

基于前瞻性时空扫描的北京市石景山区流感时空聚集性动态特征与预警研究

施宏波 赵 晓 任丽君 白 云

(北京市石景山区疾病预防控制中心 北京 100043)

〔摘要〕 **目的/意义** 分析北京市石景山区流感病例时空分布规律，为制定区域性流感监测预警及防控策略提供科学依据。**方法/过程** 收集北京市石景山区 2023 年第 14 周至 2025 年第 13 周流感病例每日报告数据和人口学信息，采用前瞻性时空扫描，并进行可视化展示，同时评价方法预测效果。**结果/结论** 该方法可实时捕捉疫情扩散轨迹，弥补传统静态病例地图和发病率图的不足，为流感监测预警和公共卫生决策提供依据。

〔关键词〕 流行性感；监测预警；前瞻性时空扫描

〔中图分类号〕 R-058 〔文献标识码〕 A 〔DOI〕 10.3969/j.issn.1673-6036.2025.10.010

Spatiotemporal Dynamic Characteristics and Early Warning of Influenza Clusters in Shijingshan District of Beijing Based on Prospective Space-Time Scan Statistics

SHI Hongbo, ZHAO Xiao, REN Lijun, BAI Yun

Beijing Shijingshan Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100043, China

〔Abstract〕 **Purpose/Significance** To analyze the spatiotemporal distribution patterns of influenza cases in Shijingshan District of Beijing, and to provide a scientific basis for the development of regional influenza surveillance, early warning, prevention and control strategies. **Method/Process** The daily influenza case reports and demographic information from Shijingshan District of Beijing from week 14 of 2023 to week 13 of 2025 are collected. A prospective space-time scan statistics analysis is performed for cluster identification and visualization, and the method's predictive performance is evaluated. **Result/Conclusion** It can capture the trajectory of epidemic spread in real time, make up for the deficiencies of traditional static case maps and incidence rate maps, and provide a basis for influenza monitoring and early warning as well as public health decision-making.

〔Keywords〕 influenza; monitoring and early warning; prospective space-time scan statistics

1 引言

流行性感（简称流感）是由流感病毒引起的急性呼吸道传染病，传播快、突发性强，老年人和婴幼儿等高危人群感染后易并发重症。流感病毒具有抗原漂移和转换特性，易引发大范围甚至全球流行^[1]。开展流感病例监测，分析过去和当前的聚集

〔修回日期〕 2025-09-25

〔作者简介〕 施宏波，主管医师；通信作者：白云。

〔基金项目〕 北京市重大疫情防治重点专科项目（京卫医〔2021〕135号）。

情况,掌握时空变化趋势,尽早预测或发现新的聚集性疫情,对流感防控意义重大^[2]。既往研究多应用时间或空间扫描分析流感的某方面特征,虽能在一定程度上反映其在特定时间或地区的变化,但分析维度单一,难以全面呈现流感时空综合特征^[3-4]。前瞻性时空扫描(prospective space-time scan statistic, PSTSS)能识别时间和空间维度可能存在的高风险聚集,且可量化分析聚集程度和统计学意义,已广泛应用于病毒性肝炎、猩红热、其他感染性腹泻等疾病的监测和早期预警^[5]。目前国内尚缺乏将 PSTSS 应用于流感监测的研究,也未发现针对该方法预测效果的评估^[6]。本研究采用 PSTSS 对北京市石景山区流感疫情进行监测,评估方法预测能力,旨在早期识别流感的时空聚集特征,为政策制定和医疗资源合理配置提供依据。

2 研究对象与方法

2.1 研究对象

通过中国疾病预防控制中心信息系统中传染病报告模块,采集北京市石景山区 2023 年第 14 周至 2025 年第 13 周(两个流感流行季)流感病例每日报告数据;由石景山区公安系统下属各街道户籍科提供 2023—2025 年度各街道人口数据;由石景山区疾病预防控制中心、北京市规划和自然资源委员会及北京市民政局提供区域矢量地图及街道经纬度坐标,审图号为京 S(2024)032 号。

