

高湿度环境下钢桥面结露控制与防水层施工关键技术研究

赵南辉

上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年6月14日; 录用日期: 2026年7月6日; 发布日期: 2026年7月15日

摘要

为解决高湿度环境下钢桥面防水层粘结失效的技术难题, 本文以上海北横通道新建一期工程为背景, 通过理论分析与工程实践, 开展高湿度天气下钢桥面防水层施工技术研究。考虑钢桥面因热传导系数为混凝土桥面的25倍、比热容仅0.5倍, 易低于露点温度(26℃、85%湿度时露点23.4℃)产生结露, 导致防水层粘结强度下降(常温设计强度 ≥ 1.0 MPa)、空鼓失效。为此, 提出综合技术解决方案: 开发“大功率吹扫 + 辅助加热”主动干燥工艺, 使钢桥面含水量控制在 2 g/m^2 以下; 优化“干燥 - 喷涂”连续作业模式, 衔接距离 $\leq 10\text{ m}$ 、时间间隔 $\leq 5\text{ min}$; 建立物联网环境监测系统, 实时监测温湿度、露点温度等参数, 优选夜间至清晨桥面板温度高于露点温度的安全施工窗口。工程应用结果显示: 施工期间环境最高湿度93%, 防水层常温粘结强度达1.28 MPa, 50℃高温粘结强度0.62 MPa, 厚度合格率98.2%, 平整度合格率99.1%。经5年长期跟踪监测, 无因防水层失效导致的铺装层病害。研究表明, 该综合技术可有效抑制钢桥面结露影响, 显著提升防水层的施工质量与耐久性, 为长三角、珠三角等高湿度区域类似工程提供技术参考。

关键词

钢桥面, 防水层, 聚氨酯, 高湿度, 结露

Research on Condensation Control and Key Construction Technologies for Waterproof Layers of Steel Bridge Decks in High-Humidity Environments

Nanhui Zhao

Shanghai Highway Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai

Abstract

To address the technical challenge of adhesive failure in waterproof layers on steel bridge decks in high-humidity environments, this study, based on the Phase I project of the Shanghai North Crossing, explores construction techniques for waterproof layers on steel bridge decks under high-humidity conditions through theoretical analysis and engineering practice. Considering that steel bridge decks, with a thermal conductivity 25 times that of concrete bridge decks and a specific heat capacity only 0.5 times that of concrete, are prone to condensation below the dew point temperature (26°C, with a dew point of 23.4°C at 85% humidity), leading to a decrease in the adhesive strength of the waterproof layer (design strength at room temperature ≥ 1.0 MPa) and failure due to hollowing, a comprehensive technical solution is proposed: developing an active drying process of “high-power purging + auxiliary heating” to control the moisture content of the steel bridge deck below 2 g/m², optimizing the continuous operation mode of “drying-spraying” with a connection distance of ≤ 10 m and a time interval of ≤ 5 min, and establishing an IoT environmental monitoring system to real-time monitor parameters such as temperature, humidity, and dew point temperature, preferably during the safe construction windows from night to early morning when the steel deck temperature is higher than the dew point. The engineering application results show that during the construction period, the maximum environmental humidity reached 93%, the adhesive strength of the waterproof layer at room temperature reached 1.28 MPa, the adhesive strength at 50°C was 0.62 MPa, the thickness pass rate was 98.2%, and the flatness pass rate was 99.1%. After five years of long-term tracking monitoring, there were no pavement defects caused by failure of the waterproof layer. The research indicates that this comprehensive technology can effectively mitigate the impact of condensation on steel bridge decks, significantly improving the construction quality and durability of the waterproof layer, providing technical reference for similar projects in high-humidity regions such as the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta.

