不同年龄分组下颈椎损伤预测模型的比较

Daniel J. Corwin, MD, MSCE,[1] Pradip P. Chaudhari, MD,[2] Leah Tzimenatos, MD,[3] Monica Harding, MS,[4] Lawrence Cook, PhD,[4] Kenneth Yen, MD,[5] Alexander Rogers, MD,[6] Fahd A. Ahmad, MD, MSCI,[7] Robert Sapién, MD, PhD, MMM,[8] Robert Hickey, MD,[9] Lois Lee, MD, MPH,[10] Jeffrey R. Leonard, MD,[11] Julie C. Leonard, MD, MPH[12]

[1]Division of Emergency Medicine, Children's Hospital of Philadelphia, Philadelphia, Pennsylvania; [2]Division of Emergency and Transport Medicine, Children's Hospital Los Angeles, Los Angeles, California; [3]Department of Emergency Medicine, School of Medicine, University of California, Davis, Sacramento, California; [4]Utah Data Coordinating Center, University of Utah, Salt Lake City, Utah; [5]Division of Pediatric Emergency Medicine, Department of Pediatrics, Children's Health Dallas, University of Texas Southwestern Medical Center, Dallas, Texas; [6]Departments of Emergency Medicine and Pediatrics, University of Michigan, CS Mott Children's Hospital, Ann Arbor, Michigan; [7]Department of Pediatrics, Division of Emergency Medicine, School of Medicine, Washington University in St. Louis, St. Louis, Missouri; [8]Department of Emergency Medicine, School of Medicine, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico; [9]Department of Pediatrics, University of Pittsburgh, Medical Center Children's Hospital of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania; [10]Division of Emergency Medicine, Boston Children's Hospital, Boston, Massachusetts; [11]Department of Neurosurgery, College of Medicine, The Ohio State University, Nationwide Children's Hospital, Columbus, Ohio; and [12]Division of Emergency Medicine, Department of Pediatrics, College of Medicine, The Ohio State University, Nationwide Children's Hospital, Columbus, Ohio

Address correspondence to: Daniel Corwin, MD, MSCE, Children's Hospital of Philadelphia, Roberts Center for Pediatric Research, 2716 South St, Philadelphia, PA 19146. corwind@chop.edu

本主题已知信息 颈椎损伤 (CSI) 是创伤后常见的儿科关注问题。儿科急诊应用研究网络 (PECARN) CSI 预测模型在儿科人群中表现良好，但其在特定年龄组中的表现以及年龄特异度模型是否优于整体模型，尚不清楚。

本研究新增内容 PECARN CSI 预测模型的表现与使用相同数据推导出的年龄特异度模型相当。这一发现支持临床医师在整个儿科年龄谱中使用 PECARN CSI 预测模型。

摘 要

目的 评估儿科急诊护理应用研究网络 (PECARN) 颈椎损伤 (CSI) 预测模型在不同儿科年龄组中的表现，并推导和评估针对特定年龄的 CSI 预测模型。

方法 我们对 PECARN 的 CSI 研究进行了计划性二次分析，该研究纳入在 18 家儿童医院急诊科就诊的 18 岁以下已知或疑似钝挫伤的患儿。将参与者分为 4 个临床相关年龄组（< 2 岁、2 ～ 7 岁、8 ～ 15 岁和 16 ～ < 18 岁）。基于 PECARN CSI 预测模型中的 4 个高风险预测因子，并采用分类与回归树 (CART) 分析识别其他不可忽视的年龄特异度风险因素，推导出年龄特异度模型。使用敏感度、特异度、阳性预测值和阴性预测值 (NPV) 评估各年龄组的模型表现。

结果 共有 22 430 例儿童纳入分析。在 CART 分析中，每个年龄特异度模型均识别出 3 ～ 8 个具有非可忽略影响的风险因素。PECARN CSI 预测模型的敏感度（各年龄组范围为 91.7% ～ 94.4%）与年龄特异度模型（范围 88.4% ～ 97.5%）相似。PECARN CSI 预测模型的特异度（各年龄组范围为 44.6% ～ 72.3%）也与年龄特异度模型（范围 45.9% ～ 75.9%）相似。所有模型的 NPV（均 ≥ 99.6%）在各年龄组间均相似。

结论 年龄特异度 CSI 预测模型与 PECARN CSI 预测模型的表现相似。这些发现支持临床医师在整个儿科年龄谱中使用 PECARN CSI 预测模型。

引 言

颈椎损伤 (CSI) 是钝挫伤后就诊于急诊科 (ED) 的

American Academy of Pediatrics
DEDICATED TO THE HEALTH OF ALL CHILDREN™
苏州大学附属儿童医院 苏州大学

The article(s) originally appeared in English in the 2026, Volume 157 of Pediatrics, published by the American Academy of Pediatrics (AAP), and are hereby authorized for translation into Chinese by Children's Hospital of Soochow University.

