

2023—2024年鄱阳湖地区都昌县活禽市场低致病性禽流感病毒监测和分析

束思成^{1,2,3}，姚富晓^{1,2,3}，曹志勇⁴，孙剑锋⁴，曹起⁵，
佟琪^{1,2,3}，孙洪磊^{1,2,3}，蒲娟^{1,2,3}

(1. 中国农业大学动物医学院，北京 海淀 100193；2. 兽医公共卫生安全全国重点实验室，北京 海淀 100193；
3. 农业农村部禽流感等家禽重大疾病防控重点实验室，北京 海淀 100193；4. 都昌县水产畜牧产业发展中心，
江西 九江 332600；5. 都昌县阳峰乡人民政府，江西 九江 332600)

摘要:为了调查江西省鄱阳湖地区活禽市场低致病性禽流感病毒(LPAIV)的流行现状并评估LPAIV的公共卫生风险,本研究于2023年6月—2024年5月对鄱阳湖地区的都昌县活禽市场进行持续监测,采集811份样本(鸡源、鸭源和环境源),采用鸡胚分离病毒,通过病原核酸检测分析LPAIV的流行情况、不同月份LPAIV亚型的流行特点、LPAIV分离株的样本来源分布和不同样本来源LPAIV亚型的分布,并确定不同亚型LPAIV分离株的受体结合特性。结果显示,LPAIV总体检出率为53.4%(433/811),其中H9亚型占比最高(27.5%,223/811),其次为H6亚型(9.4%,76/811)和H3亚型(1.6%,13/811),此外普遍存在不同亚型LPAIV的混合感染,并且H6和H9亚型LPAIV每月均有检出。从LPAIV分离株的样本来源分析,环境源样本的LPAIV检出率最高(68.9%),其次为鸡源(60.2%)和鸭源(41.7%);从LPAIV亚型多样性分析,鸡源分离株以H9亚型为主,鸭源和环境源分离株亚型多样性较丰富(以H3和H6亚型为主,且含多亚型混合感染)。受体结合特性分析结果显示,H9亚型LPAIV分离株结合 α -2,6唾液酸受体的能力较强,而H3和H6亚型LPAIV分离株主要表现为结合 α -2,3唾液酸受体。本研究表明,鄱阳湖地区都昌县活禽市场中H3、H6和H9亚型LPAIV持续流行且存在混合感染,其中H9亚型LPAIV具有潜在的跨物种传播风险,建议加强活禽市场的病毒监测和环境清洗消毒。本研究不仅为鄱阳湖地区禽流感防控策略的制定提供了参考依据,也丰富了我国活禽市场禽流感病毒的流行数据。

关键词:低致病性禽流感病毒(LPAIV)；活禽市场；鄱阳湖；流行病学；受体结合特性

中图分类号:S858.3

文献标志码:A

文章编号:0529-6005(2025)11-0009-08

Surveillance and Analysis of Low Pathogenic Avian Influenza Viruses in Live Poultry Markets of Duchang County, Poyang Lake Region, 2023—2024

SHU Sicheng^{1,2,3}，YAO Fuxiao^{1,2,3}，CAO Zhiyong⁴，SUN Jianfeng⁴，CAO Qi⁵，
TONG Qi^{1,2,3}，SUN Honglei^{1,2,3}，PU Juan^{1,2,3}

(1. College of Veterinary Medicine, China Agricultural University, Beijing 100193, China；2. National Key Laboratory of Veterinary Public Health and Safety, Beijing 100193, China；3. Key Laboratory for Prevention and Control of Avian Influenza and Other Major Poultry Diseases, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China；4. Duchang County Aquaculture and Animal Husbandry Industry Development Center, Jiujiang 332600, China；
5. Duchang County Yangfeng Township Government, Jiujiang 332600, China)

Abstract: To investigate the prevalence of low pathogenic avian influenza virus (LPAIV) in live poultry markets (LPMs) in the Poyang Lake region of Jiangxi Province and to assess its public health risk, this study conducted continuous surveillance in the LPMs of Duchang County from June 2023 to May 2024. A total of 811 samples were collected from chickens, ducks, and environmental sources. Virus isolation was performed in chicken embryos, and pathogen detection was carried out to analyze the prevalence of

收稿日期:2025-03-24

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0802400)

作者简介:束思成(1995-),男,博士生,研究方向为畜禽疫病防治,E-mail: sicheng_shu@163.com

通信作者:蒲娟,E-mail:pujuan@cau.edu.cn

LPAIV, the distribution of subtypes across different months, the source-specific distribution of LPAIV isolates, and the receptor-binding characteristics of different subtypes. The overall detection rate of LPAIV was 53.4% (433/811), with the H9 subtype being the most prevalent (27.5%, 223/811), followed by H6 (9.4%, 76/811) and H3 (1.6%, 13/811). Mixed infections involving multiple LPAIV subtypes were commonly observed, and H6 and H9 subtype LPAIV were detected every month. Environmental samples had the highest LPAIV detection rate (68.9%), followed by chicken-derived samples (60.2%) and duck-derived samples (41.7%). H9 was the dominant subtype in chickens, whereas duck and environmental samples showed greater subtype diversity, mainly H3 and H6, along with mixed infections. Receptor-binding analysis revealed that H9 isolates showed stronger affinity for α -2,6 sialic acid receptors, indicating potential for cross-species transmission, while H3 and H6 isolates preferentially bound to α -2,3 sialic acid receptors. This study demonstrates that H3, H6, and H9 subtypes of LPAIV are persistently circulating in Duchang County's live poultry markets, with frequent mixed infections. The H9 subtype, in particular, poses a potential risk for interspecies transmission. Strengthened surveillance and environmental sanitation in LPMs are recommended. The findings provide valuable reference data for avian influenza prevention strategies in the Poyang Lake region and enrich the national epidemiological database on avian influenza in live poultry markets.