2.2 研究方法

采用 SaTScan v10.2.5 对 2023 年第 14 周至 2024 年第 13 周、2024 年第 14 周至 2025 年第 13 周(两个流感流行季)分别开展前瞻性时空扫描,并借助 GeoScene V4.1 地理信息系统进行可视化展示。使用 Excel 2019 录入并清理数据,应用 R 4.4.3 软件统计分析数据。使用例(%)描述流感病例的分布情况, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

前瞻性扫描分析关注在分析结束时仍存在超额风险的区域,忽略曾聚集但在当前时点已无显著风险的区域^[7]。该方法应用“圆柱体”扫描窗口,对研究

区域内潜在时空聚集进行系统性检测。圆柱体底部代表空间范围,高度对应时间维度,扫描从各街道的几何中心出发,逐步扩展半径与时间跨度,直至达到设定上限,每个圆柱体代表一个可能的时空聚集区域^[8]。在每个街道中心点构建不同大小的扫描窗口,分别计算窗口内实际病例数与期望病例数,从而识别是否存在显著聚集现象^[9],见图 1。参考既往研究,设定空间扫描上限为研究区域总人口的 30%;时间扫描上限为整个研究期的 50%,步长为每日^[4,9]。

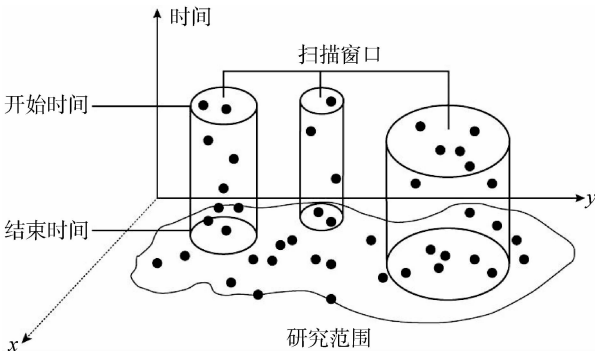


图 1 时空扫描模型

前瞻性时空扫描基于离散型泊松分布算法,假设各街道的发病数与当地人口规模成正比。模型的零假设(H_0)为:各区域发病风险一致,且与人口规模成线性关系。备择假设(H_1)认为:某些区域的病例数显著高于期望值,存在更高的发病风险。模型中流感的期望发病数为: μ (风险强度) $\times p$ (街道人口) $\times C/P$ (其中 C 为研究区总病例数, P 为总人口)^[10]。

采用对数最大似然比(log likelihood ratio, LLR)作为识别高风险聚集区的统计量。其中, L_Z 为聚集区 Z 的似然函数; L_0 为零假设下的总似然; N_Z 和 μ_Z 分别表示该聚集区的实际病例数与期望病例数; N 和 μ_T 分别表示全区的实际与期望病例总数。当某扫描窗口中的 $LLR > 0$,且差异具有统计学意义(通过 999 次蒙特卡罗模拟, $P < 0.05$)时,即视为存在显著空间聚集^[11]。

$$\frac{L_Z}{L_0} = \frac{\mu_Z^{N_Z} (N - \mu_Z)^{(N - N_Z)}}{\mu_T^N} \quad (1)$$

进一步计算相对危险度(relative risk, RR),量化聚集区域的流感传播风险。其中, c 为聚集区内观察病例数, e 为期望病例数, C 为全区总病例

数^[12]。RR 值反映聚集区内人群的发病风险相对于其他区域的倍数，例如 $RR = 2.3$ 表示该区域人群感染风险是其他区域的 2.3 倍。还可采用同样方式计算聚集区域内每街道的 RR 值，识别聚集区域内重点风险街道。

$$RR = \frac{c/e}{(C-c)/(C-e)} \quad (2)$$

3 结果

3.1 流感流行概况

2023 年第 14 周至 2025 年第 13 周北京市石景山区共报告流感病例 27 295 例，其中确诊病例 22 452 例 (82.26%)，临床诊断病例 4 843 例 (17.74%)，流感发病率为 2 288.16/10 万。