儿科患者中常见的临床关注问题。然而，真正的 CSI 是罕见事件，仅发生在约 1% 的儿科创伤患者中 [1,2]。针对成人群体，已有经过充分验证的风险评估工具用于指导影像学检查决策，并已在临床实践中应用数十年 [3-5]。然而，在指导儿科患者临床决策方面，可供参考的信息相对有限 [6,7]。儿童与成人之间的关键解剖差异决定了需要在儿科人群中制定独特的决策模型 [8]。除了儿童与成人之间的这些差异外，儿科人群内部也存在特定差异，这引发了对单一预测模型是否适用于所有儿童和青少年的担忧。

既往研究发现，与年龄较大儿童和青少年相比，婴幼儿的损伤机制和颈椎原发损伤解剖部位有所不同 [9]。此外，评估风险因素本身的能力在会说话前儿童和会说话儿童之间可能存在差异，提示可能需要在不同群体中使用独特的风险模型 [6,10]。鉴于漏诊颈椎损伤可能带来的严重危害，以及过度评估所造成的不良影响（包括不必要的影像学检查所带来的辐射暴露和不必要的脊柱制动所导致的疼痛等）[11,12]。上述既往研究结果强调了在儿科各年龄组中评估颈 CSI 特异度危险因素的重要性。

在一项先导性病例对照研究中，亚组分析发现一个总体预测模型在 3 个不同年龄组中的敏感度相似，但特异度水平不同 [13]。然而，该研究受限于样本量小和回顾性性质。近期，儿科急诊护理应用研究网络 (PECARN) 发表了针对 18 岁以下儿科患者的 CSI 预测模型 [7]。然而，该预测模型在儿科人群各年龄分组中的有效性尚不清楚。因此，我们的研究目标如下：(1) 评估 PECARN CSI 预测模型在 4 个年龄组中的表现：学语前儿童（＜ 2 岁）、幼儿 (2 ～ 7 岁)、较大儿童和青少年早期 (8 ～ 15 岁）以及青少年后期 (16 ～＜ 18 岁)[13]；(2) 采用分类与回归树 (CART) 分析方法，在预先设定的 4 个年龄组中评估颈椎损伤的危险因素，并据此推导及评估年龄特异度颈椎损伤预测模型的预测效能。

方　法

研究设计、患者及结局指标

本研究是对 PECARN CSI 主研究中纳入患者的计划性二次分析。研究对象的纳入与排除标准及研究流程已在先前文献中详细描述 [7]。简言之，我们于 2018 年 12 月 12 日—2021 年 12 月 31 日在 18 家参与研究的 PECARN 附属儿童医院 ED 中纳入 8 岁以下儿童。所有中心均为美国外科医师学会或州认证的儿科创伤中心。参与者符合纳入条件的前提是已知或疑似钝挫伤，并且接受创伤团队救治，由急救医疗服务从受伤现场转运，或接受颈椎影像学检查。我们排除了仅遭受穿透性创伤的参与者。人口统计学变量（包括年龄、性别、种族和民族）由研究团队成员从电子健康记录中提取。尽管种族和民族是社会建构概念，但我们认为纳入这些变量对于评估样本相较于因损伤就诊的儿科患者总人群的多样性和代表性很重要。种族分类与常用既定类别一致，即黑人、白人和其他 (包括美洲印第安人或阿拉斯加原住民、亚洲人、夏威夷原住民或其他太平洋岛民以及多种族)。我们在标准化数据收集表上收集了本次二次分析中使用的预测变量，数据来源于儿科急诊医学临床医师（主治医师、专科培训医师和高级实践临床医师），涵盖约 60 个候选预测因子，涉及损伤机制、既往病史、现病史、气道、呼吸和循环、意识状态及体格检查项目（补充表 1 ～ 4)。本研究的主要结局指标为 CSI，定义为颈椎骨折或韧带损伤、椎管内出血或颈脊髓损伤 [7]。主研究获得 PECARN 犹他大学机构审查委员会批准，并在 ClinicalTrials.gov 注册，编号为 NCT05049330。

统计分析与建模

我们将参与者分为 4 个年龄组进行分析：小于 2 岁、2 ～ 7 岁、8 ～ 15 岁和 16 ～＜ 18 岁。选择这些年龄截点是为了与既往研究进行直接比较 [13]，体现发育过渡阶段（例如：约 2 岁时从不会说话到会

说话)[10]，反映生理学和损伤模式的差异(例如：既往研究确定约 8 岁时存在轴向损伤向轴下损伤的转变)[9]，并纳入其他成人模型中的较大龄青少年(经充分验证的加拿大颈椎影像学模型纳入 ≥ 16 岁的患者)[3]。建模前，我们使用 Fisher 精确检验比较了各年龄组之间的所有候选预测因子(补充表 1 ～ 4)。

为检验 PECARN CSI 预测模型在不同年龄中的表现，我们将该模型应用于各年龄组，以是否存在 CSI 为结局指标，以 PECARN CSI 预测模型中的 9 个变量为预测因子。我们还为每个年龄组重新构建了预测模型。与我们构建 PECARN CSI 预测模型的建模方法类似[7]，我们首先评估各变量与 CSI 的双变量关联(补充表 1 ～ 4)。由于我们的目标是确定用于进一步建模的因素，而非对关联性做出确定性结论，因此在此阶段未对多重比较进行调整。接下来，我们使用 PECARN CSI 预测模型中确定的相同 4 个高风险变量对各分组中的参与者进行识别：(1) 格拉斯哥昏迷量表评分为 3 ～ 8 分；(2) 警觉、语言反应、疼痛反应、无反应 (AVPU) 量表评估为无反应；(3) 气道、呼吸或循环 (ABC) 结果异常；(4) 体格检查有局灶性神经功能缺损(感觉异常、麻木或无力)。上述变量被选为临床意义明确且颈椎损伤风险大于 10% 的变量。通过采用稳健误差估计的双变量 Poisson 回归，证实这些高危变量在各年龄组中的关联强度均具有统计学意义。针对各年龄组中未被上述高危变量覆盖的参与者，进一步采用 CART 分析的二元递归分割方法，以识别具有非可忽略影响的颈椎损伤危险因素[7]。候选变量的纳入标准为双变量关联分析中 Fisher 精确检验的 $P < 0.15$。在模型剪枝过程中，为提升模型性能，我们从 CART 分析中排除了人口学变量。我们采用 10 折交叉验证对树参数进行调优，以获得更具泛化能力的预测模型。在 CART 分析中，我们对各年龄组采用尽可能高的误分类成本以实现模型收敛。具体而言，在 < 2 岁、2 ～ 7 岁、8 ～ 15 岁以及 16 ～< 18 岁年龄组中，漏诊 1 例颈椎损伤患者相较于错误分类 1 例非颈椎损伤患者的误分类成本比分别为 250：1、150：1、250：1 及 125：1。我们通过计算各模型的敏感度、特异度、阳性预测值及阴性预测值 (NPV) 及其相应的 95% 置信区间，评估 PECARN 颈椎损伤预测模型在各年龄组中的应用效果以及年龄特异度预测模型的表现。CART 分析使用 Minitab (版本 20.2) 软件，其他所有分析均使用 SAS (版

