of 972 patients with T2DM were collected, including 535 (55.04%) males and 437 (44.96%) females. The median age was 59.00 (interquartile range, 18.00) years. PAD was detected in 84 patients, with a detection rate of 8.64%. The training set included 681 patients, with 59 PAD cases, while the validation set included 291 patients, with 25 PAD cases. Multivariable logistic regression analysis showed that age (*OR*=1.053, 95%*CI*: 1.027-1.080), abnormal foot sensation (pain, *OR*=4.517, 95%*CI*: 1.610-12.667) and CPT (*OR*=1.094, 95%*CI*: 1.022-1.171) were predictors of PAD among patients with T2DM. In the training set, the *AUC*, sensitivity and specificity were 0.771, 0.780 and 0.701, with a higher net clinical benefit at risk threshold probabilities of 1%-26%. In the validation set, the *AUC*, sensitivity and specificity were 0.752, 0.800 and 0.628, respectively, with a higher net clinical benefit at risk threshold probabilities of 1%-43%. The Hosmer-Lemeshow test showed good model calibration in both the training and validation sets (both $P>0.05$). **Conclusion** The nomogram prediction model constructed using three predictors, including age, abnormal foot sensation and CPT, showed good discrimination, calibration and net clinical benefit, and can be used to predict the risk of PAD in patients with T2DM.

Keywords: type 2 diabetes mellitus; peripheral arterial disease; prediction model; nomogram

外周动脉疾病（peripheral arterial disease，PAD）是2型糖尿病（type 2 diabetes mellitus，T2DM）常见的大血管并发症之一，典型症状为间歇性跛行，随病情进展可出现静息痛、下肢缺血性溃疡甚至坏疽，进而导致截趾甚至截肢[1]，并增加心血管事件风险[2]。研究显示，T2DM患者PAD患病率为21.2%[3]，早期PAD常缺乏典型症状，多数患者直至出现静息痛或下肢缺血性溃疡时得以诊断，从而错失最佳干预时机[4]。构建T2DM患者PAD风险预测模型，有助于早期识别高危人群、指导个体化筛查与干预，从而降低PAD漏诊率及心血管事件风险。既往研究构建的T2DM患者PAD风险预测模型存在指标复杂、临床推广受限等不足[5-6]。本研究选择在暨南大学附属第一医院住院治疗的T2DM患者为研究对象，筛选PAD风险预测因子并建立列线图预测模型，为PAD风险评估与早期筛查提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选择2018年12月—2020年12月在暨南大学附属第一医院住院治疗的T2DM患者为研究对象。纳入标准：（1）符合1999年世界卫生组织（WHO）发布的T2DM诊断标准[7]；（2）四肢活动正常；（3）认知功能良好；（4）临床资料完整。排除标准：（1）合并糖尿病酮症酸中毒、高渗高血糖状态等急性并发症；（2）严重心、肝和肾等重要脏器功能衰竭；（3）有其他影响下肢血管或神经评估的疾病。本研究通过暨南大学附属第一医院伦理委员会审查（Kyk-2021-002），研究对象均签署知情同意。

1.2 方法

1.2.1 资料收集

通过电子病历系统收集T2DM患者资料，包括：（1）基本信息，性别、年龄、文化程度、糖尿病病程、糖尿病家族史、吸烟、饮酒、体质指数（BMI）、医疗付费方式和降糖药使用情况；（2）实验室指标，空腹血糖、糖化血红蛋白、三酰甘油、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇；（3）足部筛查指标，足部胼胝、足部异常感觉、音叉振动觉、温度觉、尼龙丝压力觉、振动感觉阈值（vibration perception threshold，VPT）和电流感觉阈值（current perception threshold，CPT）。

1.2.2 PAD诊断标准

由经过统一培训的医护人员采用VistaAVS多普勒血流检测仪（北京蓝讯时代科技有限公司，VASODOP C1）检测双侧踝部及肱动脉收缩压，计算踝肱指数（ankle-brachial index，ABI），ABI为踝部收缩压与同侧肱动脉收缩压的比值，踝部收缩压以胫后动脉或足背动脉的测量值计算[8]。参照美国心脏病学会PAD诊断标准，ABI＜0.9判定为PAD[9]。