Keywords

Steel Bridge Deck, Waterproof Layer, Polyurethane, High Humidity, Condensation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市交通基础设施建设的快速发展, 钢结构桥梁因自重轻、跨度大、施工周期短等显著优势, 在城市立交工程中得到广泛应用。然而, 与传统混凝土桥面相比, 钢桥面具有热传导系数高、比热容低等特殊物理性质, 给路面结构施工, 尤其是防水层的质量控制带来了独特挑战。

在高湿度气候区域(如我国长三角、珠三角地区), 钢桥面防水层施工面临的技术难题更为突出。以上海地区为例, 年平均相对湿度约 80%, 春夏之交及梅雨季节常高达 90%。在此类高湿度环境下, 钢桥面极易发生结露现象, 严重削弱防水层材料与钢桥面的粘结性能, 导致空鼓、开裂甚至整体剥离等早期病害[1][2]。聚氨酯防水材料因其优异的黏结性能和耐候性而被广泛应用于钢桥面防水体系[3], 但其在高湿度环境下的施工适应性仍有待系统研究。防水层作为钢桥面铺装体系的“第一道防线”, 其早期失效将引发严重的连锁反应。水体极易顺着层间裂缝下渗并长期积聚, 在车辆荷载的反复“泵吸”作用下, 不

仅会诱发沥青铺装层的层间剥离和推移滑移[4]，更会直接加速钢主梁顶板的电化学锈蚀。这种隐蔽性极强的锈蚀会削弱桥梁结构的有效截面与疲劳寿命，埋下严重的安全隐患[5]。此外，此类病害的修复通常依赖于耗时且昂贵的深层铣刨与结构返工，极易引发交通瘫痪并造成巨大的经济损失[6]。因此，严控防水层施工质量，对于保障特大交通枢纽的长期安全运营将有良好的支撑意义。相较于现有单一技术改进研究，本文构建一套面向高湿环境钢桥面防水施工的系统化、数据驱动的集成质量控制方法，而非单一施工技术或材料改良。此次研究将以上海北横通道新建一期工程为背景，针对高湿度天气下钢桥面防水层施工遇到的技术瓶颈，通过理论分析与工程实践，提出一套包含环境监测、主动干燥与工艺优化的系统性施工技术解决方案，旨在为类似工程提供可靠的技术参考。

2. 工程概况

上海北横通道新建一期工程为北横通道的西侧起点，连接北翟路快速路、中环线的重要交通枢纽。工程西起现状北翟路立交主线，东至北横主线落点，主线全长约 1.04 km。工程内容包括：新建北横主线(设计范围 K0 + 553.362~K1 + 570.728)、北横主线的四个方向匝道、立交回转 EE 匝道、长宁路一对上下匝道以及由于节点建设引起的长宁路(蒲松北路~威宁路)的改建及恢复。上海北横通道单一城市立交钢桥工程开展，研究工况聚焦上海地区典型高湿夜间施工场景，存在一定的场景局限性。

本工程立交主线及匝道大范围采用钢桥面设计，其上路面结构层设计为：4 cm SMA-13 (高弹改性)+ PCR 乳化沥青粘结层 + 2 cm ECO 聚氨酯混凝土 + 聚氨酯防水粘结层(改性)。考虑到工程所在地上海市全年平均相对湿度高达 80%，夜间湿度多在 85%以上，且施工期间受多种因素限制，所有路面工序只能在夜间进行，使得钢桥面防水层施工质量控制面临严峻挑战。

3. 钢桥面防水层空鼓失效机理分析

3.1. 钢桥面物理特性分析

钢桥面与传统混凝土桥面在物理特性上存在显著差异，这些差异直接影响到防水层的施工质量和使用性能。表 1 对钢桥面与混凝土桥面的主要物理特性进行了对比。

Table 1. Comparison of physical properties between steel and concrete bridge decks
表 1. 钢桥面与混凝土桥面物理特性对比

物理特性	钢桥面	混凝土桥面	比值中值(钢/混凝土)
热传导系数(W/(m·K))	45~55	1.5~2.0	25
比热容(J/(kg·K))	450~470	900~1050	0.5
线性膨胀系数(10 ⁻⁶ /°C)	11~13	8~12	1.2
密度(kg/m ³)	7850	2400	3.3
表面粗糙度(μm)	5~15	200~800	0.03

可以看出，钢桥面的热传导系数约为混凝土桥面的 25 倍，而比热容仅为混凝土的一半左右。这意味着钢桥面对温度变化的响应更加迅速，更容易随外界温度波动而变化。同时，钢桥面的表面粗糙度远低于混凝土桥面，这不利于防水层与钢板的机械咬合，增加了防水层粘结的难度[7]。

