· 结核病主动发现与预防性干预专题 论著 ·

基于决策树-马尔可夫模型的南京市老年糖尿病患者肺结核筛查成本效用分析

江燕[1]，王荣[1]，温佳鑫[2]

1.南京市疾病预防控制中心，江苏 南京 210003；2.苏州市姑苏区疾病预防控制中心，江苏 苏州 215000

摘要：目的 采用决策树-马尔可夫（Markov）模型分析不同肺结核筛查方案的成本效用，为南京市老年糖尿病患者肺结核防控策略提供理论依据。**方法** 研究基线数据来源于国家基本公共卫生服务项目管理信息平台，选择年龄≥65岁且无活动性肺结核病史和（或）服用抗结核药物治疗史的糖尿病患者为基线队列，结合症状和X线检查拟定3种不同的肺结核筛查方案，分别为因症就诊的被动筛查方案、症状阳性后X线检查的两步筛查方案和症状筛查后X线检查的联合筛查方案。构建老年糖尿病患者肺结核发生发展的决策树-Markov模型，比较3种筛查方案的增量成本效用比（ICUR），并对模型进行敏感性分析。**结果** 模拟筛查老年糖尿病患者10万例，被动筛查、两步筛查和联合筛查方案分别检出肺结核患者3 116、4 656和5 086例，检出率为3.12%、4.66%和5.09%，差异有统计学意义（P<0.05）；因肺结核死亡分别为513、160和82例，死亡率为16.46%、3.44%和1.61%，差异有统计学意义（P<0.05）。与被动筛查方案相比，两步筛查、联合筛查方案的ICUR分别为37 546.89元/质量调整生命年（QALY）和77 827.52元/QALY，均具有成本效用。与两步筛查方案相比，联合筛查方案的ICUR为197 395.55元/QALY，具有成本效用。敏感性分析显示，结果总体稳健，意愿支付阈值为241 041元/QALY时，联合筛查方案具有成本效用的概率最高，为63.70%。**结论** 理论上对南京市老年糖尿病患者开展症状筛查后X线检查的肺结核联合筛查方案更具成本效用，建议在老年糖尿病患者中推广。

关键词：老年人；糖尿病；肺结核；主动筛查；成本效用分析

中图分类号：R184 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-5087（2026）06-0545-05

Cost-utility analysis of pulmonary tuberculosis screening among elderly patients with diabetes mellitus in Nanjing City based on a decision tree-Markov model

JIANG Yan[1], WANG Rong[1], WEN Jiaxin[2]

1.Nanjing Center for Disease Control and Prevention, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2.Gusu District Center for Disease Control and Prevention, Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract: Objective To evaluate the cost-utility of different pulmonary tuberculosis screening programs using a decision tree-Markov model, so as to provide the theoretical basis for pulmonary tuberculosis prevention and control strategies among elderly patients with diabetes mellitus in Nanjing. **Methods** The baseline data for this study were obtained from the National Basic Public Health Service Project Management Information Platform. The baseline cohort consisted of patients with diabetes mellitus aged ≥65 years with no history of active tuberculosis and/or currently taking anti-tuberculosis medications. Based on symptoms and chest X-ray findings, three different screening protocols for pulmonary tuberculosis were developed: a passive screening protocol for patients presenting with symptoms, a two-step screening protocol involving X-ray examination following positive symptoms, and a combined screening protocol involving X-ray examination following symptom-based screening; Treeage Pro 2022 software was used to construct a decision tree-Markov