1.2.3 PAD风险预测模型构建与评价

研究对象按7∶3比例随机分为训练集和验证集。采用LASSO回归，通过10折交叉验证确定最优惩罚参数λ值筛选候选预测因子，将候选预测因子纳入多因素logistic回归模型确定预测因子并构建列线图预测模型。采用受试者操作特征（receiver operating characteristic，ROC）曲线下面积（area under the curve，AUC）及其95%*CI*、灵敏度和特异度评估模型区分度；采用Hosmer-Lemeshow检验评估模型校准度；采用决策曲线分析（decision curve analysis，DCA）评估临床净获益。

1.3 统计分析

采用R 4.5.2软件统计分析。定量资料不服从正态分布的采用中位数和四分位数间距［M（Q_R）］描述，组间比较采用Mann-Whitney U检验；定性资料

采用相对数描述，组间比较采用 χ^2 检验。检验水准 α=0.05。

2 结 果

2.1 T2DM 患者基本特征

纳入 T2DM 患者 972 例，其中男性 535 例，占 55.04%；女性 437 例，占 44.96%。年龄 M（Q_R）为 59.00（18.00）岁。文化程度以中学为主，390 例占 40.12%。糖尿病病程 M（Q_R）为 7.00（10.00）年。检出 PAD 84 例，检出率为 8.64%。训练集 681 例，检出 PAD 59 例；验证集 291 例，检出 PAD 25 例。训练集和验证集性别、年龄、文化程度、糖尿病病程、糖尿病家族史、吸烟、饮酒、BMI、医疗付费方式、降糖药使用情况、空腹血糖、糖化血红蛋白、三酰甘油、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、足部胼胝、足部异常感觉、音叉振动觉、温度觉、尼龙丝压力觉、VPT 和 CPT 比较，差异无统计学意义（均 P>0.05）。见表 1。

2.2 T2DM 患者 PAD 预测模型构建

LASSO 回归分析结果显示，采用 10 折交叉验证确定最优惩罚参数 λ=0.015，筛选出年龄、医疗付费方式、足部异常感觉、尼龙丝压力觉、VPT 和 CPT 6 个候选预测因子。以 PAD 为因变量（0=否，1=是），以上述 6 个候选预测因子为自变量，进行多因素 logistic 回归分析。结果显示，年龄、足部异常感觉和 CPT 是 T2DM 患者 PAD 的预测因子。见表 2。基于 3 个预测因子构建 T2DM 患者 PAD 风险列线图预测模型，各预测因子得分相加为总分，对应 PAD 风险，总分越高，T2DM 患者 PAD 风险越高。见图 1。

表 1 训练集和验证集基本特征比较

Table 1 Comparison of basic characteristics between the training set and the validation set

项目	训练集	验证集	χ^2/Z值	P值
性别			1.065	0.302
男	367（53.89）	168（57.73）		
女	314（46.11）	123（42.27）		
年龄/岁①	59.00（17.00）	60.00（19.00）	−0.540	0.589
文化程度			5.112	0.164
文盲	36（5.29）	10（3.44）		
小学	191（28.05）	99（34.02）		
中学	283（41.56）	107（36.77）		
大专及以上	171（25.11）	75（25.77）		
糖尿病病程/年①	7.00（10.00）	8.00（11.00）	1.074	0.282
糖尿病家族史			0.435	0.510
有	196（28.78）	77（26.46）		
无	485（71.22）	214（73.54）		
吸烟			1.551	0.213
是	140（20.56）	71（24.40）		
否	541（79.44）	220（75.60）		
饮酒			1.790	0.181
是	55（8.08）	32（11.00）		
否	626（91.92）	259（89.00）		
BMI/（kg/m²）①	24.30（4.89）	24.67（4.71）	1.093	0.274
医疗付费方式			2.314	0.510
自费	93（13.66）	49（16.84）		
公费	44（6.46）	15（5.15）		
医保	407（59.77）	166（57.04）		
其他	137（20.12）	61（20.96）		
降糖药使用情况			4.389	0.222
无	88（12.92）	26（8.93）		
胰岛素	48（7.05）	18（6.19）		
口服降糖药	335（49.19）	160（54.98）		
胰岛素+口服降糖药	210（30.84）	87（29.90）		
空腹血糖/（mmol/L）①	7.42（4.37）	7.51（5.33）	0.365	0.715
糖化血红蛋白/%①	9.00（3.90）	9.20（4.10）	−0.139	0.889
三酰甘油/（mmol/L）①	1.46（1.09）	1.48（1.23）	1.153	0.249
总胆固醇/（mmol/L）①	4.72（1.82）	4.82（1.64）	0.669	0.503
高密度脂蛋白胆固醇/（mmol/L）①	0.98（0.32）	0.98（0.31）	0.852	0.394
低密度脂蛋白胆固醇/（mmol/L）①	2.73（1.29）	2.81（1.17）	0.842	0.400
足部胼胝			0.578	0.447
有	19（2.79）	5（1.72）		
无	662（97.21）	286（98.28）		
足部异常感觉			0.806	0.668
无	509（74.74）	210（72.16）		
麻木	147（21.59）	68（23.37）		
疼痛	25（3.67）	13（4.47）		
音叉振动觉			0.001	0.970
正常	585（85.9）	249（85.57）		
异常	96（14.1）	42（14.43）		
温度觉			0.057	0.812
正常	586（86.05）	248（85.22）		
异常	95（13.95）	43（14.78）		
尼龙丝压力觉			2.124	0.145
正常	609（89.43）	250（85.91）		
异常	72（10.57）	41（14.09）		
VPT/V①	15.90（16.10）	15.10（15.25）	−0.537	0.591
CPT/mA①	0（7.00）	0（7.00）	−0.251	0.788