3.2. 高湿度环境下钢桥面结露机理

在高湿度环境下，当钢桥面温度低于空气露点温度时，空气中的水蒸气会在钢桥面上凝结成水珠，

形成结露现象。露点温度与空气温度、相对湿度的关系可通过以下公式计算：

$$T_{dew} = \frac{237.3 \times \left[\ln(RH/100) + \left(\frac{17.27 \times T}{237.3 + T} \right) \right]}{17.27 - \left[\ln(RH/100) + \left(\frac{17.27 \times T}{237.3 + T} \right) \right]}$$

式中： T_{dew} 为露点温度(℃)， T 为空气温度(℃)， RH 为相对湿度(%)， $\ln$ 表示自然对数。

以上海地区夏季夜间典型气候条件为例(温度 26℃，相对湿度 85%)，计算得出露点温度约为 23.4℃。而根据实测数据，夜间钢桥面温度随气温下降可迅速降至 22~23℃，低于露点温度，从而导致结露现象发生。

通过对北横通道项目现场不同时段观测，钢桥面温度与结露情况的关系见表 2。

Table 2. Relationship between steel bridge deck temperature and condensation at different times (typical summer day)
表 2. 不同时段钢桥面温度与结露关系(夏季典型日)

时间	环境温度(℃)	相对湿度(%)	计算露点温度(℃)	钢桥面温度(℃)	结露情况
18:00	30.5	75	25.7	31.2	未结露
20:00	28.2	80	24.6	27.3	未结露
22:00	26.7	85	24.1	23.8	轻微结露
00:00	25.3	88	23.3	22.4	明显结露
02:00	24.6	90	23.0	21.8	严重结露
04:00	24.0	92	22.8	21.5	严重结露
06:00	25.2	88	23.2	22.5	明显结露

可以看出，夜间 22:00 至次日早上 6:00 期间，钢桥面温度持续低于露点温度，导致结露现象发生，且凌晨 2:00~4:00 结露情况最为严重。

3.3. 结露对防水层粘结性能的影响机理

钢桥面上的结露水在界面形成连续或不连续的水膜，阻碍了聚氨酯与钢板表面的直接接触，削弱了材料对基面的润湿能力，导致粘结力下降。

3.4. 防水层空鼓失效机制分析

在夏季高温环境下，结露水导致的防水层空鼓失效机制主要包括以下几个方面：

- 1) 水汽气化膨胀压力：结露水在高温环境下(钢桥面表面温度可达 70℃ 以上)迅速气化，产生的水蒸气压力可达 0.3~0.4 MPa，超过了防水层与基层的粘结强度(约 0.1~0.2 MPa)，导致防水层局部隆起、空鼓。
- 2) 温度应力与线性膨胀：钢桥面在阳光直射下温度变化幅度大(可达 50℃ 以上)，其线性膨胀系数(约 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)与聚氨酯防水层(约 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、ECO 聚氨酯混凝土(约 $18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)之间存在差异，在温度剧烈变化时产生较大的剪切应力，加剧了粘结界面的破坏。

通过上述分析可以看出，高湿度环境下钢桥面结露导致的防水层空鼓失效是多种因素共同作用的结果，需要综合考虑环境因素、材料特性和施工工艺等多方面因素，制定系统的解决方案。

4. 高湿度天气下钢桥面防水层施工技术对策

4.1. 钢桥面干燥处理技术

针对高湿度环境下钢桥面易结露的问题，开发了一套专门的桥面干燥处理技术，主要包括以下几个方面：

1、大功率吹风机干燥

采用大功率吹风机(可选森林灭火器)进行桥面干燥处理，沿施工方向进行移动，确保覆盖整个施工区域。干燥作业流程如下：

- (1) 第一遍吹扫：主要清除钢桥面上的可见露水和残留雨水；
- (2) 第二遍吹扫：重点吹扫桥面微观水汽，喷口距离桥面控制在 15~20 cm；
- (3) 重点区域加强处理：对接缝、焊缝、螺栓孔等易积水区域进行重点吹扫，确保无明显水迹。