Key words: low pathogenic avian influenza virus (LPAIV) ; live poultry market ; Poyang Lake ; epidemiology ; receptor-binding characteristic

Corresponding author: PU Juan, E-mail: pujuan@cau.edu.cn

禽流感病毒(Avian influenza virus, AIV)是威胁人类和动物健康的重要病原。根据血凝素(Hemagglutinin, HA)和神经氨酸酶(Neuraminidase, NA)蛋白的抗原性,可将甲型流感病毒(Influenza A virus, IAV)分为不同的亚型。目前,在禽类中已检测到16种HA亚型和9种NA亚型。基于对鸡的致病性, AIV分为高致病性禽流感病毒(Highly pathogenic avian influenza virus, HPAIV)和低致病性禽流感病毒(Low pathogenic avian influenza virus, LPAIV)。仅有H5和H7亚型AIV能够演化成为HPAIV^[1]。LPAIV有丰富的亚型类别,主要在野鸟和家禽中流行^[2]。目前,我国常见的LPAIV亚型主要包括H3、H6、H9亚型等^[3]。不同亚型AIV在家禽中的持续流行产生了多种新型基因重配病毒,例如在鸡群中产生的2021年H3N8亚型和2023年H3N3亚型LPAIV,均造成产蛋鸡急性产蛋下降和呼吸道症状^[4-5]。此外,H9N2亚型LPAIV在我国鸡群中广泛流行,对养殖业造成了巨大的经济损失^[6-7]。

传统的家禽散养和活禽售卖方式,为AIV传播提供了有利条件,并使疾病控制措施复杂化^[1]。对此,我国实施了包括家禽集中屠宰和推广冷冻家禽产品零售等一系列措施,以降低AIV的传播风险^[8]。鄱阳湖是我国最大的淡水湖,也是我国内陆最大的候鸟越冬地,环鄱阳湖地区有较多的散养家禽,使其成为禽流感流行的热点地区^[9-10]。江西省九江市都昌县位于鄱阳湖的东北部,并且紧邻湖区,是开展AIV流行病学监测和评估AIV跨物种传播风险的重点区域。

本研究于2023年6月—2024年5月对鄱阳湖

周边的都昌县活禽市场开展LPAIV月度监测,并分析不同亚型LPAIV分离株的受体结合特性,以了解活禽市场中LPAIV的流行动态和公共卫生风险,为鄱阳湖地区的禽流感防控提供必要的科学基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集 2023年6月—2024年5月,每月在江西省九江市都昌县的4个活禽市场开展1次AIV监测。每个活禽市场随机选择2~3个活禽售卖摊位,采集活禽(鸡和鸭)的口咽拭子样本和摊位环境(屠宰台面、饲养笼架和地面等)的拭子样本。监测期间,共计采集811份活禽市场来源的相关样本,包括689份活禽口咽拭子样本和122份环境拭子样本,所有样本均置于含1 mL无菌磷酸盐缓冲液(Phosphate buffered saline, PBS)(含抗生素)的离心管中,低温运送至中国农业大学农业农村部禽流感等家禽重大疾病防控重点实验室进行病毒分离和鉴定。

1.2 主要试剂 用于病毒分离的鸡胚,购自北京市妙川亚申养殖中心;RNA/DNA提取试剂盒,购自智捷生物技术有限公司;一步法实时荧光定量聚合酶链式反应(Quantitative polymerase chain reaction, qPCR)试剂,购自珠海宝锐生物科技有限公司;2×Rapid *Taq* Master PCR酶,购自诺唯赞生物科技股份有限公司;反转录相关试剂M-MLV酶、三磷酸脱氧核苷(Deoxynucleoside triphosphate, dNTP)、核糖核酸酶抑制剂(RNase inhibitor, RRI)和无酶无菌水(RNase-free ddH₂O),均购自宝日医生物技术(北京)

有限公司;DNA Marker,购自北京全式金生物技术股份有限公司;α-2,3唾液酸受体和α-2,6唾液酸受体,均购自新西兰GlycoNZ公司;不同亚型流感病毒鸡源多克隆抗体,由本实验室自制;辣根过氧化物酶(Horseradish peroxidase, HRP)标记山羊抗鸡IgG抗体,购自北京博奥森生物技术有限公司;四甲基联苯胺(Tetramethylbenzidine, TMB)双组分显色液,购自北京索莱宝科技有限公司。

1.3 主要仪器 鸡胚恒温孵化器,购自北京京仪科技孵化器有限公司;生物安全柜和超低温冰箱,均购自赛默飞世尔科技(中国)有限公司;微量移液器、常温离心机和PCR扩增仪,均购自艾本德(上海)国际贸易有限公司;多功能酶标仪,购自安捷伦科技(中国)有限公司;凝胶成像系统,购自上海天能生命科学有限公司。