注：①表示采用M（Q_R）描述，组间比较采用Mann-Whitney U检验；同列其他项采用n（%）描述，组间比较采用χ^2检验。

2.3 T2DM 患者 PAD 预测模型验证

模型在训练集中的 *AUC* 值、灵敏度和特异度分别为 0.771（95%*CI*：0.710~0.832）、0.780 和 0.701；在验证集中分别为 0.752（95%*CI*：0.634~0.870）、0.800 和 0.628，模型区分度良好。Hosmer-Lemeshow 检验结果显示，模型在训练集（χ^2=6.739，*P*=0.565）、验证集（χ^2=8.196，*P*=0.414）中校准度良好。DCA 结果显示，在训练集、验证集中风险阈值概率分别为 1%～26%、1%～43% 时，模型具有较高的临床净获益。

表 2 T2DM 患者 PAD 影响因素的多因素 logistic 回归分析

Table 2 Multivariable logistic regression analysis of factors affecting PAD among patients with T2DM

变量	参照组	β	$s_{\bar{x}}$	Wald χ^2值	*P*值	*OR*值	95%*CI*
年龄		0.052	0.013	16.087	<0.001	1.053	1.027~1.080
足部异常感觉							
麻木	无	0.565	0.321	3.084	0.079	1.759	0.937~3.303
疼痛		1.508	0.526	8.212	0.004	4.517	1.610~12.667
CPT		0.090	0.035	6.657	0.010	1.094	1.022~1.171
常量		−6.762	0.959	49.758	<0.001	0.001	