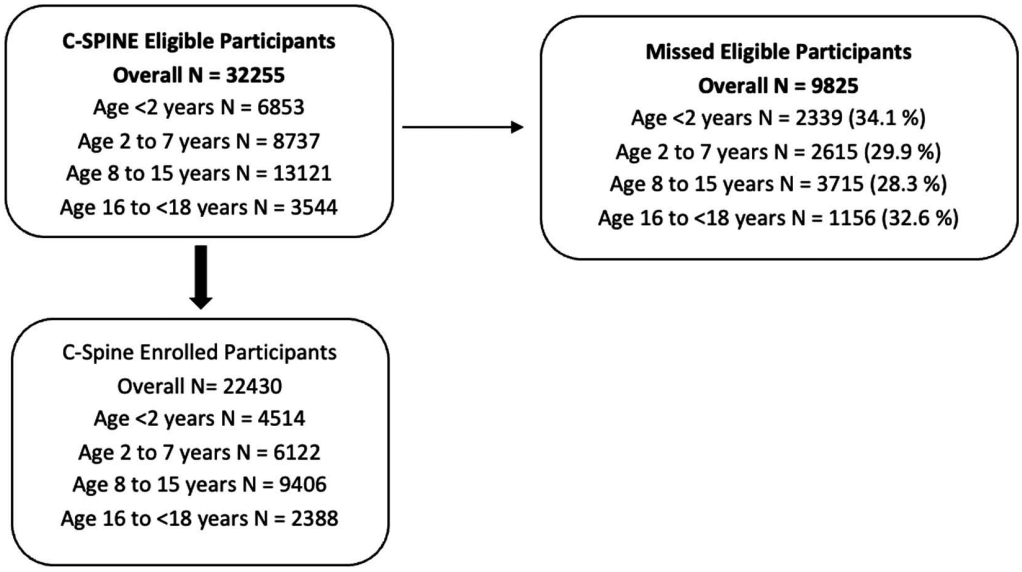


图 1　CONSORT 流程图

C-SPINE：颈椎。

表 1　参与者的人口统计学特征与结局

特征	年龄				*P* 值
	＜ 2 岁，N = 4 514 (%)	2 ～ 7 岁，N = 6 122 (%)	8 ～ 15 岁，N = 9 406 (%)	16 ～＜ 18 岁，N = 2 388 (%)	
性别					＜ 0.001
男性 / 未分化	2 504 (55.5)	3 657 (59.7)	5 640 (60.0)	1 267 (53.1)	
女性	2 010 (44.5)	2 465 (40.3)	3 766 (40.0)	1 121 (46.9)	
种族					＜ 0.001
黑人或非裔美国人	1 301 (28.8)	1 973 (32.2)	2 805 (29.8)	714 (29.9)	
白人	2 174 (48.2)	2 823 (46.1)	4 739 (50.4)	1 170 (49.0)	
其他 [a]	757 (16.8)	1 013 (16.5)	1 411 (15.0)	358 (15.0)	
民族：西班牙裔或拉丁裔	799 (17.7)	1 208 (19.7)	1 861 (19.8)	462 (19.3)	＜ 0.001
损伤机制					＜ 0.001
机动车碰撞	623 (13.8)	1 983 (32.4)	2 719 (28.9)	1 033 (43.3)	
摩托车 / 全地形车	20 (0.4)	192 (3.1)	855 (9.1)	183 (7.7)	
被汽车或其他机动车撞击	64 (1.4)	413 (6.7)	853 (9.1)	125 (5.2)	
跌倒	2 147 (47.6)	2 595 (42.4)	2 304 (24.5)	398 (16.7)	
跳水	0 (0.0)	4 (0.1)	28 (0.3)	6 (0.3)	
体育或娱乐相关	20 (0.4)	234 (3.8)	1 646 (17.5)	319 (13.4)	
疑似儿童虐待	1 048 (23.2)	191 (3.1)	76 (0.8)	12 (0.5)	
攻击 / 斗殴	22 (0.5)	23 (0.4)	339 (3.6)	151 (6.3)	
急救医疗服务现场反应	1 824 (40.4)	3 898 (63.7)	6 239 (66.3)	1 492 (62.5)	＜ 0.001
急救医疗服务转运期间使用脊柱活动限制	204 (22.0)	820 (35.6)	1 790 (48.2)	393 (50.4)	＜ 0.001
获得颈椎影像学检查	2 606 (57.7)	2 798 (45.7)	4 950 (52.6)	1 440 (60.3)	＜ 0.001
急诊科处置					＜ 0.001
居家观察	2 851 (63.2)	4 095 (66.9)	6 389 (67.9)	1 613 (67.5)	
收入重症监护室	370 (8.2)	466 (7.6)	635 (6.8)	143 (6.0)	
收入普通病房	1 189 (26.3)	1 318 (21.5)	2 001 (21.3)	530 (22.2)	
送手术室	72 (1.6)	206 (3.4)	284 (3.0)	56 (2.3)	
急诊科内死亡	13 (0.3)	16 (0.3)	13 (0.1)	1 (0.0)	
其他	19 (0.4)	21 (0.3)	84 (0.9)	45 (1.9)	
颈椎损伤 (CSI)	54 (1.2)	121 (2.0)	198 (2.1)	60 (2.5)	＜ 0.001