1.4 病毒分离和鉴定 为了分析LPAIV的流行情况,将口咽和环境拭子样本进行15 s涡旋振荡的预处理,以保证病毒粒子充分从一次性采样棉拭子中释放。使用1 mL一次性无菌注射器取200 μL上清液分别接种于9~11日龄的鸡胚中,置于35 °C孵化器中孵育48 h,每间隔12 h对所有鸡胚进行照检,如胚体死亡或活力较弱时,需立即将其转移至4 °C冰箱暂存。参照《GB/T 18936—2020 高致病性禽流感诊断技术》^[11],使用移液器吸取25 μL鸡胚尿囊液进行血凝试验,将血凝阳性的鸡胚尿囊液转移至15 mL离心管中,3 000 r/min离心10 min,吸取澄清的尿囊液至新的15 mL离心管中,经涡旋混匀后分装至病毒冻存管中,-80 °C长期保存备用。对于没有血凝活性的尿囊液,吸取0.5 mL再次接种鸡胚,盲传1代后重复上述流程。

提取血凝阳性样本尿囊液RNA,并使用Taqman探针qPCR检测方法(*M*基因探针引物:5'-TGCAGTCCTCGCTCACTGGGCACG-3',*M*基因上游引物:5'-GACCRATCCTGTCACCTCTGAC-3',*M*基因下游引物:5'-GGGCATTYTGGACAAAKCGTCTACG-3')进行一步法qPCR扩增,反应体系:5×Neoscript Fast RT Premix Buffer(dUTP) 4 μL,25×Neoscript Fast RTase/UNG Mix 0.8 μL,*M*基因上、下游引物各0.8 μL,*M*基因探针引物0.4 μL,TE Buffer 8.2 μL, RNA 5 μL,以确认分离病原是否为AIV。

1.5 LPAIV分离株亚型鉴定 为了分析不同月份LPAIV亚型的流行特点,LPAIV分离株的样本来源分布和不同样本来源LPAIV亚型的分布,对LPAIV分离株进行了病毒亚型鉴定和统计分析。将AIV阳性样本尿囊液的RNA反转录为cDNA,反应体系:RNA 50 μL,5×MLV Buffer 8 μL,dNTPs(10 mmol/L) 4 μL,Uni12(20 μmol/L) 2 μL,RRI(40 U/μL) 0.5 μL,反转录酶M-MLV(5 U/μL) 0.5 μL。以cDNA为模板,使用H3、H4、H6、H9和H10亚型AIV的HA基因特异性引物(表1)进行PCR扩增,反应体系:2×Rapid Taq Master Mix 15 μL,RNase-free ddH₂O 11 μL,HA基因的上、下游引物各1 μL,cDNA 2 μL;反应程序:95 °C 5 min;95 °C 15 s,55 °C 15 s,72 °C 20 s,共35个循环;72 °C 5 min,10 °C保存。引物均由北京擎科生物科技股份有限公司合成。PCR产物经1%琼脂糖凝胶电泳检测,将阳性PCR产物送至北京六合华大基因科技有限公司进行Sanger测序分析,获取相应的HA基因序列片段,并进行NCBI BLAST基因同源性比对,最终确定LPAIV分离株的HA亚型,未确定HA亚型的LPAIV分离株归为其他亚型。使用NA

表1 不同亚型AIV HA基因引物信息

Table 1 Primer information for HA genes of different AIV subtypes

引物名称 Primer name	引物序列(5'→3') Primer sequence	产物长度(bp) Product length
H3-F	GGGATACTTCATTAATCATGAAGA	976
H3-R	GGRCATGCYCCRTATGTGAT	
H4-F	GCGCTGAGTGGGACATTTC	801
H4-R	GGCCTTGCCATCCATTCTCT	
H6-F	AAAGCAGGGAAAATGATTGCA	976
H6-R	CATTCTCCTATCCACAGAGGGC	
H9-F	TGTAAAACGACGCCAGTAGCAAAGCAGGGAAAT	975
H9-R	CAGGAAACAGCTATGACCCCTGRCCARCCCTCCYTCTAT	
H10-F	GCYTAYTGYTACCCCTGGWGC	1 033
H10-R	TGCTGRTTYTCCATTGCYAC	

基因通用引物^[12]扩增并测序确定用于受体结合特性分析的6株LPAIV分离株的NA亚型。

1.6 受体结合特性试验 为了进一步评价活禽市场LPAIV分离株发生跨物种传播的公共卫生风险,分别从H3、H6、H9亚型LPAIV分离株中各挑选2株代表毒株,并以H5N1亚型AIV和H1N1亚型IAV作为对照(本实验室保存),参照Sun等^[13]的方法测定不同亚型流感病毒分离株的受体结合特性,使用PBS分别倍比稀释 α -2,3唾液酸受体和 α -2,6唾液酸受体(浓度为10、5、2.5、1.25、0.625、0.3125、0.15625、0.078125 μ g/mL)于96孔板中,4℃孵育12 h;洗板后加入血凝效价为2⁶的待测AIV,4℃孵育12 h;洗板后加入不同亚型流感病毒鸡源多克隆抗体,4℃孵育5 h;洗板后加入HRP标记山羊抗鸡IgG抗体,4℃孵育2 h;洗板后加入TMB双组分显色