3.2 2024 年第 14 周至 2025 年第 13 周石景山区流感时空聚集变化

前瞻性时空扫描显示，2024 年流感季最初 244 天未检测到显著聚集。北京市石景山区首个流感聚集区于 2024 年 11 月 30 日 (2024 年第 48 周) 出现在石景山区东部，涵盖老山街道、八宝山街道；1 周后聚集区域向北移动，聚集区 RR 值逐渐增加。自 2024 年 12 月 9 日起，石景山区中部出现该流感季最大半径 ($r = 3.44$ 千米) 的聚集区，包括金顶街街道、广宁街道、五里坨街道。随后约 2 个月内，聚集范围主要位于石景山区东部和中部，聚集区 RR 值保持稳定。自 2025 年 2 月 15 日起，聚集范围变小，位于石景山东部区域，聚集区 RR 值逐渐减小；2025 年 3 月 2 日 (2025 年第 9 周) 后未检测到显著聚集，见图 2。

3.3 2024 年第 14 周至 2025 年第 13 周石景山区流感聚集特征

聚集区域内总人口数先上升、波动、再次上升后趋于稳定 (约 31 万人)，2025 年 2 月 5 日开始下降，见图 3 (a)。聚集区域内观察病例数自 2024 年 11 月 30 日 (2024 年第 48 周) 起呈上升趋势，2025 年 1 月 27 日达峰值 (4 242 例) 后下降，2025 年 3 月 3 日 (2025 年第 9 周) 清零，见

图 3 (b)。与观察病例数相似，预期病例数也呈先升后降趋势，见图 3 (c)。2024 年 11 月 30 日发生区域性聚集流感，2024 年 12 月 8 日聚集区域增至 2 个，维持约 2 个月后下降，2025 年 3 月 3 日清零，见图 3 (d)。聚集区域内街道数量变化与聚集人口数相似，初始增至 6 个街道，2025 年 2 月 5 日后呈下降趋势，见图 3 (e)。聚集区域半径均数先升后降，峰值为 2.49 千米，半径标准差变化趋势相同，见图 3 (f)。平均预警时间随流感疫情进展增加，研究期末平均持续 61 天，预警时间标准差疫情初期较大、后期较小，见图 3 (g)。LLR 先升后降，2025 年 1 月 7 日达峰值 (623.09)，提示聚集强度最大，LLR 标准差峰值出现在 2024 年 12 月 30 日，提示聚集强度差异最大，见图 3 (h)。聚集区域平均相对危险度在流感疫情初期 (2024 年 12 月 7 日) 峰值达 8.68，随后波动下降，见图 3 (i)。