DOI：10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2026.06.002

基金项目：南京医科大学科技发展基金项目（NMUB20240281）；南京市疾控中心青年培育项目（NPY2403）

作者简介：江燕，硕士，主管医师，主要从事肺结核预防与控制工作

通信作者：温佳鑫，E-mail：1354465339@qq.com

model simulating the incidence and progression of pulmonary tuberculosis in elderly patients with diabetes mellitus. The incremental cost-utility ratio (ICUR) of the three screening strategies was calculated and compared in terms of yuan per quality-adjusted life year (QALY), and sensitivity analyses were performed on the model. **Results** In a simulated screening of 100 000 elderly patients with diabetes mellitus, the number of pulmonary tuberculosis cases detected by passive screening, two-step screening, and combined screening were 3 116, 4 656, and 5 086, with corresponding detection rates of 3.12%, 4.66%, and 5.09%, respectively. The differences were statistically significant (P<0.05). The number of pulmonary tuberculosis-related deaths were 513, 160, and 82, with corresponding mortality of 16.46%, 3.44%, and 1.61%, respectively, and the differences were also statistically significant (P<0.05). Compared with the passive screening strategy, the ICURs for the two-step screening and combined screening strategies were 37 546.89 yuan/quality-adjusted life-year (QALY) and 77 827.52 yuan/QALY, respectively, both of which demonstrated cost utility. Compared with the two-step screening strategy, the ICUR for the combined screening strategy was 197 395.55 yuan/QALY, demonstrating cost utility. Sensitivity analysis indicated that the results were generally robust; when the willingness-to-pay threshold was set at 241 041 yuan/QALY, the combined screening strategy had the highest probability of being cost-utility effective, at 63.70%. **Conclusions** Theoretically, the combined screening protocol for pulmonary tuberculosis, consisting of symptom screening followed by X-ray examination, is more cost-utility effective among elderly patients with diabetes mellitus in Nanjing City. Therefore, its implementation is recommended for this population.

Keywords: the elderly; diabetes mellitus; pulmonary tuberculosis; active screening; cost-utility analysis

肺结核是由结核分枝杆菌引起的可严重危害人群健康的慢性呼吸道传染病，2024 年我国肺结核发病 69.6 万例，诊断登记报告仅 54.6 万例[1]，存在大量病例未被及时发现。老年人因免疫功能减退且常合并多种慢性病，肺结核发病风险高于一般人群[2]；糖尿病患者因代谢紊乱及体内高糖微环境成为肺结核感染与发病的高危人群[3]，因此老年糖尿病患者是我国肺结核防控的重点人群。当前我国肺结核患者发现方式以被动因症就诊为主[4-5]，主动筛查覆盖不足，易造成诊断延迟甚至增加传播风险。对老年糖尿病患者开展肺结核主动筛查，是提升患者早发现、降低传播风险的重要措施，但不同筛查方案的卫生资源投入、健康产出及综合经济性尚不明确。决策树-马尔可夫（Markov）模型已广泛应用于各种疾病筛查的成本效用评价[6]，可为优选疾病筛查方案提供依据。本研究应用该模型分析南京市老年糖尿病患者肺结核筛查方案的成本效用，为主动筛查方案的应用提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 模型设定

本研究模拟构建 10 万例南京市老年糖尿病患者队列，采用 Treeage pro 2022 软件，构建分析肺结核筛查方案成本效用的决策树-Markov 模型。见图 1。

在模拟队列中，对老年糖尿病患者实施 3 种不同筛查方案。（1）被动筛查：患者因可疑症状（咳嗽、咳痰、咯血或痰中带血和盗汗等）主动就诊；（2）两步筛查：首先对老年糖尿病患者进行肺结核可疑症状筛查，对有可疑症状的患者进行胸部 X 线检查；（3）联合筛查：对所有老年糖尿病患者同时开展可疑症状筛查与胸部 X 线检查。

本研究假设随访时间为 30 年，循环周期为 1 年。每个循环周期内，根据肺结核诊断标准，老年糖尿病患者分别进入 5 个状态，包括健康易感者、得到诊断的肺结核患者、未得到诊断的肺结核患者、肺结核痊愈和死亡。根据各状态之间的转移概率发展为另一个状态，死亡为终止状态。

1.2 资料来源

1.2.1 一般人口学参数

南京市老年糖尿病患者肺结核患病率数据来源于国家基本公共卫生服务项目管理信息平台，选择年龄≥65 岁且无活动性肺结核病史和（或）服用抗结核药物治疗史的老年糖尿病患者为基线队列。共选择 766 例老年糖尿病患者，年龄为（73.50±5.17）岁，发现 2 例肺结核病例，患病率为 261.10/10 万。本研究通过南京市疾病预防控制中心伦理审查委员会审查（PJ2024-A017-01）。

1.2.2 流行病学参数

多中心前瞻性队列研究结果显示，我国糖尿病患者肺结核发病率为 250.60/10 万人年[7]，糖尿病患者肺结核成功治愈率为 88.57%[8]，根据公式 $P=1-e^{-rt}$（P 表示转移概率，r 表示发病率，t 表示观察时间）计算得到发病率的转移概率为 0.30%[9]，肺结核患者自愈概率和复发概率分别为 1.00%、1.40%[10-11]，未治疗和得到治疗的肺结核患者死亡概率分别为 3.90%、1.00%[12]。