液,室温孵育10 min,使用0.5 mol/L硫酸终止反应,在450 nm波长处读取吸光值(Absorbance, A)。

2 结果

2.1 LPAIV分离情况 在活禽市场采集的811份样本中,经病毒分离和鉴定确认AIV阳性样本433份,总体分离率为53.4%。如图1所示,2023年6月—2024年5月所采集样本LPAIV分离率每月均达到40.0%以上,其中2024年5月最高(71.4%),其次是2024年2月(66.7%)。LPAIV分离株的HA亚型分布如表2所示,其中H9亚型(223株)分离株数量最多,其次是H6亚型(76株)和H3亚型(13株),不同亚型组合的混合分离株共80株。结果表明,本研究所调查的活禽市场中持续流行多种亚型的LPAIV,且存在混合感染情况。

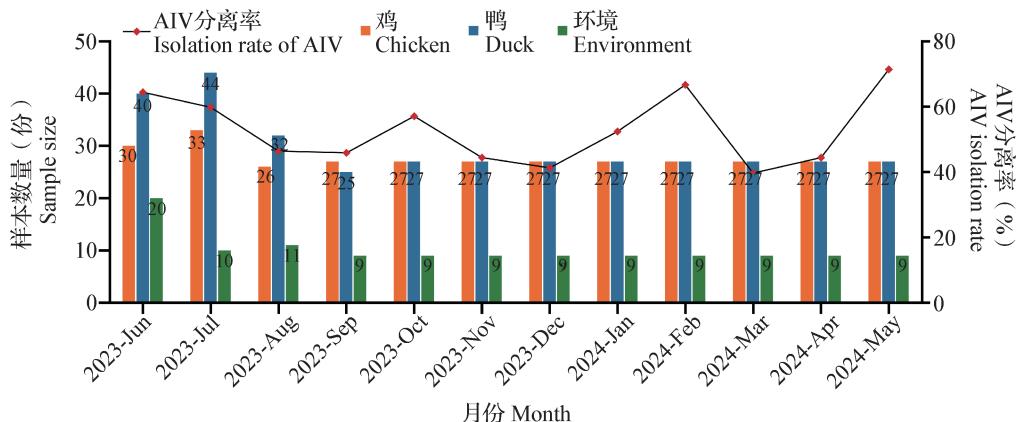


图1 2023年6月—2024年5月活禽市场每月的样本分布和AIV分离率

Fig. 1 Monthly sample distribution and AIV isolation rate in live poultry markets (June 2023–May 2024)

表2 2023年6月—2024年5月活禽市场LPAIV分离株的HA亚型分布

Table 2 HA subtype distribution of LPAIV isolates from live poultry markets (June 2023–May 2024)

LPAIV亚型 LPAIV subtype	LPAIV分离株数量(株) Number of LPAIV isolates	LPAIV分离率(%) LPAIV isolation rate
H3	13	1.6
H6	76	9.4
H9	223	27.5
H3+H6	31	3.8
H3+H9	23	2.8
H6+H9	13	1.6
H3+H6+H9	13	1.6
其他亚型 Other subtype	41	5.1
总计 Total	433	53.4

2.2 不同月份活禽市场LPAIV亚型流行特点 如图2所示,2023年6月—2024年5月,在活禽市场中持续流行的LPAIV以H6和H9亚型为主,H3亚型主要在混合分离株中持续存在,LPAIV分离株的亚型流行动态受月份或季节的影响较小,表明活禽市场有利于LPAIV的稳定生存。

2.3 活禽市场LPAIV分离株的样本来源分布 2023年6月—2024年5月不同样本来源LPAIV的分离情况如表3所示,环境源样本的LPAIV分离率最高(68.9%),各月份的LPAIV分离率介于44.4%~90.0%,其中2023年6月和7月的分离率最高;鸡源样本的LPAIV分离率为60.2%,各月份的LPAIV分离率介于37.0%~85.2%,其中2024年2月的分离率最高;鸭源样本的LPAIV分离率为41.7%,各月份的LPAIV分离率介于18.5%~70.4%,其中2024年5月的分离率最高。结果表明,本研究所调查的活禽市场中家禽的带毒率普遍较

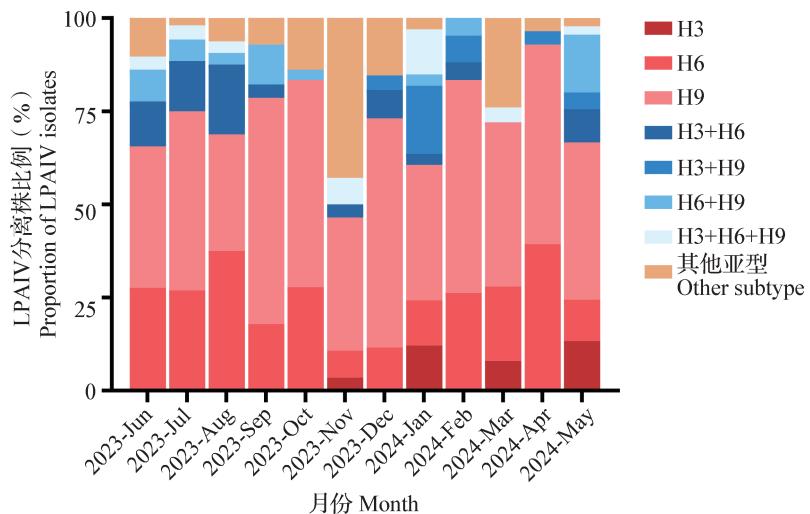


图2 2023年6月—2024年5月每月活禽市场LPAIV分离株的亚型分布

Fig. 2 Monthly subtype distribution of LPAIV isolates from live poultry markets(June 2023—May 2024)