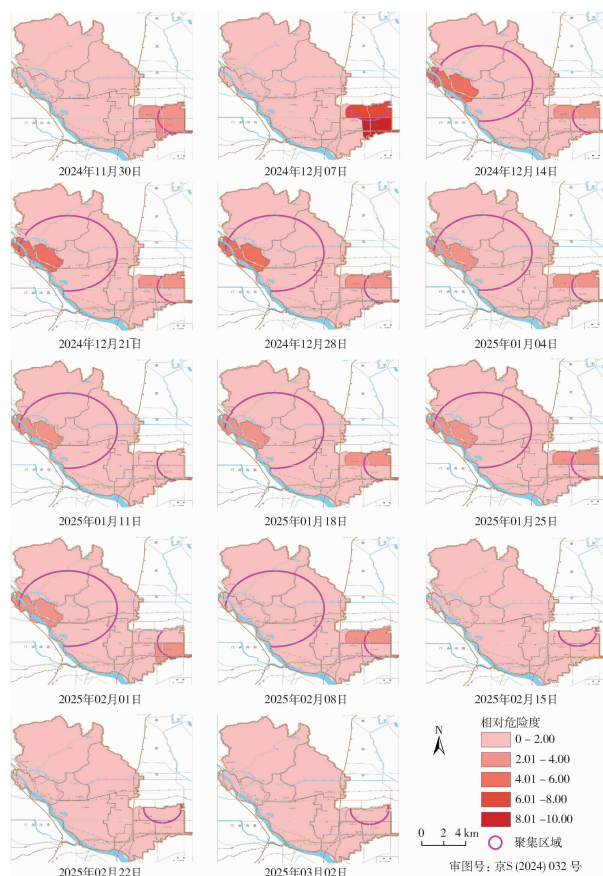


图2 2024 年第 48 周至 2025 年第 9 周石景山区流感病例周聚集和风险变化

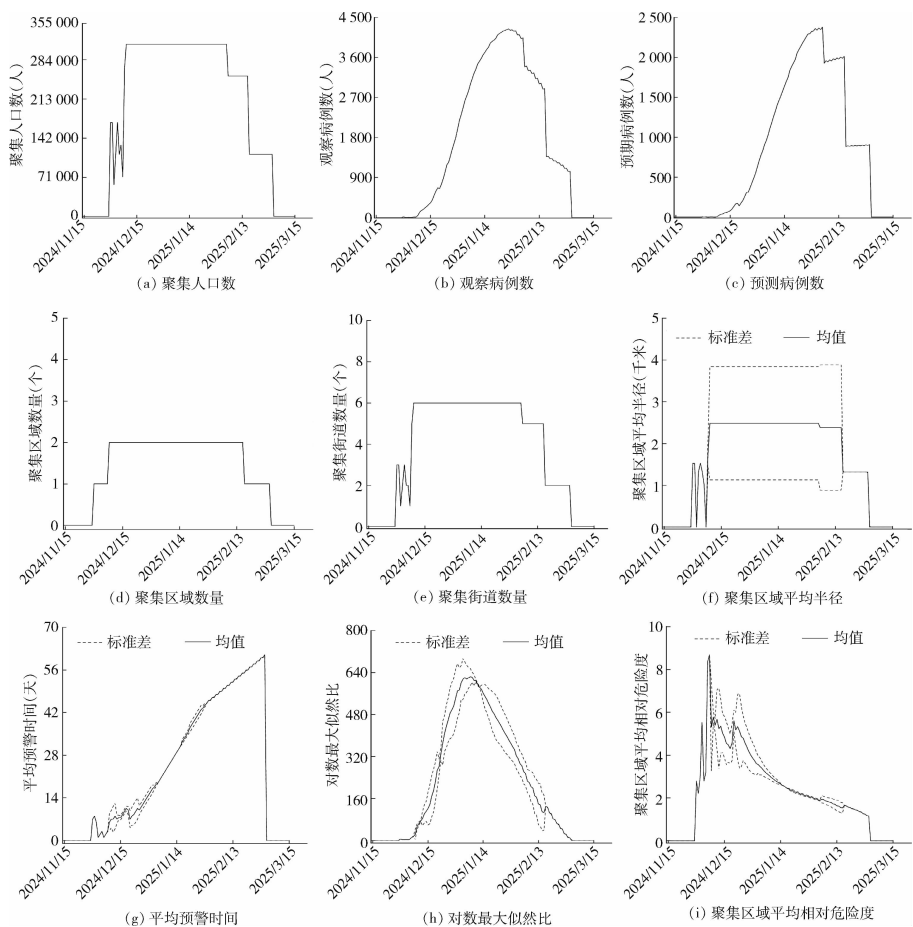


图 3 2024 年第 48 周至 2025 年第 9 周石景山区流感聚集特征

4 讨论

本研究运用前瞻性时空扫描,对北京市石景山区 2023—2025 年流感流行季病例数据进行动态监测与分析,首次在街道尺度识别流感病例新发聚集及时空演变特征。该方法可实时捕捉疫情扩散轨迹,弥补传统静态病例地图和发病率图的不足^[13]。研究通过动态追踪高风险区域分布和强度变化,为卫生行政部门流感监测与防控决策提供科学依据。