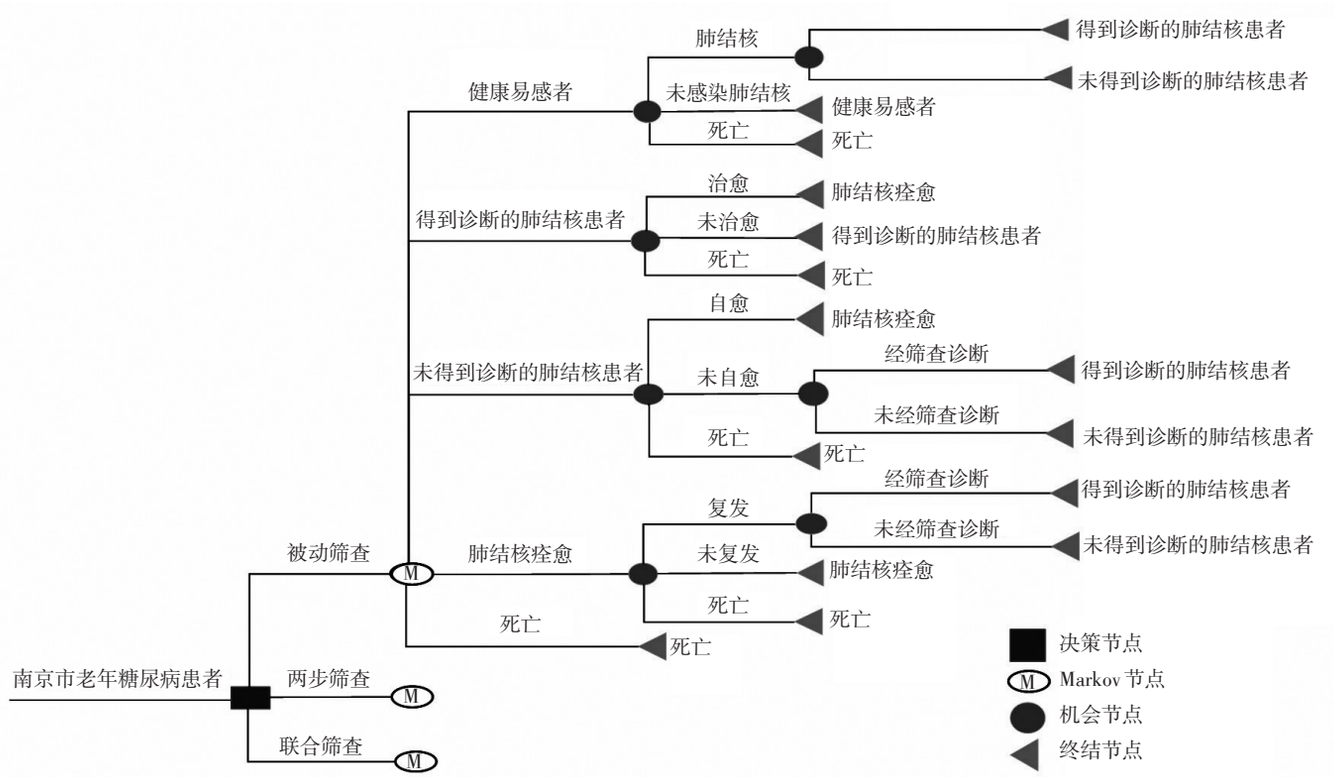


图 1　决策树-Markov 模型结构图

Figure 1　Decision tree-Markov model structure diagram

1.2.3　筛查方法参数

确诊的糖尿病合并肺结核患者中因症就诊的比例为 18.2%[7]。可疑症状筛查灵敏度和特异度分别为 71.0% 和 64.0%[13]；胸部 X 线检查灵敏度和特异度分别为 85.0% 和 96.0%[13]；同时开展可疑症状筛查和胸部 X 线检查灵敏度和特异度分别为 90.7% 和 93.3%[14]。假设老年糖尿病患者筛查依从性为 100%。

1.2.4　成本参数

成本参数包括可疑症状筛查、胸部 X 线检查、肺结核诊断和治疗过程中产生的直接医疗成本、非医疗成本和间接成本。可疑症状筛查成本假设为 5.00 元，胸部 X 线检查成本与肺结核诊断成本来源于一项江苏省糖尿病患者大规模肺结核筛查研究[15]，其中肺结核诊断成本包括痰涂片、痰培养等实验室成本，也包括患者确诊所花费的交通费用，根据该研究将胸部 X 线检查成本和肺结核诊断成本分别假设为 73.79 和 793.27 元。肺结核治疗成本来源于一项我国肺结核患者的经济负担研究[16]，其包括直接医疗成本、非医疗成本及因照顾患者导致家属生产力损失的间接成本，分别为 6 107.00、1 606.18 和 98.59 元。以上成本参数均使用居民消费价格指数调整至 10 年后的价格，贴现率假设为 3%，分析人均成本。