表3 2023年6月—2024年5月每月活禽市场不同样本来源LPAIV的分离率

Table 3 Monthly LPAIV isolation rates by sample source in live poultry markets(June 2023—May 2024)

月份 Month	鸡 Chicken			鸭 Duck			环境 Environment					
	样本数量 (份) Sample size	LPAIV 分离株数量 (株)		LPAIV 分离率(%) isolation rate	样本数量 (份) Sample size	LPAIV 分离株数量 (株)		LPAIV 分离率(%) isolation rate	样本数量 (份) Sample size	LPAIV 分离株数量 (株)		LPAIV 分离率(%) isolation rate
		LPAIV isolates	LPAIV isolation rate			LPAIV isolates	LPAIV isolation rate			LPAIV isolates	LPAIV isolation rate	
2023-Jun	30	22	73.3	40	18	45.0	20	18	90.0			
2023-Jul	33	23	69.7	44	20	45.5	10	9	90.0			
2023-Aug	26	13	50.0	32	11	34.4	11	8	72.7			
2023-Sep	27	16	59.3	25	8	32.0	9	4	44.4			
2023-Oct	27	19	70.4	27	13	48.1	9	4	44.4			
2023-Nov	27	13	48.1	27	9	33.3	9	6	66.7			
2023-Dec	27	16	59.3	27	6	22.2	9	4	44.4			
2024-Jan	27	10	37.0	27	16	59.3	9	7	77.8			
2024-Feb	27	23	85.2	27	14	51.9	9	5	55.6			
2024-Mar	27	13	48.1	27	5	18.5	9	7	77.8			
2024-Apr	27	14	51.9	27	10	37.0	9	4	44.4			
2024-May	27	18	66.7	27	19	70.4	9	8	88.9			
合计 Total	332	200	60.2	357	149	41.7	122	84	68.9			

高，并且向市场的外环境持续排毒。

2.4 活禽市场不同样本来源LPAIV亚型分布 如图3所示,鸡源LPAIV分离株中H9亚型占比最高,为88.0%,H6亚型为1.0%,H3亚型为0.5%;鸭源LPAIV分离株中H6亚型占比最高,为51.0%,H9亚型为14.1%,H3亚型为5.4%;环境源LPAIV分离株中H6亚型占比最高,为23.8%,H3亚型和H9亚型均为4.8%。混合分离株在环境源分离株中占比最

高(48.8%),其次为鸭源(22.8%)和鸡源(2.5%),且鸭源和环境源混合分离株的亚型种类(4种)较鸡源(3种)更丰富。结果表明,鸭宿主的LPAIV分离株亚型多样性相较于鸡宿主更高。此外,活禽市场环境样本中LPAIV混合分离株较多,进一步强调了环境污染对病毒传播和扩散的危害。

2.5 不同亚型LPAIV分离株的受体结合特性 不同亚型LPAIV分离株的受体结合特性如图4所示,

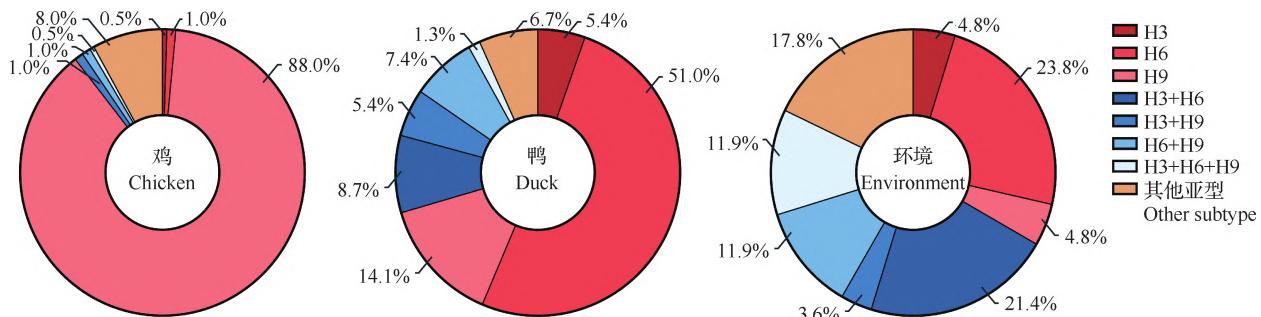


图3 活禽市场不同样本来源 LPAIV 分离株的亚型分布

Fig. 3 Subtype distribution of LPAIV isolates from different sample sources in live poultry markets