4.1 流感时空聚集性分析

基于泊松分布的前瞻性时空扫描显示,流感病例在石景山区存在明显时空聚集趋势。流感聚集区于 2024 年 11 月底初现于石景山区东部,后逐渐向中部扩散。该现象可能与该区域社会人口学和环境

特征相关。其一,东部街道人口密度高,居民集中居住使呼吸道传染病更易聚集传播^[14];其二,东部和中部区域老年人及学龄儿童占比高,可能增加聚集风险;其三,东部部分街道学校密集,校内人群高强度接触为流感传播提供重要场所^[15];其四,中部区域毗邻交通干道和地铁换乘枢纽,人口流动性更强,可能加速病毒由东部向中部扩散^[16]。结合上述因素,推测人口密度、易感人群结构、教育机构分布及交通流动性等是驱动聚集区空间演变的重要因素。疫情初期,聚集区域相对危险度达 8.68 峰值,提示局部传播强度极高,为疾控部门提供重要流感预警信号;疫情中期,随着聚集范围扩大和疫情演变,聚集区 LLR 在 2025 年 1 月初达峰值,表明 1 月份流感病例聚集强度最大;疫情后期,聚集范围和强度逐渐减小,提示疫情进入消退期^[1]。

前瞻性时空扫描的重要优势在于可动态追踪聚

集范围、强度及位置^[17]。其一,借助基于泊松分布的前瞻性时空扫描统计结果,卫生防疫部门可随流感聚集区的出现、扩大或减弱,实时调整医疗物资、疫苗和人力资源分配,确保疫情高峰期高风险区域获充足支持^[18];其二,通过比较采取干预措施(如学校停课、大规模疫苗接种)前后聚集区域强度和范围变化,可量化评估措施实施效果^[19];其三,动态追踪有助于卫生部门将防控重点从全区域覆盖转向特定高风险街道或社区,实施更具针对性的干预策略,避免资源浪费;其四,卫生部门实时、准确掌握聚集区动态,有助于向公众发布更清晰、具体的风险预警信息,指导居民采取有效的个人防护措施,减轻社会恐慌。

4.2 流感时空聚集性动态特征

对聚集区各项指标(聚集人口、病例数、聚集区数量、半径等)的动态分析,可为理解流感疫情演变过程提供量化依据。结果显示,聚集区内人口数和街道数量在疫情初期迅速增加后趋于稳定,反映疫情在局部区域的快速传播过程。聚集区域平均半径及其标准差在疫情初期上升形成平台期,表明疫情从一个聚集区向四周扩散,形成多个分散聚集区并达顶峰,有助于更直观地理解疫情扩散范围和趋势。此外,平均预警时间在疫情后期增至 61 天,表明该方法能持续追踪活跃聚集区,为公共卫生部门提供较长窗口期,采取相应干预措施。

研究不仅揭示了流感在石景山区的空间聚集特征,而且对公共卫生实践具有重要启示。前瞻性时空扫描实时探测到聚集区后,疾控部门可在 24 小时内迅速采取针对性干预措施:在聚集区内重点街道中小学和幼儿园强化晨午检制度,做到“早发现、早隔离”;督导社区卫生服务中心加大流感样病例监测力度,及时上报^[16];通过官方渠道和社区公告向公众发布健康预警,提醒居民加强个人防护、避免聚集性活动^[14]。卫生健康部门可在重点区域增设临时发热门诊,方便居民就近就医,缩短诊疗延迟。必要时协调交通管理部门,加强人群流动密集场所(如地铁站、商场)的环境消毒和通风管理^[15]。这些快速、精准的干预举措能在最短时间内