本 9.4) 软件。

结　果

本研究共纳入 22 430 例儿童：其中 ＜ 2 岁者 4 514 例，2 ～ 7 岁者 6 122 例，8 ～ 15 岁者 9 406 例，16 岁～＜ 18 岁者 2 388 例 (图 1)。CSI 发生率随年龄增长而增加，从 ＜ 2 岁的 1.2% 上升至 16 ～＜ 18 岁的 2.5% (表 1)。机动车碰撞 (MVC) 和行人被撞是 2 岁及以上儿童更为常见的损伤机制，体育相关损伤在 ≥ 8 岁儿童中更为常见。跌倒则在较年轻年龄组中更常见。各年龄组的颈椎影像学检查率存在差异 (从 2 ～ 7 岁儿童的 45.7% 到 16 ～＜ 18 岁青少年的 60.3%) 。

各高风险变量在各年龄组中的风险均至少为

10%（表 2）。存在任何高风险变量时，CSI 相对风险范围为 7.0（8 ～ 15 岁）～ 26.7（＜ 2 岁）。在供 CART 分析评估的约 60 个候选预测因子中，＜ 2 岁组纳入分析者 16 项（补充表 1），2 ～ 7 岁组纳入 32 项（补充表 2），8 ～ 15 岁组纳入 35 项（补充表 3），16 ～＜ 18 岁组纳入 21 项（补充表 4）。各年龄特异度预测模型最终选入的特征数量为 3 项（16 ～＜ 18 岁组）～ 8 项（8 ～ 15 岁组）（表 3 及图 2）。

在评估 PECARN CSI 预测模型于各年龄组中的预测效能时（表 4），我们发现各组的敏感度相近，其中年龄特异度敏感度范围为 2 ～ 7 岁组的 91.7%（95% CI：86.8 ～ 96.6）～＜ 2 岁组的 94.4%（95% CI：88.3 ～ 100.0）。然而，特异度随年龄增长呈逐渐降低趋势，由＜ 2 岁组的 72.3%（95% CI：71.0 ～ 73.6）降至 16 ～＜ 18 岁组的 44.6%（95% CI：42.6 ～ 46.6）。

年龄特异度预测模型（表 4）与 PECARN CSI 预测模型相比具有相似的敏感度（范围为 88.4% ～ 97.5%）和特异度（范围为 45.9% ～ 75.9%）。仅在 8 ～ 15 岁年龄组的模型中敏感度更高（97.5% vs 93.9%）。PECARN CSI 预测模型中各年龄组的 NPV 均至少为 99.6%，年龄特异度预测模型的 NPV 均至少为 99.7%。

最后，年龄特异度预测模型漏诊的 CSI 总人数与 PECARN 模型相似（表 5），在 2 ～ 7 岁范围内年龄

表 2　各年龄组高风险变量的风险比与 CSI 汇总

风险因素	CSI：是 (%)	CSI：否 (%)	相对风险 (95% CI)	*P* 值
＜ 2 岁				
GCS 评分：3 ～ 8 分	26 (48.1)	74 (1.7)	41.0 (25.0 ～ 67.3)	＜ 0.000 1
AVPU：无反应	16 (29.6)	52 (1.2)	27.5 (16.2 ～ 46.9)	＜ 0.000 1
ABC 异常	30 (55.6)	188 (4.2)	24.6 (14.7 ～ 41.4)	＜ 0.000 1
体格检查有局灶性神经功能缺损 [a]	9 (16.7)	59 (1.3)	13.1 (6.7 ～ 25.7)	＜ 0.000 1
上述任一项	34 (63.0)	236 (5.3)	26.7 (15.6 ～ 45.8)	＜ 0.0001
2 ～ 7 岁				
GCS 评分：3 ～ 8 分	39 (32.2)	134 (2.2)	16.4 (11.5 ～ 23.2)	＜ 0.000 1
AVPU：无反应	25 (20.7)	75 (1.2)	15.7 (10.6 ～ 23.2)	＜ 0.000 1
ABC 异常	48 (39.7)	230 (3.8)	13.8 (9.8 ～ 19.5)	＜ 0.000 1
体格检查有局灶性神经功能缺损 [a]	14 (11.6)	78 (1.3)	8.6 (5.1 ～ 14.4)	＜ 0.000 1
上述任一项	57 (47.1)	306 (5.1)	14.1 (10.0 ～ 19.9)	＜ 0.000 1
8 ～ 15 岁				
GCS 评分：3 ～ 8 分	42 (21.2)	165 (1.8)	12.0 (8.8 ～ 16.3)	＜ 0.000 1
AVPU：无反应	31 (15.7)	117 (1.3)	11.6 (8.2 ～ 16.4)	＜ 0.000 1
ABC 异常	51 (25.8)	347 (3.8)	7.9 (5.8 ～ 10.6)	＜ 0.000 1
体格检查有局灶性神经功能缺损 [a]	24 (12.1)	309 (3.4)	3.8 (2.5 ～ 5.7)	＜ 0.000 1
上述任一项	73 (36.9)	650 (7.1)	7.0 (5.3 ～ 9.3)	＜ 0.000 1
16 ～＜ 18 岁				
GCS 评分：3 ～ 8 分	16 (26.7)	26 (1.1)	20.3 (12.5 ～ 33.0)	＜ 0.000 1
AVPU：无反应	9 (15.0)	15 (0.6)	17.4 (9.7 ～ 31.2)	＜ 0.000 1
ABC 异常	19 (31.7)	69 (3.0)	12.1 (7.3 ～ 20.0)	＜ 0.000 1
体格检查有局灶性神经功能缺损 [a]	6 (10.0)	106 (4.6)	2.3 (1.0 ～ 5.1)	0.052 1
上述任一项	23 (38.3)	170 (7.3)	7.1 (4.3 ～ 11.6)	＜ 0.000 1