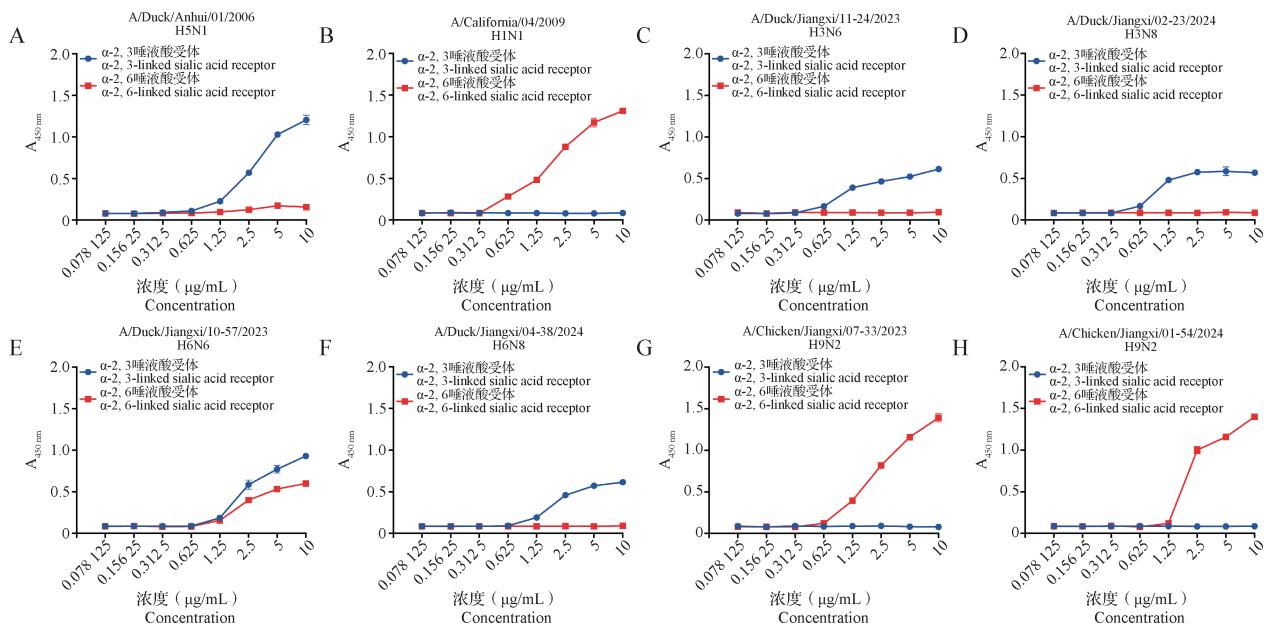


图4 不同亚型 LPAIV 分离株的受体结合特性

Fig. 4 Receptor-binding characteristics of different LPAIV subtypes

A: H5N1 (AI); B: H1N1 (IA); C: H3N6 (LPAI); D: H3N8 (LPAI); E: H6N6 (LPAI); F: H6N8 (LPAI); G, H: H9N2 (LPAI)

H5N1 亚型 AIV 只结合 α -2,3 唾液酸受体, H1N1 亚型 IAV 只结合 α -2,6 唾液酸受体, 即对照组病毒具有单受体结合的特性; 本研究所分离的 H3N6、H3N8 和 H6N8 亚型 LPAIV 仅具有结合 α -2,3 唾液酸受体的能力, H6N6 亚型 LPAIV 表现为结合 α -2,3 唾液酸受体能力强于 α -2,6 唾液酸受体的双受体结合特性, 2 株 H9N2 亚型 LPAIV 均只结合 α -2,6 唾液酸单受体。结果表明, 与 H3 和 H6 亚型 LPAIV 相比, H9N2 亚型 LPAIV 具有较高的跨物种传播风险。

3 讨论

与活禽直接或间接接触是人感染禽流感的重要途径, 大多数禽流感感染患者均有活禽接触史^[14]。对活禽市场进行 AIV 的主动监测是掌握病毒流行特点、防控人间感染的重要方法。鄱阳湖是东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线的关键越冬栖息地, 每年约 80 万迁徙候鸟在此越冬, 同时鄱阳湖地区散

养家禽数量较多, 这种特殊的禽鸟交互环境为新型病毒的产生提供了重要条件。因此, 对该地区活禽市场开展 AIV 流行病学监测具有重要意义。本研究于 2023 年 6 月—2024 年 5 月, 对鄱阳湖地区的都昌县活禽市场开展了连续 12 个月的 LPAIV 主动监测及其流行病学分析, 并探究了不同亚型 LPAIV 分离株的受体结合特性, 以了解 LPAIV 在鄱阳湖地区都昌县活禽市场中的流行情况和跨物种传播风险。

已有监测数据显示, 环鄱阳湖地区的 3 个地市中, 南昌市的 AIV 检出率为 59.2%^[15], 上饶市为 60.5%^[16], 九江市为 30.95%^[17], 均呈现较高的 AIV 检出率。而在我国其他省份的 AIV 监测中, AIV 检出率相对较低, 云南省为 26.3%^[18], 湖北省为 29.5%^[19]。本研究调查的九江市都昌县活禽市场的 LPAIV 检出率为 53.4%, 表明该地区活禽市场 AIV 污染严重。江西省各地市的 AIV 检出率相对较高可能与鄱阳湖这一重要的候鸟越冬地有关, 建议同步