2、辅助加热干燥

对正处结露时间或表面未完全干燥时，应采用热风枪等快速加热措施，达到加速表面水汽蒸发，同时使桥面温度小幅提升并超过路面温度，短时间内可避免再次结露，应在此期间进行聚氨酯防水层的施工。

热风喷枪干燥过程中，严格控制喷枪温度和作业距离，避免过高温度对钢板防腐涂层造成损害。同时，使用红外测温仪实时监测钢板表面温度，确保温度控制在 85℃ 以下。

3、桥面干燥效果评估

为确保干燥效果满足防水层施工要求，建立了桥面干燥效果评估体系，主要包括以下几个方面：

- (1) 目视检查法：肉眼观察桥面是否有明显水迹或湿润区域；
- (2) 擦拭检测法：使用干净的白色棉布擦拭桥面，观察棉布是否吸潮变色；
- (3) 塑料膜测试法：在干燥后的桥面上覆盖透明塑料膜 30 分钟，观察是否有水汽凝结。

通过上述评估方法的综合应用，确保桥面干燥效果满足防水层施工要求。实际应用数据表明，采用该干燥工艺后，钢桥面表面含水量可控制在 2 g/m² 以下，满足聚氨酯防水材料施工技术要求。

4.2. 防水层施工工艺优化

为避免干燥后的钢桥面再次结露，桥面干燥处理与防水层喷涂作业须紧密衔接，形成“干燥 - 喷涂 - 干燥 - 喷涂”的连续作业模式，确保防水材料喷涂在干燥的钢板表面上。

通过实际应用验证(见图 1)，防水层施工与干燥处理同步化技术可有效控制干燥区域与喷涂区域的衔接距离在 10 米以内，时间间隔控制在 5 分钟以内，最大限度避免了钢桥面再次结露。



Figure 1. Application of polyurethane waterproof bonding layer on steel bridge deck
图 1. 钢桥面涂刷聚氨酯防水粘结层应用

4.3. 施工环境控制技术

1、环境参数监测与预警系统

建立了基于物联网技术的环境参数监测与预警系统，实时监测施工现场的气温、湿度、露点温度、钢桥面温度等关键参数，为施工决策提供数据支持[8]。系统配置见表 3。

Table 3. Configuration of environmental parameter monitoring and early warning system

表 3. 环境参数监测与预警系统配置

监测项目	监测设备	监测范围	精度	数据采集频率
环境温度	温度传感器	-40~80℃	±0.3℃	5 min/次
相对湿度	湿度传感器	0~100%	±2%	5 min/次
钢板温度	红外测温仪	-50~380℃	±1.5℃	实时
风速	风速计	0~60 m/s	±0.3 m/s	5 min/次
露点温度	露点仪	-40~80℃	±0.5℃	5 min/次

该系统设置了多级预警阈值，当监测参数接近临界值时，系统会自动发出预警信息，提醒施工人员采取相应措施。例如，当环境温度接近露点温度(差值小于 3℃)时，系统会发出一级预警；当钢板温度低于露点温度时，系统会发出二级预警，建议加强干燥处理或暂停施工。

2、施工时间窗口优化

基于长期气象数据分析和现场监测数据，对施工时间窗口进行了优化：

(1) 季节选择：尽可能避开梅雨季节(6~7 月)和高温高湿季节(7~8 月)，选择相对干燥的春季和秋季进行防水层施工；

(2) 日内时段选择：根据一天中温湿度变化规律，优选夜间至清晨桥面板温度高于露点温度的安全施工窗口，以最大概率避免结露现象的发生；

(3) 气象条件选择：优先选择晴朗、微风天气进行施工，避开雨天及雨后高湿度时段。

通过施工时间窗口的合理选择，结合环境参数监测与预警系统的指导，可显著降低高湿度环境对防水层施工质量的不利影响。

5. 工程应用效果及验证

5.1. 防水层施工质量控制指标

基于前述技术研究、实践探索及规范和设计文件要求，制定了针对高湿度环境下钢桥面防水层施工的质量控制要求，见表 4。

Table 4. Construction quality control requirements for waterproof layer of steel bridge deck