[a] 局灶性神经功能缺损包括感觉异常、麻木或无力。

表 3　原始模型与年龄特异度模型纳入的特征

原始预测模型[a]	＜ 2 岁[a]	2 ～ 7 岁[a]	8 ～ 15 岁[a]	16 ～＜ 18 岁[a]
ABC 异常	ABC 异常	ABC 异常	ABC 异常	ABC 异常
AVPU：无反应	AVPU：无反应	AVPU：无反应	AVPU：无反应	AVPU：无反应
GCS 评分：3 ～ 8 分	GCS 评分：3 ～ 8 分	GCS 评分：3 ～ 8 分	GCS 评分：3 ～ 8 分	GCS 评分：3 ～ 8 分
局灶性神经功能缺损	局灶性神经功能缺损	局灶性神经功能缺损	局灶性神经功能缺损	局灶性神经功能缺损
自述颈部疼痛	严重头部损伤	自述颈部疼痛	自述颈部疼痛	自述颈部疼痛
意识状态改变	自述无法活动颈部	AVPU：V 或 P	严重头部损伤	可触及颅骨骨折
严重头部损伤	GCS 评分：9 ～ 13 分	安全带征	AVPU：V 或 P	高风险 MVC
后正中线颈部压痛	肋骨骨折	检查时颈部无法活动	严重躯干损伤	
严重躯干损伤			后正中线颈部压痛、意识丧失、高风险 MVC、跳水	

ABC：气道、呼吸或循环；AVPU：警觉、言语、疼痛、无反应量表；CART：分类与回归树；GCS：格拉斯哥昏迷量表；高风险 MVC：伴有侵入、甩出、死亡或高风险遥测数据的机动车碰撞。

[a] 各模型顶部 4 个特征为高风险变量，纳入所有模型，为临床合理且颈椎损伤风险超过 10% 的变量子集，其关联强度经双变量泊松回归确认。各模型中其余特征通过双变量关联和 CART 分析确定为不可忽视的损伤风险因素。

特异度模型漏诊更多 (14 vs 10)，而在 8 ～ 15 岁范围内 PECARN 预测模型漏诊更多 (12 vs 5)。在漏诊患者中，PECARN 预测模型漏诊的 29 例患者均无需接受颅骨牵引环固定或手术干预，而年龄特异度模型漏诊的 26 例中有 1 例 (1 例 6 岁韧带损伤伴 C1 ～ C3 颈髓损伤需手术内固定治疗的患者）需要手术。

讨　论

本项针对主研究（该研究推导并验证了 PECARN CSI 预测模型）中儿童和青少年队列的计划性二次分析，评估了原始模型和 4 个不同年龄组特异度预测模型的表现。年龄特异度预测模型纳入了一些 PECARN CSI 预测模型中未包含的因素，然而并未优于 PECARN CSI 预测模型，后者在各年龄组中均具有稳健的敏感度和 NPV。

首个完全基于大规模儿科人群的 CSI 预测模型源自一项纳入 540 例 16 岁以下 CSI 患儿的回顾性病例对照研究 [14]。按年龄组（与当前研究分组相似：＜ 2 岁、2 ～ 7 岁和 8 ～＜ 16 岁）对该预测模型进行的亚组分析显示，其检验特征与基于全部 16 岁以下儿童队列的总体预测模型略有不同 [13]。该先前的预测模型总体队列敏感度较高；然而，敏感度在各年龄组间存在差异，尤其是对最小儿童（＜ 2 岁组敏感度仅为 67%，而较大年龄组分别为 98% 和 96%)。该研究中年龄特异度预测模型提高了敏感度，尤其是对最小儿童（提高至 96%)，但特异度相应下降。有趣的是，在当前年龄分层评估中，我们发现 PECARN CSI 预测模型在各年龄组中均具有稳健的敏感度（包括最小儿童中的 94.4%)，且年龄特异度模型的生成并未改善这一表现。

PECARN CSI 预测模型与既往决策模型 [包括近期发表的 PEDSPINE II 研究（一项针对 ＜ 3 岁儿童的回顾性 CSI 决策模型推导研究 [6])] 之间最大的差异之一是排除了损伤机制。在 PECARN 病例对照研究的年龄特异度亚组分析中，高风险 MVC 出现在每个年龄特异度预测模型中。此外，在 8 ～＜ 16 岁儿童的年龄特异度预测模型中还纳入了跳水致伤机制 [13]。既往研究也确定高风险 MVC 和跳水是成人和儿科患者 CSI 的重要损伤机制 [14–16]。虽然这些因素未出现在