1.2.5　效用参数

采用质量调整生命年（quality adjusted life year，QALY）评估肺结核患者的健康效用。QALY 是健康相关生命质量调整后的生存时间，计算方法为特定状态下的生存时间乘以该健康状态的健康效用值[17]，健康易感者、肺结核患者（包括未得到诊断的和得到诊断的肺结核患者）、肺结核治愈者和死亡病例的健康效用值分别为 0.970[12]、0.667[16]、0.940[16] 和 0。

1.3　成本效用评价

根据决策树-Markov 模型模拟得到的人均增量成本和 QALY 可计算人均增量成本效用比（incremental cost-utility ratio，ICUR），ICUR= ΔCost/ΔQALY，表示某项筛查方案与另一项筛查方案相比每多增加 1 个 QALY 所需额外支付的成本。比较 ICUR 与意愿支付阈值（willingness to pay，WTP）评价筛查方案是否具有成本效用。本研究采用江苏省 1.5 倍人均地区生产总值 241 041 元/QALY 作为 WTP[18]，如果 ICUR<WTP，则认为筛查方案与被比较筛查方案相比具有成本效用。

1.4　敏感性分析

本研究通过概率敏感性分析验证模型结果的稳健性。采用蒙特卡洛模拟量化结果的不确定性，分析不同 WTP 水平下 3 种方案具有成本效用的概率。

2 结　果

2.1 肺结核检出及死亡情况

在模拟假设队列中，采用被动筛查方案、两步筛查方案和联合筛查方案分别模拟筛查 10 万人队列，检出肺结核患者分别为 3 116、4 656 和 5 086 例，检出率为 3.12%、4.66% 和 5.09%，3 种筛查方案的检出率差异有统计学意义（χ^2=523.072，P<0.001）；因肺结核死亡分别为 513、160 和 82 例，死亡率为 16.46%、3.44% 和 1.61%，3 种筛查方案的死亡率差异有统计学意义（χ^2=849.375，P<0.001）。

2.2 成本效用分析

被动筛查、两步筛查和联合筛查方案人均成本分别为 346.47、1 324.70 和 3 057.26 元。与被动筛查方案相比，两步筛查和联合筛查方案的人均增量成本分别为 978.23 和 2 710.79 元，ICUR 分别为 37 546.89 元/QALY 和 77 827.52 元/QALY，均低于 WTP，均具有成本效用；与两步筛查方案相比，联合筛查方案的人均增量成本为 1 732.56 元，ICUR 为 197 395.55 元/QALY，低于 WTP，具有成本效用。

2.3 敏感性分析

在设定的 WTP 下，被动筛查方案、两步筛查方案和联合筛查方案具有成本效用的概率分别为 1.70%、34.60% 和 63.70%，随着 WTP 升高，联合筛查方案具有成本效用的概率越来越高。见图 2。

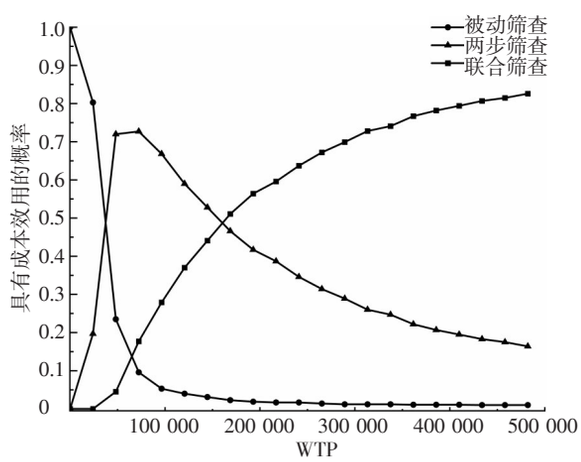


图 2　成本效用可接受曲线

Figure 2　Cost utility acceptability curve

3 讨　论

本研究通过构建决策树-Markov 模型对 10 万例南京市老年糖尿病患者模拟 3 种不同肺结核筛查方案，模型显示对南京市老年糖尿病患者开展肺结核两步筛查和联合筛查均具有成本效用，与其他研究结果[19]相近。2025 年基本公共卫生服务新要求也指出，将在老年人健康体检中免费提供胸部 X 线检查[20]。但由于缺乏南京市本地真实长期模型参数的实测数据，本研究结果为理论推断，仅供参考。