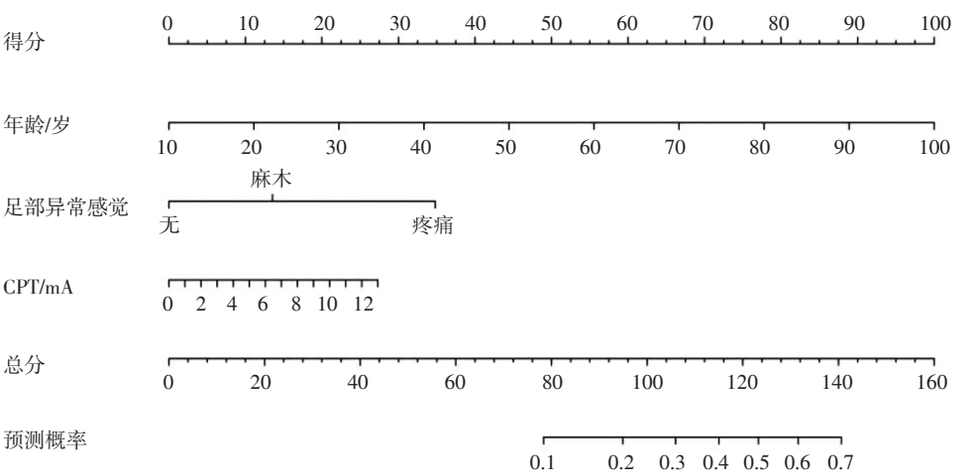


图 1 T2DM 患者 PAD 风险预测列线图

Figure 1 Nomogram for predicting the risk of PAD among patients with T2DM

3 讨 论

本研究共纳入 T2DM 患者 972 例，检出 PAD 84 例，检出率为 8.64%，高于 Pang 等[10]报告的 T2DM 患者 PAD 检出率（7.50%）。PAD 作为糖尿病大血管并发症，是全身动脉粥样硬化负荷的重要标志，与不良心血管事件预后密切相关，需加强 T2DM 患者 PAD 风险评估与早期筛查。本研究采用年龄、足部异常感觉和 CPT 3 个预测因子构建的列线图预测模型在训练集和验证集中均表现出良好的预测性能。模型在训练集、验证集中的 *AUC* 值分别为 0.771、0.752，模型区分度良好；Hosmer-Lemeshow 检验提示模型在训练集、验证集中校准度良好；DCA 结果显示，在训练集、验证集中风险阈值概率分别为 1%～26%、1%～43% 时，模型临床净获益较高。以上结果提示，该列线图预测模型简便、直观且可操作性强，对 T2DM 患者 PAD 风险评估具有一定参考价值。

LASSO 回归和多因素 logistic 回归分析共筛选出 3 个预测因子，分别为年龄、足部异常感觉和 CPT。随着年龄增长，血管壁结构与功能发生退行性改变，内皮完整性受损、一氧化氮生物利用度下降，动脉僵硬度增加，推动脂质沉积与斑块形成；此外，老年人多存在久坐行为，血流速度减慢，可进一步加剧脂质沉积和血管狭窄，最终促进 PAD 的发生与发展[11]。足部异常感觉和 CPT 均为糖尿病周围神经病变相关指标。足部异常感觉主要与糖尿病周围神经病变中的小纤维受累有关，患者可表现为下肢疼痛、烧灼感和其他感觉异常[12]。本研究将足部异常感觉纳入预测

模型，提示主观神经症状对 PAD 风险具有一定的预测价值。CPT 作为定量评估感觉神经功能的检测手段，采用 2 000 、250 和 5 Hz 不同频率电流刺激，评估 Aβ、Aδ 和 C 类感觉神经纤维功能[13]，能客观量化 T2DM 患者感觉神经损伤程度，其优势在于可早期发现以细小神经纤维受损为主的亚临床神经病变。糖尿病周围神经病变与 PAD 常同时存在，并有糖代谢紊乱、微循环障碍和氧化应激等共同病理基础[14]。长期高血糖介导的糖毒性、氧化应激可损伤周围神经纤维与下肢血管内皮，推动神经病变与动脉粥样硬化进展[15]，而 PAD 所致慢性下肢缺血可引起周围神经灌注不足，进一步加重周围神经损伤[16]。此外，T2DM 患者 PAD 常呈隐匿性进展，多数患者缺乏典型间歇性跛行症状[17]，周围神经病变引发的感觉减退可能会降低患者对缺血症状的感知，增加 PAD 漏诊风险。建议临床开展 PAD 筛查时，不仅依靠典型症状，还需结合年龄、足部异常感觉和 CPT 结果进行综合评估。

综上所述，采用年龄、足部异常感觉和 CPT 3 个预测因子构建的列线图预测模型有较好的区分度、校准度和临床净获益，对 T2DM 患者 PAD 风险有一定预测价值。本研究存在一定局限性：一是基于单中心住院 T2DM 患者数据，可能存在样本选择偏倚；二是 PAD 诊断依赖 ABI 单次测量数据，可能因假性升高出现漏诊；三是 PAD 患者有限，可能影响模型稳定性；四是未纳入炎症及影像学指标，预测性能尚有提升空间。未来可通过开展多中心、大样本研究，提高 PAD 诊断准确度，纳入更多 PAD 患者，并结合多维度临床指标进一步优化模型，提升模型的预测准确性与外推适用性。

参考文献

[1] 中华医学会糖尿病学分会 . 中国糖尿病足防治指南（2019 版）[J]. 中华糖尿病杂志，2019，11（3）：161-168.