PECARN CSI 预测模型中；但在本研究中，高风险 MVC（8 ～ 15 岁和 16 ～＜ 18 岁儿童中）和跳水（8 ～ 15 岁儿童中）均被纳入年龄特异度预测模型。值得欣慰的是，即使在当前研究中将上述机制因素纳入年龄特异度组，我们并未发现 NPV 有显著变化。然而，在学龄期儿童及青少年人群中，鉴于上述因素与损伤的高度相关性，若临床医师力求最大化颈椎损伤的检测敏感度，可考虑在高危损伤机制（尤其是跳水和高危机动车碰撞）发生后，强调采用 PECARN 颈椎损伤预测模型进行筛查的重要性。这一点在 8 ～ 15 岁队列中尤为相关，因为该年龄组中 PECARN 颈椎损伤预测模型的漏诊人数多于年龄特异度模型。

值得注意的是，各年龄组在损伤机制和 CSI 发生率方面存在差异。既往研究已发现与本研究所见相似的趋势，即跌倒伤的发生率随年龄增长而下降，而运动相关损伤则随儿童进入青春期而增加 [9]。有趣的是，与既往研究相比，机动车碰撞在最低龄儿童（＜ 2 岁）的致伤机制中所占比例低于较大龄儿童及青少年 [17]。造成这一差异可能有多种原因，但最值得注意的是，这很可能主要与美国在过去近 20 年（从既往年龄特异度模型数据收集至本研究期间）机动车碰撞（尤其是致死性机动车碰撞）发生率显著下降有关 [18]。然而，如下所述，损伤机制的这一变化并未显著改变本研究最低龄参与者的 CSI 发生率。

除损伤机制差异外，我们还注意到各年龄组间 CSI 发生率的差异，最低龄儿童发生率最低，而大龄青少年发生率逐渐升高，这也与既往研究结果一致 [1]。尽管存在上述差异，我们并未发现颈椎影像学检查率随年龄增长呈相应趋势（然而，16 ～＜ 18 岁青少年影像学检查率最高，＜ 2 岁组次之）。鉴于儿童尤其是最低龄儿童对潜在不必要的颈部影像学检查及辐射暴露的易感性 [12,19]，PECARN CSI 预测模型