加强该地区候鸟越冬季期间的野鸟 AIV 监测。相关研究表明,冬末和早春期间是家禽和野鸟禽流感疫情发生的关键时期,欧洲大多数禽流感疫情发生于野鸟的秋季迁徙和越冬期间^[20-21]。

我国 AIV 流行病学调查主要是针对 H5、H7 和 H9 亚型 AIV 的监测^[1,22]。本研究重点关注了活禽市场中的 LPAIV,并分析了它们在不同样本来源中的分布情况,结果显示,鸡宿主中 LPAIV 亚型分布较为单一,以 H9 亚型为主,而鸭宿主中 LPAIV 亚型多样性更高,以 H6 亚型为主。相关研究报道了活禽市场环境样本 AIV 混合毒株的检出情况,以 H5、H7 和 H9 亚型 AIV 混合为主^[3,23-25],本研究从活禽市场样本中也分离到了多种 LPAIV 亚型组合的混合分离株,其中环境样本中混合分离株占比最高,其次为鸭和鸡,且鸭宿主 LPAIV 混合分离株的亚型种类和数量相较鸡宿主更多,这可能与 H3 和 H6 亚型 LPAIV 主要在水禽宿主中流行有关^[26-27]。先前研究报道,AIV 基因组分节段的特点使其更容易发生基因重配,多种亚型 AIV 在家禽宿主中的混合感染增加了产生新型重配病毒的风险^[28]。

AIV 主要识别 α -2,3 唾液酸受体,而 IAV 主要识别 α -2,6 唾液酸受体,AIV 结合 α -2,6 唾液酸受体的能力是评估病毒跨物种传播潜力的一个重要指标。近年来,我国 H9N2 亚型 LPAIV 更加偏好于结合 α -2,6 唾液酸受体^[29]。本研究对不同亚型 LPAIV 分离株的受体结合特性的分析结果显示,H9N2 亚型 LPAIV 具有仅结合 α -2,6 唾液酸受体的特性,其跨物种传播的风险较高,此外,H6N6 亚型 LPAIV 具有 α -2,3 唾液酸受体结合能力强于 α -2,6 唾液酸受体的双受体结合特性,与先前研究报道的约 34% 的 H6 亚型 AIV 能够结合 α -2,6 唾液酸受体的发现一致^[30]。不同于 2022 年人兽共患 H3N8 亚型流感病毒的双受体结合特性^[13],本研究中鸭源 H3 亚型 LPAIV 只结合 α -2,3 唾液酸受体。

2018 年以来,我国农业农村部要求所有省份实施“1110”活禽市场管理制度(一日一清洗、一周一消毒、一月一休市、过夜零存栏),严格执行该制度能够有效降低活禽市场外环境的 AIV 污染程度^[31-33]。本研究中活禽市场环境源样本的 LPAIV 检出率处于较高水平,可能会进一步促进 LPAIV 污染面的扩大和病毒的传播。因此,建议加强对活禽市场环境的日常清洗消毒,以降低环境污染造成的扩大传播效应,从而减少 AIV 的扩散和跨种传播感染人类的风险。

本研究通过对鄱阳湖地区都昌县活禽市场为

期 12 个月的 LPAIV 主动监测,发现 H9、H6 和 H3 亚型 LPAIV 在活禽市场中优势流行,活禽市场环境 LPAIV 污染水平较高,鸭宿主中 LPAIV 亚型多样性较鸡宿主更丰富,H9N2 亚型 LPAIV 具有跨物种传播的潜在风险。本研究为环鄱阳湖地区禽流感防控提供了科学依据,也为认识我国活禽市场禽流感流行状况提供了参考资料。

参考文献:

- [1] Shi J, Zeng X, Cui P, et al. Alarming situation of emerging H5 and H7 avian influenza and effective control strategies [J]. Emerging Microbes & Infections, 2023, 12(1): 2155072.
- [2] Hicks J T, Edwards K, Qiu X, et al. Host diversity and behavior determine patterns of interspecies transmission and geographic diffusion of avian influenza A subtypes among North American wild reservoir species [J]. PLoS Pathogens, 2022, 18 (4) : e1009973.
- [3] Bi Y, Li J, Li S, et al. Dominant subtype switch in avian influenza viruses during 2016—2019 in China [J]. Nature Communications, 2020, 11: 5909.
- [4] 孙洪磊,佟琪,李涵,等. 新型 H3N8 亚型禽流感病毒分离鉴定与鸡致病性研究[J]. 中国农业大学学报,2022,27(8):131-139.
- [5] 孙洪磊,佟琪,余海莉,等. 新型 H3N3 亚型禽流感病毒对鸡致病性与传播性研究[J]. 中国农业大学学报,2023,28(7):99-107.
- [6] Zhou Y, Li Y, Chen H, et al. Origin, spread, and interspecies transmission of a dominant genotype of BJ/94 lineage H9N2 avian influenza viruses with increased threat [J]. Virus Evolution, 2024, 10(1): veae106.
- [7] 李玉冬,周迎春,段倩倩,等. 2024 年安徽省 H9N2 亚型禽流感病毒遗传进化和抗原性分析[J]. 中国兽医杂志,2025,61(7): 1-11.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 关于多措并举促进禽肉水产品扩大生产保障供给的通知[Z]. 发改办农经[2020]222 号. 北京:农业农村部,2020-03-26.
- [9] Wang X, Xiao X, Zhang C, et al. Effects of the 2022 extreme droughts on avian influenza transmission risk in Poyang Lake[J]. The Innovation Life, 2023, 1(3): 100044.
- [10] Prosser D J, Teitelbaum C S, Yin S, et al. Climate change impacts on bird migration and highly pathogenic avian influenza [J]. Nature Microbiology, 2023, 8(12): 2223-2225.
- [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 高致病性禽流感诊断技术:GB/T 18936—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [12] Hoffmann E, Stech J, Guan Y, et al. Universal primer set for the full-length amplification of all influenza A viruses [J]. Archives of Virology, 2001, 146(12): 2275-2289.
- [13] Sun H, Li H, Tong Q, et al. Airborne transmission of human-isolated avian H3N8 influenza virus between ferrets [J]. Cell, 2023, 186(19): 4074-4084.e11.
- [14] Su S, Bi Y, Wong G, et al. Epidemiology, evolution, and recent outbreaks of avian influenza virus in China [J]. Journal of