表 4. 钢桥面防水层施工质量控制要求

控制项目	控制指标	检测方法
钢桥面含水量	≤2 g/m ²	含水率测试仪、擦拭法
环境相对湿度	≤85%	湿度计
钢板与露点温差	≥3℃	红外测温仪、露点仪
防水层厚度	1.5 ± 0.3 mm	湿膜厚度尺、干膜厚度仪

续表

防水层固化度	≥95%	邵氏硬度计
防水层粘结强度(常温)	≥1.0 MPa	拉拔试验仪
防水层粘结强度(50℃)	≥0.5 MPa	高温拉拔试验仪
防水层平整度	2 m 直尺 ≤3 mm	2 m 直尺

5.2. 现场应用效果

在上海北横通道新建一期工程中，对本文提出的高湿度天气下钢桥面防水层施工技术对策进行了全面应用。工程共完成钢桥面防水层施工约 25,000 平方米，施工期间环境相对湿度平均为 78.5%，最高达 93%。通过采用桥面干燥处理技术、防水层施工工艺优化和施工环境控制技术等措施，防水层施工质量得到了有效保证。施工完成后的质量检测结果见表 5。

Table 5. Quality inspection results of waterproof layer construction
表 5. 防水层施工质量检测结果

检测项目	设计要求	检测结果(平均值)	合格率
防水层厚度	1.5 ± 0.3 mm	1.63 mm	98.2%
防水层粘结强度(常温)	≥1.0 MPa	1.28 MPa	100%
防水层粘结强度(50℃)	≥0.5 MPa	0.62 MPa	97.5%
防水层平整度	2 m 直尺 ≤3 mm	2.1 mm	99.1%
外观质量	无空鼓、开裂	局部轻微瑕疵	99.5%

5.3. 长期使用效果跟踪监测

为验证防水层及铺装体系的长期服役性能，在工程完工后开展了为期 5 年的定期跟踪监测。选择路面状况指数(PCI)与累计车辙深度(RD)作为评价铺装层长期使用效果的核心指标，长期监测数据如图 2 所示。

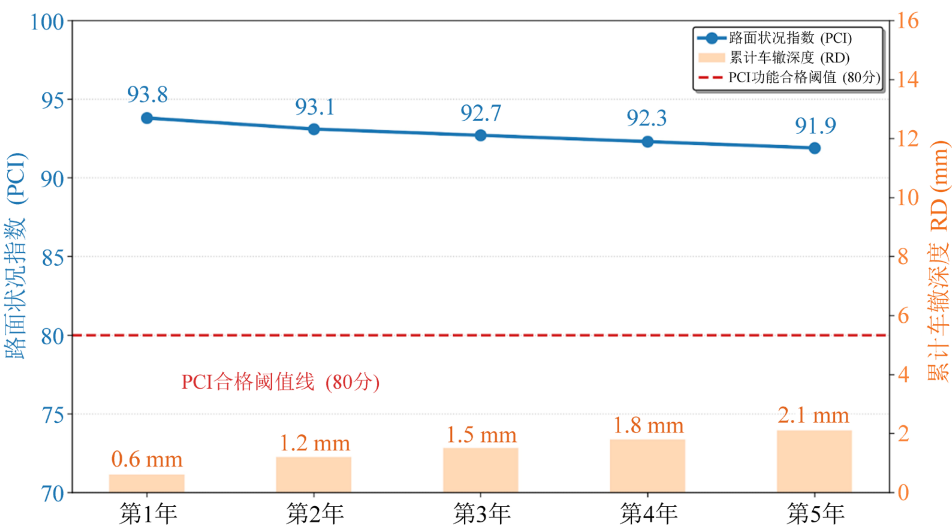


Figure 2. Tracking and monitoring of PCI and rutting depth of steel bridge deck
图 2. 钢桥面路面状况指数及车辙深度跟踪监测