遏制流感在局部范围内扩散。

4.3 局限性

本研究存在一定局限性。前瞻性时空扫描默认的圆柱体扫描窗口可能与实际地理传播模式不符,尽管已进行校正,但仍存在假阳性聚集可能,未来研究应考虑更先进的空间分析方法,如不规则形状扫描或地理加权回归分析。此外,因仅使用确诊和临床诊断病例,研究未能全面反映流感疫情规模,未来应整合流感样病例等多源数据进行分析,提升监测预警准确度。

5 结语

本研究运用前瞻性时空扫描对北京市石景山区流感疫情进行动态监测与分析,识别流感聚集区域时空扩散模式,并评价模型预测效果,可为公共卫生部门提供流感疫情实时信息,有助于制定精准防控策略,减轻疾病负担。

作者贡献:施宏波负责论文撰写;赵晓负责论文修订;任丽君负责数据分析;白云负责论文审核。

利益声明:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- 1 单醇熙,吕辰龙,徐强,等. 2009—2018 年中国各地区流感流行开始时间的比较及气象影响因素 [J]. 中华医院感染学杂志, 2025, 35 (8): 1205 - 1214.
- 2 虎霄,高燕琳,史芸萍,等. 2014—2023 年北京市主要呼吸道传染病流行特征及趋势分析 [J]. 军事医学, 2025, 49 (2): 101 - 109.
- 3 徐文婕,白承续,陈东妮,等. 北京市学生 2016—2020 年法定和重点监测传染病发病情况 [J]. 中国学校卫生, 2025, 46 (4): 592 - 596.
- 4 杨辉,安家献,陈春秀,等. 2015—2024 年重庆市永川区流行性感冒流行特征及时空分析 [J/OL]. 预防医学情报杂志, 1 - 10 [2025 - 08 - 30]. <https://link.cnki.net/doi/10.19971/j.cnki.1006-4028.250312N>.
- 5 王磊,刘娜,杨宏,等. 2006—2020 年中国乙型肝炎流行趋势和时空聚集性分析 [J]. 中华流行病学杂志, 2025, 46 (3): 410 - 417.

- 6 秦迪, 初艳慧, 管秀刚, 等. 2010—2023 年北京市西城区猩红热病例时空分布特征研究 [J]. 公共卫生与预防医学, 2025, 36 (3): 42–46.
- 7 MA L, ZHU J, YANG L, et al. Triple line – scan camera measurement for efficient and accurate narrow – space 3 – D scanning with motion estimation [J]. Optics express, 2024, 32 (5): 8397–8414.
- 8 郭新慧, 张云奇, 马仲慧, 等. 2012—2023 年北京市房山区其他感染性腹泻时空聚集性研究 [J]. 中国预防医学杂志, 2025, 26 (1): 76–82.
- 9 张艺馨, 代炳芹, 王舒姿, 等. 2019—2023 年山东省其他感染性腹泻病流行特征及时空聚集性分析 [J]. 疾病监测, 2025, 40 (2): 196–201.
- 10 韩笑荷, 赵明扬, 王宗熹, 等. 基于时空地理加权回归模型 2016 至 2019 年中国流行性感冒发病影响因素分析 [J]. 郑州大学学报 (医学版), 2025, 60 (1): 109–114.
- 11 赵欣, 王茜, 谢红梅, 等. 2016—2022 年成都市流感时空特征分析 [J]. 预防医学情报杂志, 2023, 39 (12): 1449–1456.
- 12 刘云广, 黄茜, 张乐, 等. 2004—2018 年中国流行性感冒发病率的时空分析及其预测模型研究 [J]. 中华疾病控制杂志, 2023, 27 (2): 176–183.
- 13 KULLDORFF M. Prospective time periodic geographical disease surveillance using a scan statistic [J]. Journal of the royal statistical society series A: statistics in society, 2002, 164 (1): 61–72.
- 14 任丽君, 孙立昆, 周琳. 北京市石景山区 2019—2022 年 6~15 岁人群传染病流行特征 [J]. 海峡预防医学杂志, 2024, 30 (6): 21–23.
- 15 孙立昆, 史曼丽, 孙蕾, 等. 2019—2023 年北京市石景山区 6 月龄~5 岁儿童流感疫苗接种率及安全性分析 [J]. 职业与健康, 2024, 40 (23): 3219–3222.
- 16 周琳, 任丽君, 白云. 2016—2019 年北京市石景山区流感监测结果分析 [J]. 医学信息, 2024, 37 (13): 44–48.
- 17 廖晓文, 陈秋玲, 赵惠珍. 2012—2022 年云浮市流感流行特征及时空聚集性分析 [J]. 华南预防医学, 2024, 50 (4): 348–351.
- 18 范静宜, 朱渭萍, 齐慧, 等. 2019—2021 年上海市浦东新区流行性感冒病例时空特征分析 [J]. 疾病监测, 2023, 38 (6): 689–693.
- 19 陈宇, 陈琦, 吴杨, 等. 2014—2023 年黄冈市流行性感冒流行病学特征及时空聚集性分析 [J]. 现代预防医学, 2024, 51 (20): 3664–3671.