- Virology, 2015, 89(17): 8671–8676.
- [15] Song W, Deng Z, He F, et al. Active surveillance of avian influenza in the southwestern Poyang Lake area, China: analyzing changes in wholesale and frozen fresh retail markets post-policy implementation[J]. Poultry Science, 2025, 104(1): 104486.
- [16] Fang K, Song W, Zhang Y, et al. Comparative analysis and prediction of avian influenza in Shangrao city, China from 2016 to 2022[J]. Virology, 2024, 592: 109995.
- [17] 熊火梅, 张红波, 梁剑锋, 等. 2011—2015年九江市职业暴露人群血清学和环境禽流感病原学监测结果分析[J]. 实验与检验医学, 2016, 34(6): 715–717.
- [18] 康显虎, 赵晓南, 周洁楠, 等. 2016—2017年云南省禽类相关外环境禽流感病毒监测结果分析[J]. 疾病监测, 2018, 33(10): 825–828.
- [19] 付小强, 黄威, 李文伟, 等. 2014—2021年湖北省鄂州市职业暴露人群血清学和外环境禽流感病毒监测分析[J]. 医学动物防制, 2023, 39(4): 329–333.
- [20] Hill N J, Smith L M, Muzaaffar S B, et al. Crossroads of highly pathogenic H5N1: overlap between wild and domestic birds in the Black Sea-Mediterranean impacts global transmission [J]. Virus Evolution, 2021, 7(1): veaa093.
- [21] Verhagen J H, Fouchier R A M, Lewis N. Highly pathogenic avian influenza viruses at the wild-domestic bird interface in Europe: future directions for research and surveillance [J]. Viruses, 2021, 13(2): 212.
- [22] Liu S, Zhuang Q, Wang S, et al. Control of avian influenza in China: strategies and lessons[J]. Transboundary and Emerging Diseases, 2020, 67(4): 1463–1471.
- [23] 尹家奇, 陈小玲, 廖芸馨, 等. 2020—2022年重庆市巴南区活禽市场外环境禽流感病毒监测分析[J]. 食品安全导刊, 2024, (11): 133–136.
- [24] 郭永祥, 邓国强, 张朝阳, 等. 2022年湘南地区活禽市场禽流感病毒检测与分析[J]. 中国动物检疫, 2024, 41(5): 6–9.
- [25] 鲍超, 魏叶, 苗峻峰, 等. 2019—2023年南通市外环境禽流感病毒监测分析[J]. 华南预防医学, 2025, 51(2): 238–242.
- [26] Yang J, Yang L, Zhu W, et al. Epidemiological and genetic characteristics of the H3 subtype avian influenza viruses in China [J]. China CDC Weekly, 2021, 3(44): 929–936.
- [27] Xu X, Chen Q, Tan M, et al. Epidemiology, evolution, and biological characteristics of H6 avian influenza viruses in China [J]. Emerging Microbes & Infections, 2023, 12(1): 2151380.
- [28] Taylor K Y, Agu I, José I, et al. Influenza A virus reassortment is strain dependent [J]. PLoS Pathogens, 2023, 19 (3) : e1011155.
- [29] Guo J, Wang Y, Zhao C, et al. Molecular characterization, receptor binding property, and replication in chickens and mice of H9N2 avian influenza viruses isolated from chickens, peafowls, and wild birds in Eastern China[J]. Emerging Microbes & Infections, 2021, 10(1): 2098–2112.
- [30] Wang G, Deng G, Shi J, et al. H6 influenza viruses pose a potential threat to human health[J]. Journal of Virology, 2014, 88(8): 3953–3964.
- [31] 中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《全国家禽H7N9流感防治指导意见(2018—2020年)》的通知[Z]. 农发[2018]10号. 北京: 农业农村部, 2018-02-24.
- [32] 郑秀钰, 何永辉, 李庆文, 等. 实施“1110”制度降低外环境禽流感病毒污染水平分析[J]. 中国公共卫生管理, 2019, 35(3): 349–352.
- [33] Guo J, Song W, Ni X, et al. The impact of the closure of the live poultry market due to COVID-19 on the avian influenza virus in Nanchang, Jiangxi Province, China[J]. The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 2021, 106 (1) : 127–131.

(责任编辑 冯 茹)