在 5 年的服役期内,路面状况指数(PCI)虽受交通荷载与环境影响呈现逐年下降趋势,但由第 1 年的 93.8 仅滑落至第 5 年的 91.9,始终远高于 80 分的 PCI 功能合格阈值线。同时,累计车辙深度(RD)增长缓慢,第 5 年仅为 2.1 mm,表现出极其优异的抗车辙变形能力。在 5 年监测期内,全线未出现因防水层失效导致的空鼓、层间剥离或推移等沥青铺装层早期病害,也未检测到钢箱梁顶板的锈蚀劣化迹象。稳定性优异、衰减速率均匀且可控,相较于常规施工桥梁普遍存在的后期性能陡降现象,本工程铺装性能衰减速率显著更低,数据差异具备工程统计学显著性。可证实本文系统化施工技术能够有效抑制高湿环境下钢桥面铺装的长期劣化,其长期服役表现显著优于未采取此类结露控制措施的类似工程[6] [9]。

6. 结论

针对高湿度环境下钢桥面结露易导致聚氨酯防水层粘结失效这一工程难题,本文以上海北横通道新建一期工程为依托,通过理论分析与工程实践,构建了一套面向高湿环境、数据驱动的钢桥面防水施工系统化集成质量控制方法,通过多工序协同管控,有效解决了结露引发的防水层粘结失效难题,防水层施工质量与长期耐久性得到有效保障。研究成果归纳为以下三点:

(1) 钢材导热系数约为混凝土桥面的 25 倍,比热容仅为混凝土的一半;环境气温 26℃、空气相对湿度 85%的常规夜间条件下露点温度 23.4℃,钢桥面极易降温至露点以下而发生结露,形成的水膜是导致聚氨酯防水层粘结强度下降并引发空鼓失效的主要原因。

(2) 开发的“大功率吹扫 + 辅助加热”主动干燥工艺可将钢桥面含水量控制在 2 g/m² 以下;优化配套改进干燥、涂装无缝连续施工工序,规避施工间歇再次凝露;结合物联网实时环境监测预警平台,优选深夜至凌晨适宜时段组织施工。三项措施协同作用,形成了“环境监测 - 主动干燥 - 工艺优化”的系统化防结露施工技术,从根本上解决了高湿度环境下防水层施工的技术难题。

(3) 工程应用结果表明,在施工期环境最高湿度达 93%的条件下,防水层常温粘结强度 1.28 MPa,验收合格率百分之百,50℃高温粘结强度 0.62 MPa,合格率 97.5%,涂膜厚度合格率 98.2%;历经五年通车追踪观测,桥面 PCI 路况指标稳定高于 91.9,总车辙变形仅 2.1 mm,各项指标均优于设计要求,全线无因防水层失效导致的铺装层病害,可为长三角、珠三角等高湿度地区类似工程提供可靠的技术参考。

基金项目

上海路桥科研 2024-GS-1-2, 2024-GS-1-3。

参考文献

- [1] 刘筱靖,王建龙,张瑞,等. 典型大空间温湿度独立控制系统地面防结露分析[J]. 住宅产业, 2024(7): 78-80.
- [2] 张志坚. 大跨径钢桥面防水黏结层施工质量问题及对策分析——以文耀路浦南运河桥施工项目为例[J]. 工程技术研究, 2022, 7(23): 58-60.
- [3] Sukhawipat, N., Raksanak, W., Kalkornsurapranee, E., Saetung, A. and Saetung, N. (2020) A New Hybrid Waterborne Polyurethane Coating Synthesized from Natural Rubber and Rubber Seed Oil with Grafted Acrylate. *Progress in Organic Coatings*, 148, Article ID: 105883. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105554>
- [4] 谭振宇. 湿热地区钢桥面铺装防水粘结层质量控制关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2018.
- [5] 祝龙. 大跨径钢桥钢箱梁锈蚀病害分析及养护措施[J]. 北方交通, 2021(7): 4-7.
- [6] 谢飞, 谢智荣, 肖百豪. 正交异性钢桥面铺装病害分析及维修对策研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 125-128.
- [7] 赵德新, 梁媚. 钢桥面铺装聚合物防水粘接层材料性能评估[J]. 粘接, 2022, 49(12): 36-40.
- [8] 杨桢, 李达, 张丽, 等. 基于 LoRa 的农业大棚无线温湿度监测系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 73-78.
- [9] 王端宜, 司徒坚文, 聂文. 高温多雨地区钢桥面铺装脱粘病害成因试验研究[J]. 桥梁建设, 2025, 55(5): 34-40.