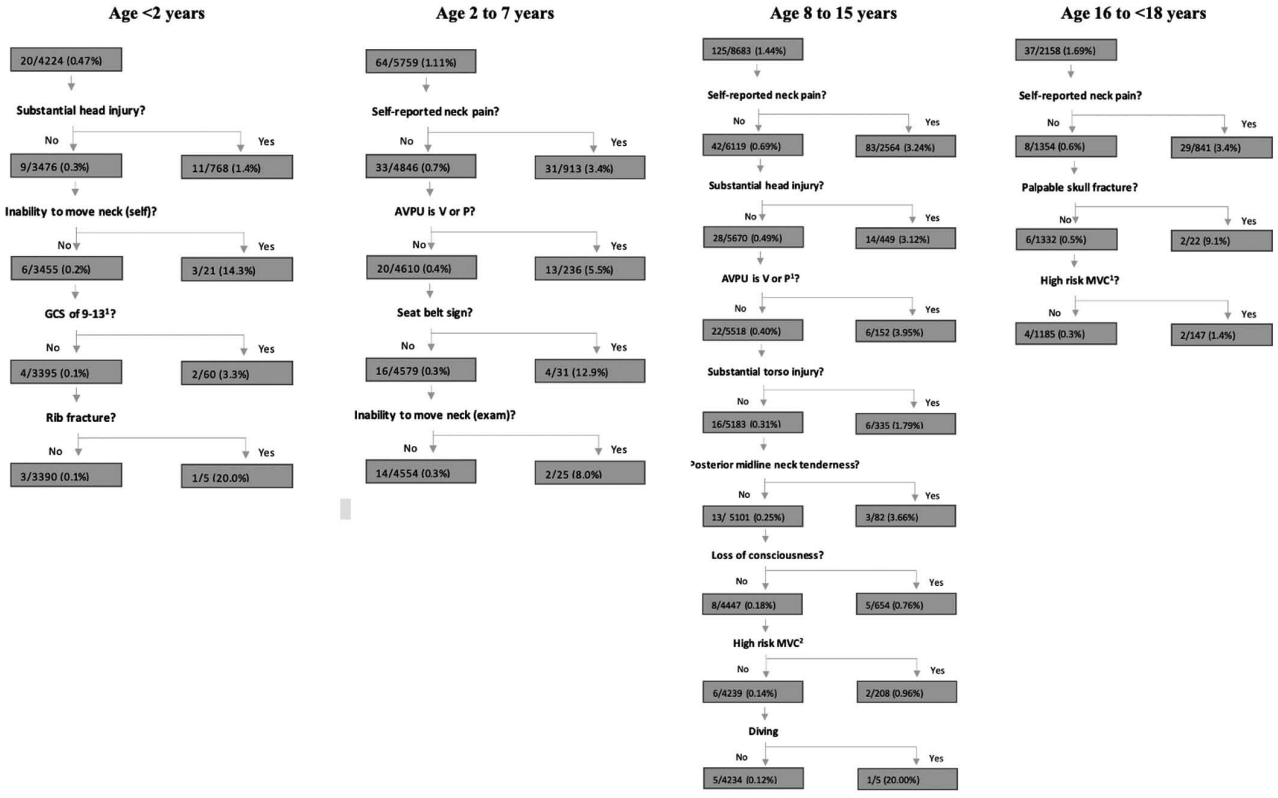


图 2　年龄特异度模型的分类与回归树。用于推导分类树的参与者为各年龄组内不满足任何高风险发现的患者

表 4　原始模型与年龄特异度模型敏感度及特异度的比较

模型	＜ 2 岁，% (95% CI)	2 ～ 7 岁，% (95% CI)	8 ～ 15 岁，% (95% CI)	16 ～＜ 18 岁，% (95% CI)
原始模型				
敏感度	94.4 (88.3 ～ 100.0)	91.7 (86.8 ～ 96.6)	93.9 (90.6 ～ 97.3)	93.3 (87.0 ～ 99.6)
特异度	72.3 (71.0 ～ 73.6)	65.8 (64.6 ～ 67.0)	53.9 (52.9 ～ 54.9)	44.6 (42.6 ～ 46.6)
PPV	4.0 (2.9 ～ 5.0)	5.1 (4.2 ～ 6.1)	4.2 (3.6 ～ 4.8)	4.2 (3.1 ～ 5.2)
NPV	99.9 (99.8 ～ 100.0)	99.7 (99.6 ～ 99.9)	99.8 (99.6 ～ 99.9)	99.6 (99.2 ～ 100.0)
年龄特异度模型				
敏感度	94.4 (88.3 ～ 100.0)	88.4 (82.7 ～ 94.1)	97.5 (95.3 ～ 99.7)	93.3 (87.0 ～ 99.6)
特异度	75.9 (74.7 ～ 77.2)	75.7 (74.6 ～ 76.7)	45.9 (44.9 ～ 46.9)	50.7 (48.7 ～ 52.8)
PPV	4.5 (3.3 ～ 5.8)	6.8 (5.6 ～ 8.1)	3.7 (3.2 ～ 4.2)	4.7 (3.5 ～ 5.8)
NPV	99.9 (99.8 ～ 100.0)	99.7 (99.5 ～ 99.9)	99.9 (99.8 ～ 100.0)	99.7 (99.3 ～ 100.0)

缩写：NPV，阴性预测值；PPV，阳性预测值。

在最低龄儿童中排除 CSI 的能力具有高度临床现实意义。

最后，PECARN CSI 预测模型与年龄特异度预测模型的预测效能相近，且 PECARN 模型在所有年龄组中排除颈椎损伤方面均表现同样良好，这一点在临床预测模型的实施背景下尤其值得关注。尽管儿科和急诊医学领域已针对多种疾病制定了临床预测模型，但即便是那些能够以高准确度预测结局的模型，也常因计算繁琐及其他实际操作障碍等原因而未能得到广泛应用 [20,21]。因此，能够在整个儿科年龄范围内采用单一模型，有助于克服 PECARN CSI 预测模型广泛实施中的若干实际障碍，并可能使临床医师更倾向于选择 PECARN 模型，而非其他表现优异的年龄特异度模型（如 PEDSPINE II 模型）[6]。预测模型的成功实施尤其具有现实意义，因为本样本中患者的影像学检查率较高 (2 ～ 7 岁组为 45.7%，16 ～＜ 18 岁组超过 60%)，而各年龄组 CSI 发生率均 ≤ 2.5%。

本研究存在若干局限。首先，有相当数量符合纳入标准的参与者最终未被纳入研究。如先前文献所述 [7]，鉴于未被纳入的合格人群与已纳入人群在人口学特征方面相似，我们认为这并未对研究结果造成偏倚。第二，所有患儿均来自三级儿科医疗机构，这可能影响本研究结果的普适性。PECARN CSI 预测模型及年龄特异度预测模型在综合医院和社区医院急诊科就诊儿童中的表现可能与本文报告结果有所不同，未来重要的工作包括在社区急诊科中验证 PECARN CSI 预测模型在各年龄组中的适用性。第三，尽管年龄分组是基于关键发育里程碑（＜ 2 岁儿童处于学语前状态、8 岁为损伤由椎轴向椎下段转变的转折点）以及实用分析目的而确定，但我们的年龄分组（尤其是 2 ～ 7 岁和 8 ～ 15 岁组）仍存在一定的发育异质性。最后，母体预测研究在设计时的检验效能足以在总体样本中推导并验证 CSI 预测模型。我们在年龄特异度分组中进行模型推导、验证及差异检测时，可能存在检验效能不足的问题。

表 5　各年龄类别中不同模型漏诊的颈椎损伤患者人数

年龄类别（岁）	原始模型漏诊患者人数	年龄特异度模型漏诊患者人数
＜ 2	3	3
2 ～ 7	10	14[a]
8 ～ 15	12	5
16 ～＜ 18	4	4

[a] 原始模型漏诊患者中无需手术干预者。年龄特异度模型漏诊 1 例：1 例 6 岁患者韧带损伤伴 C1 ～ C3 颈髓损伤，需手术内固定治疗。

结　论

本项针对 PECARN CSI 研究的预设二次分析，比较了 PECARN CSI 预测模型在 4 个年龄组中的表现，并推导和检验了针对每个年龄组重新构建的 CSI 预测模型。我们发现 PECARN CSI 预测模型的表现与年龄特异度预测模型同样良好。本研究支持在整个儿科年龄谱中使用 PECARN CSI 预测模型，同时对于较大儿童需特别关注特定损伤机制（包括高风险 MVC 和跳水）。未来工作包括评估 PECARN CSI 模型在不同急诊环境（受伤儿童就诊的场所）中的实施情况。