与因症就诊的被动筛查方案相比，主动筛查方案虽需花费更多的成本，但能获得更多的健康产出，均具有潜在经济性。与先症状筛查再胸部 X 线检查的两步筛查方案相比，症状筛查与胸部 X 线检查的联合筛查方案则更具经济性。被动筛查方案的人均成本虽低，但研究表明我国肺结核患者的就诊延迟率达 52.2%[21]，糖尿病患者就诊延迟率高达 65.74%[22]，而就诊延迟可能导致患者后续治疗费用增加、疗程延长和不良结局发生[3, 23]，这些可能是被动筛查方案不具有经济性的原因。针对两步筛查方案，有研究表明 36.4% 的肺结核患者为无症状患者，其中 25.5% 具有潜在传播风险[24]，且无症状肺结核的无症状期可持续 6 个月[25]，而糖尿病患者中的无症状比例可达到 41%[26]，所以仅对有症状的老年糖尿病患者开展胸部 X 线检查，可能会导致漏诊及社区传播风险，这可能也是联合筛查方案更具有潜在经济性的原因。

研究表明，对所有糖尿病患者进行胸部 X 线检查的肺结核筛查方案不具有经济性，应将目标人群设定为高风险糖尿病患者[27]。范明宽等[28]发现，为社区老年人开展症状筛查和胸部 X 线检查等肺结核主动筛查方案均具有潜在经济性。在南京市老年糖尿病患者中，被动筛查方案成本低但健康产出及经济性不足；两步筛查方案健康产出提升，但存在无症状患者漏诊缺陷；联合筛查方案健康产出较优，成本效用较佳，敏感性分析证实结果稳健。建议在社区老年糖尿病患者中推广症状筛查联合胸部 X 线检查的肺结核筛查方案，强化基层筛查人员培训，优化人工智能阅片应用，提升筛查效率，减少漏诊与资源浪费，持续提升肺结核早期防控效能。

本研究存在局限性。一是老年糖尿病患者肺结核病患病率部分参数来源于非糖尿病患者，结果外推需谨慎；二是本研究中假设老年糖尿病患者接受筛查的依从性为 100%，与真实情况有差距；三是对糖尿病患者的肺结核健康状态分类中未考虑利福平等抗结核药物的耐药性及复发性肺结核的问题。

参考文献

[1]　World Health Organization. Global tuberculosis report 2025 [R].

Geneva：WHO，2025.

［2］ 张梦迪，王鑫，郑文静，等．老年结核病危险因素研究进展［J］．中国防痨杂志，2024，46（10）：1266-1272.

［3］ 张买，杨敬源，余琴，等 .2017—2022 年毕节市肺结核合并糖尿病患者流行特征及治疗转归影响因素［J］．中国感染控制杂志，2025，24（3）：402-409.

［4］ SHETTY S，PAPPACHAN J M，FERNANDEZ C J.Diabetes and tuberculosis：an emerging dual threat to healthcare［J］.World J Diabetes，2024，15（7）：1409-1416.

［5］ 吴继周，游楠楠，竺丽梅，等．肺结核合并糖尿病研究进展［J］．中国热带医学，2022，22（8）：712-717.

［6］ 刘秋萍，王佳敏，巩超，等．微观模拟模型在流行病学筛查成本效果分析中的应用［J］．中华流行病学杂志，2022，43（6）：931-937.

［7］ CHENG J，YU Y L，MA Q J，et al.Prevalence，incidence，and characteristics of tuberculosis among known diabetes patients：a prospective cohort study in 10 sites，2013-2015［J］.China CDC Wkly，2022，4（3）：41-46.

［8］ 田飞飞，李玉红，李雪，等 .2019—2023 年中国肺结核与糖尿病共病患者治疗转归影响因素分析［J］．中国防痨杂志，2025，47（12）：1547-1555.

［9］ 周挺，马爱霞，付露阳．药物经济学评价 Markov 模型中转移概率计算的探讨［J］．中国卫生经济，2017，36（12）：40-42.

［10］祖筱雯．肺结核患者密切接触者预防性治疗的成本效果研究［D］．北京：中国疾病预防控制中心，2020.