[2] Amamoo J，Xie L，Steffens A，et al.Impact of peripheral artery disease（PAD）on risk of major adverse cardiovascular events（MACE）in patients with type 2 diabetes [J/OL]. Am J Prev Cardiol，2026，25 [2026-09-12].https://doi.org/10.1016/j.ajpc.2025.101397.

[3] Zhang X M，Ran X W，Xu Z R，et al.Epidemiological characteristics of lower extremity arterial disease in Chinese diabetes patients at high risk：a prospective，multicenter，cross-sectional study [J].J Diabetes Complicat，2018，32（2）：150-156.

[4] Fitridge R，Chuter V，Mills J，et al.The intersocietal IWGDF，ESVS，SVS guidelines on peripheral artery disease in people with diabetes and a foot ulcer [J/OL].Diabetes Metab Res Rev，2024，40（3）[2026-09-12].https://doi.org/10.1002/dmrr.3686.

[5] 苏银霞，卢耀勤，田翔华，等 . 基于常规体检指标的 2 型糖尿病风险预测研究进展 [J]. 预防医学，2022，34（12）：1230-1234.

[6] Yu H C，Zhang J J，Qian F，et al.Large-scale plasma proteomics improves prediction of peripheral artery disease in individuals with type 2 diabetes：a prospective cohort study [J].Diabetes Care，2025，48（3）：381-389.

[7] World Health Organization.Definition，diagnosis and classification of diabetes mellitus and its complications：report of a WHO consultation.part 1：diagnosis and classification of diabetes mellitus [R].Geneva：WHO，1999.

[8] 胡大一，杨进刚 . 下肢动脉疾病诊断和治疗专家共识 [J]. 中国实用内科杂志，2006，26（22）：1678-1683.

[9] Writing Committee Members.2016 AHA/ACC guideline on the management of patients with lower extremity peripheral artery disease：executive summary [J].Vasc Med，2017，22（3）：1-43.

[10] Pang X H，Han J，Ye W L，et al.Lower extremity peripheral arterial disease is an independent predictor of coronary heart disease and stroke risks in patients with type 2 diabetes mellitus in China [J/OL].Int J Endocrinol，2017 [2026-09-12].https://doi.org/10.1155/2017/9620513.

[11] Head T，Daunert S，Goldschmidt-Clermont P J.The aging risk and atherosclerosis：a fresh look at arterial homeostasis [J/OL]. Front Genet，2017，8 [2026-09-12].https://doi.org/10.3389/fgene.2017.00216.

[12] American Diabetes Association Professional Practice Committee.12.retinopathy，neuropathy，and foot care：standards of care in diabetes-2024 [J].Diabetes Care，2024，47（Suppl. 1）：231-243.

[13] Yin H X，Liu M S，Zhu Y C，et al.Reference values and influencing factors analysis for current perception threshold testing based on study of 166 healthy Chinese [J/OL].Front Neurosci，2018，12 [2026-09-12].https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00014.

[14] Chen T，Xiao S J，Chen Z D，et al.Risk factors for peripheral artery disease and diabetic peripheral neuropathy among patients with type 2 diabetes [J/OL].Diabetes Res Clin Pract，2024，207 [2026-09-12].https://doi.org/10.1016/j.diabres.2023.111079.

[15] Yang Y，Zhao B，Wang Y Z，et al.Diabetic neuropathy：cutting-edge research and future directions [J/OL].Sig Transduct Target Ther，2025，10 [2026-09-12].https://doi.org/10.1038/s41392-025-02175-1.

[16] Zhu J X，Hu Z Y，Luo Y F，et al.Diabetic peripheral neuropathy：pathogenetic mechanisms and treatment [J/OL].Front Endocrinol，2023，14 [2026-09-12].https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1265372.

[17] Halawa M R，Abushady M M，Abdelsalam M M，et al.Study of urinary calprotectin levels in type 2 diabetics with peripheral arterial disease [J/OL].QJM，2020，113（Suppl. 1）[2026-09-12].https://doi.org/10.1093/qjmed/hcaa052.041.

收稿日期：2026-05-26 **修回日期**：2026-09-12 **本文编辑**：李奕