(上接第 57 页)

- 21 郑永君. 基层残疾人专职委员的职业能力建设研究——以湖北省为例 [J]. 残疾人研究, 2017 (2): 82–89.
- 22 REINHARDT K. Educating the deaf: psychology, principles, and practices [M]. Boston: D. C. Heath and Company, 2016.
- 23 SINGER G H S. Meta – analysis of comparative studies of depression in mothers of children with and without developmental disabilities [J]. American journal on mental retardation, 2006, 111 (3): 155–169.
- 24 PARK G A, LEE O N. The moderating effect of social support on parental stress and depression in mothers of children with disabilities [J]. Occupational therapy international, 2022 (1): 5162954.
- 25 MANTRI – LANGEVELDT A, DADA S, BOSHOFF K. Measures for social support in raising a child with a disability: a scoping review [J]. Child: care, health and development, 2019, 45 (2): 159–174.
- 26 黄晶晶, 刘艳虹. 特殊儿童家庭社会支持情况调查报告 [J]. 中国特殊教育, 2006 (4): 3–9.
- 27 李方方, 杨柳. 近十年我国有关特殊儿童家庭照顾者社会支持的研究进展 [J]. 现代特殊教育, 2015 (8): 9–12, 80.
- 28 韩冬. 北京市 0–6 岁智力残疾儿童康复转介服务模式研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2013.
- 29 张文红, 陈刚, 吕军, 等. 上海市残疾人康复服务信息管理现状调查 [J]. 中国康复理论与实践, 2007 (5): 493–494.
- 30 李磊, 李连友. 从碎片到整合: 中国社会保障治理的进程与走向——基于“理念 – 主体 – 路径”的分析框架 [J]. 经济社会体制比较, 2021 (1): 1–10.
- 31 HUMMELL E, BORG S J, FOSTER M, et al. Agendas of reform: continuity and change in Australia’s national disability insurance scheme (NDIS) [EB/OL]. [2025–04–21]. <https://www.cambridge.org/core/journals/social-policy-and-society/article/agendas-of-reform-continuity-and-change-in-australias-national-disability-insurance-scheme-ndis/F95F89CE717F0D79F2572AC194928476>.
- 32 张浩森, 谭洪, 于兴尚. 中国残疾儿童康复救助: 发展脉络、运行实践与优化路径 [J]. 残疾人研究, 2025 (2): 30–38.