［11］包亮亮，加依娜·拉兹别克，张燕，等．密切接触者人群队列肺结核发现策略的成本-效用分析［J］．中国卫生经济，2023，42（4）：65-69.

［12］PEI X T，ZHONG T，YANG C G，et al.Cost-effectiveness of community-based active case finding strategy for tuberculosis：evidence from Shenzhen，China［J］.J Infect Dis，2024，229（6）：1866-1877.

［13］ World Health Organization.WHO consolidated guidelines on tuberculosis：module 3：diagnosis：rapid diagnostics for tuberculosis detection，3rd ed［M］.Geneva：WHO，2025.

［14］张慧，成君，于艳玲，等．基于社区的重点人群肺结核主动发现干预效果评价：多中心前瞻性队列研究［J］．中国防痨杂志，2021，43（12）：1248-1259.

［15］LIU Q，YOU N N，WEN J，et al.Yield and efficiency of a population-based mass tuberculosis screening intervention among persons with diabetes in Jiangsu Province，China［J］.Clin Infect Dis，2023，77（1）：103-111.

［16］DIAO S，LIU Z，LIU D，et al.Long-term economic evaluation of the recombinant *Mycobacterium tuberculosis* fusion protein（EC）test for the diagnosis of *Mycobacterium tuberculosis* infection［J/OL］.Front Pharmacol，2023，14［2026-06-01］.http://doi.org/10.3389/fphar.2023.1161526.

［17］WOLOWACZ S E，BRIGGS A，BELOZEROFF V，et al.Estimating health-state utility for economic models in clinical studies：an ISPOR good research practices task force report［J］.Value Health，2016，19（6）：704-719.

［18］CAI D，SHI S，JIANG S，et al.Estimation of the cost-effective threshold of a quality-adjusted life year in China based on the value of statistical life［J］.Eur J Health Econ，2022，23（4）：607-615.

［19］郑建莉，吴语媚，张仕利，等．福建省龙岩市结核病重点高危人群主动筛查成本效果分析［J］．结核与肺部疾病杂志，2025，6（1）：35-39.

［20］中华人民共和国国家卫生健康委员会．关于做好 2025 年基本公共卫生服务工作的通知［EB/OL］．［2026-06-01］.https://www.nhc.gov.cn/jws/c100073/202506/14a23782324542f59137bbf24a1c988f.shtml.

［21］李欣霖，万彬，赵霞，等．中国肺结核患者就诊延迟情况的 Meta 分析［J］．中国防痨杂志，2025，47（11）：1442-1453.

［22］王大福，马晓雪，王芸，等 .2016—2023 年贵州省合并糖尿病的肺结核患者就诊延迟及不良结局危险因素分析［J］．中国防痨杂志，2025，47（2）：201-209.

［23］张嘉怡，吴谦．肺结核合并糖尿病患者流行特征及对治疗结局的影响［J］．临床医学进展，2025，15（10）：200-208.

［24］OH J Y，RODWELL T C，SYED R R，et al.Unrecognized tuberculosis：risk factors for smear-positive/cavitary asymptomatic cases［J/OL］.Open Forum Infect Dis，2025，12（4）［2026-06-01］.http://doi.org/10.1093/ofid/ofaf176.

［25］KU C C，MACPHERSON P，KHUNDI M，et al.Durations of asymptomatic，symptomatic，and care-seeking phases of tuberculosis disease with a Bayesian analysis of prevalence survey and notification data［J/OL］.BMC Med，2021，19（1）［2026-06-01］.http://doi.org/10.1186/s12916-021-02128-9.

［26］TEO A K J，MACLEAN E L，FOX G J.Subclinical tuberculosis：a meta-analysis of prevalence and scoping review of definitions，prevalence and clinical characteristics［J/OL］.Eur Respir Rev，2024，33（172）［2026-06-01］.http://doi. org / 10.1183 / 16000617.0208-2023.

［27］JI Y，CAO H F，LIU Q，et al.Screening for pulmonary tuberculosis in high-risk groups of diabetic patients［J］.Int J Infect Dis，2020，93：84-89.

［28］范明宽，滕人聪，刘玉舒，等．社区老年人肺结核主动筛查策略卫生经济学评价［J］．中国预防医学杂志，2025，26（9）：1037-1044.

收稿日期：2026-02-25　**修回日期**：2026-06-01　**本文编辑**：刘亚敏