缩略语

AVPU：警觉、言语、疼痛、无反应量表

CART：分类与回归树

CSI：颈椎损伤

ED：急诊科

GCS：格拉斯哥昏迷量表

MVC：机动车碰撞

NPV：阴性预测值

PECARN：儿科急诊应用研究网络

PPV：阳性预测值

（刘亚 译　甄允方 校）

联系人：丁欣 etyxcbzx@suda.edu.cn

参考文献

1. Leonard JC, Browne LR, Ahmad FA, et al. Cervical spine injury risk factors in children with blunt trauma. Pediatrics. 2019;144(1):e20183221. PubMed doi: 10.1542/peds.2018-3221
2. Viccellio P, Simon H, Pressman BD, Shah MN, Mower WR, Hoffman JR; NEXUS Group. A prospective multicenter study of cervical spine injury in children. Pediatrics. 2001;108(2):E20. PubMed doi: 10.1542/peds.108.2.e20
3. Stiell IG, Wells GA, Vandemheen KL, et al. The Canadian C-spine rule for radiography in alert and stable trauma patients. JAMA. 2001;286(15):1841–1848. PubMed doi: 10.1001/jama.286.15.1841
4. Hoffman JR, Mower WR, Wolfson AB, Todd KH, Zucker MI; National Emergency X-Radiography Utilization Study Group. Validity of a set of clinical criteria to rule out injury to the cervical spine in patients with blunt trauma. N Engl J Med. 2000;343(2):94–99. PubMed doi: 10.1056/NEJM200007133430203
5. Michaleff ZA, Maher CG, Verhagen AP, Rebbeck T, Lin CWC. Accuracy of the Canadian C-spine rule and NEXUS to screen for clinically important cervical spine injury in patients following blunt trauma: a systematic review. CMAJ. 2012;184(16):E867–E876. PubMed doi: 10.1503/cmaj.120675
6. Luckhurst CM, Wiberg HM, Brown RL, et al. Pediatric cervical spine injury following blunt trauma in children younger than 3 years: the PEDSPINE II study. JAMA Surg. 2023;158(11):1126–1132. PubMed doi: 10.1001/jamasurg.2023.4213
7. Leonard JC, Harding M, Cook LJ, et al. PECARN prediction rule for cervical spine imaging of children presenting to the emergency department with blunt trauma: a multicentre prospective observational study. Lancet Child Adolesc Health. 2024;8(7):482–490. PubMed doi: 10.1016/S2352-4642(24)00104-4
8. Mohseni S, Talving P, Branco BC, et al. Effect of age on cervical spine injury in pediatric population: a National Trauma Data Bank review. J Pediatr Surg. 2011;46(9):1771–1776. PubMed doi: 10.1016/j.jpedsurg.2011.03.007
9. Leonard JR, Jaffe DM, Kuppermann N, Olsen CS, Leonard JC; Pediatric Emergency Care Applied Research Network (PECARN) Cervical Spine Study Group. Cervical spine injury patterns in children. Pediatrics. 2014;133(5):e1179–e1188. PubMed doi: 10.1542/peds.2013-3505
10. Kuppermann N, Holmes JF, Dayan PS, et al; Pediatric Emergency Care Applied Research Network (PECARN). Identification of children at very low risk of clinically-important brain injuries after head trauma: a prospective cohort study. Lancet. 2009;374(9696):1160–1170. PubMed doi: 10.1016/S0140-6736(09)61558-0
11. Leonard JC, Mao J, Jaffe DM. Potential adverse effects of spinal immobilization in children. Prehosp Emerg Care. 2012;16(4):513–518. PubMed doi: 10.3109/10903127.2012.689925
12. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. Lancet. 2012;380(9840):499–505. PubMed doi: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0
13. Leonard JC, Jaffe DM, Olsen CS, Kuppermann N. Age-related differences in factors associated with cervical spine injuries in children. Acad Emerg Med. 2015;22(4):441–446. PubMed doi: 10.1111/acem.12637
14. Leonard JC, Kuppermann N, Olsen C, et al; Pediatric Emergency Care Applied Research Network. Factors associated with

cervical spine injury in children after blunt trauma. Ann Emerg Med. 2011;58(2):145–155. PubMed doi: 10.1016/j.annemergmed.2010.08.038

15. Mallory A, Stammen J, Zhu M. Cervical and thoracic spine injury in pediatric motor vehicle crash passengers. Traffic Inj Prev. 2019;20(1):84–92. PubMed doi: 10.1080/15389588.2018.1529412
16. Borius PY, Gouader I, Bousquet P, Draper L, Roux FE. Cervical spine injuries resulting from diving accidents in swimming pools: outcome of 34 patients. Eur Spine J. 2010;19(4):552–557. PubMed doi: 10.1007/s00586-009-1230-3
17. Cirak B, Ziegfeld S, Knight VM, Chang D, Avellino AM, Paidas CN. Spinal injuries in children. J Pediatr Surg. 2004;39(4):607–612. PubMed doi: 10.1016/j.jpedsurg.2003.12.011
18. Spencer MR, Hedegaard H, Garnett M. Motor vehicle traffic death rates, by sex, age group, and road user type: United States, 1999–2019. NCHS Data Brief. 2021;(400):1–8. PubMed doi: 10.15620/cdc:101759
19. Foucault A, Ancelet S, Dreuil S, et al. Childhood cancer risks estimates following CT scans: an update of the French CT cohort study. Eur Radiol. 2022;32(8):5491–5498. PubMed doi: 10.1007/s00330-022-08602-z
20. McGinn TG, Guyatt GH, Wyer PC, Naylor CD, Stiell IG, Richardson WS; Evidence-Based Medicine Working Group. Users' guides to the medical literature: XXII: how to use articles about clinical decision rules. JAMA. 2000;284(1):79–84. PubMed doi: 10.1001/jama.284.1.79
21. Sheehan B, Nigrovic LE, Dayan PS, et al; Pediatric Emergency Care Applied Research Network (PECARN). Informing the design of clinical decision support services for evaluation of children with minor blunt head trauma in the emergency department: a sociotechnical analysis. J Biomed Inform. 2013;46(5):905–913. PubMed doi: 10.1016/j.jbi.2013.07.005

【英文原件请参阅 *PEDIATRICS 2026;157(6):e2025075341*】