

基于CT检查的漏斗胸诊断指标研究进展

宋宛苒, 李勇刚*, 吴春, 潘征夏

重庆医科大学附属儿童医院胸心外科, 重庆

收稿日期: 2024年2月27日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月28日

摘要

漏斗胸作为最常见的先天性胸廓畸形, 其诊断和评估一直备受关注。而计算机断层扫描CT作为一种高分辨率的医学影像技术, 已成为漏斗胸诊断的重要手段。近年来, 许多研究针对基于CT检查的漏斗胸诊断指标进行了探讨和研究, 这些指标主要包括Haller指数、矫正指数、不对称指数等。本文将对基于CT检查的漏斗胸诊断指标的研究进展进行综述, 旨在为临床诊断和治疗提供更准确可靠的依据。

关键词

漏斗胸, CT检查, 诊断指标, 综述

Research Progress of Diagnostic Indicators of Pectus Excavatum Based on CT Examination

Wanyi Song, Yonggang Li*, Chun Wu, Zhengxia Pan

Department of Cardiothoracic Surgery, Children's Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Feb. 27th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

As the most prevalent congenital thoracic malformation, pectus excavatum has garnered significant attention in terms of diagnosis and evaluation. Computed tomography (CT), as a high-resolution medical imaging technology, has emerged as a crucial tool for diagnosing pectus excavatum. In recent years, numerous studies have explored and investigated CT-based diagnostic indicators for pectus excavatum, primarily encompassing the Haller index, correction index, and asymmetry index, among others. This article provides a comprehensive review of the research progress on

*通讯作者。

CT-based diagnostic indicators for pectus excavatum to offer a more precise and reliable foundation for clinical diagnosis and treatment.

Keywords

Pectus Excavatum, Computed Tomography (CT), Diagnostic Indicators, Review

Copyright © 2024 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

漏斗胸是小儿前胸壁畸形最常见疾病[1]。漏斗胸常单一发病，也常合并其他疾病，患儿多有不同程度的心理影响，畸形严重时可引起心肺功能异常[2]。漏斗胸的病因和发病机制尚不明确，但其发生具有家族聚集性和遗传背景[3]。目前手术是矫正漏斗胸最有效的治疗方式，其中应用最广泛的即 NUSS 手术，手术疗效显著，在 90% 以上的患者中取得了良好至优秀的结果[4] [5]。

胸部 CT 是漏斗胸最常用的检查方法。现有多种指标利用 CT 图像衡量畸形的程度及类别，为治疗方式的选择及预后评价提供参考意义[6]。本文旨在阐述量化漏斗胸缺损指标的创立、测量和临床应用。

2. Haller 指数(Haller Index, HI)

Haller 指数是量化漏斗胸凹陷程度应用最广泛的影像学指标，也是过去几十年来临床诊断的标准。HI 最早由 Haller 等人在 1987 年提出[7]，定义为漏斗胸凹陷最低点所在平面的胸廓最大横径除以胸骨后缘至椎体前缘的前后径的比值，见图 1。HI 主要针对漏斗胸畸形最低点的凹陷程度进行分类。



在漏斗胸凹陷最低点所在平面测量胸廓最大横径(a)、胸骨后缘与椎体前缘的垂直距离(b)，其比值即为 $HI = a/b$ 。

Figure 1. Measurement of Haller index

图 1. Haller 指数的测量

虽然研究显示漏斗胸患者的心肺功能异常发生率较低[8]，但畸形严重的患者出现异常的机会还是相对较高。其中，心功能检查结果异常与 HI 严重程度有关。Olivia Ganescu 及其同事发现 $HI \geq 4.5$ 与出现心脏彩超(ECHO)结果异常有 17% 的相关性[8]。Tiffany J Zens 等人使用心脏磁共振成像(CMR)测试发现，

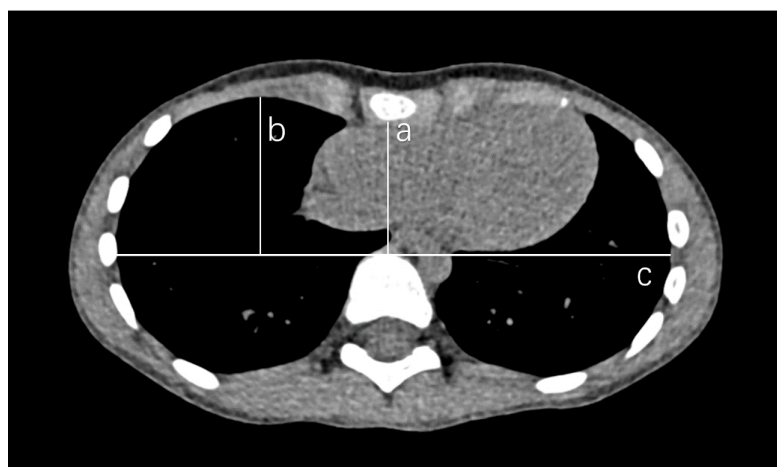
较其他影像学指标, HI 与 RVEF 和 LVEF 存在显著负相关[9]。这一发现与 Tariq Abu-Tair 等人研究结果一致[10]。此外, M Louise Lawson 等人研究提出 HI 的增大与基线肺功能测试(PFTs)低于正常水平的可能性增加相关, 主要表现为限制性模式[11]。

自 Haller 等人在 1987 年提出其需要手术矫正的漏斗胸病人 HI 大于 3.25, 这一数值就成为了漏斗胸中重度的衡量指标, 并成为了手术指征之一[1]。Nuss 团队也认为这一指标可以用来评估有无手术指征, 即其关于手术指征的标准包括: 胸部计算机断层扫描(CT)显示 HI 大于 3.25, 并显示心脏受压或位移[12]。但 2023 年发表的一份国际专家共识报告中认可的手术指针为: 体征明显的漏斗胸畸形, 畸形进展, 异常心功能检查结果以及身体形象障碍。值得注意的是, 关于 HI 和 CI, 尚未达成共识[13]。

目前尚无研究证明 HI 与各种结果变量, 如手术时间、术后感染、住院时间、术后复发, 之间有较高的相关性[14]。HI 虽然是一个衡量严重程度的有用指标, 但它没有考虑到不同形态类型的缺陷。漏斗胸的特征是胸骨和前胸的凹陷, 可以对称或不对称。有各种各样的形态变体, 包括局部的“杯状”凹陷, 宽而浅的“碟状”凹陷, 从锁骨下方到肋缘的沟壑, 以及上胸骨突出和下凹陷的混合型[11]。因此, 具有相同 HI 的个体可能会呈现出不同的功能受损情况。由于 HI 的测量受胸廓形状的影响, 所以宽而平的胸廓使测量数值偏大, 而窄而深的胸廓可降低数值, 这与畸形的实际严重程度无关。Haller 等人认为 HI 大于 3.25 可以区分需要手术治疗和不需要手术的患者, 以及轻度病例和正常儿童[1]。但现有研究提出 HI 在非标准胸廓形态中不能准确地代表漏斗胸的严重程度[15][16]。

3. 矫正指数(Correction Index, CI)

矫正指数由 Shawn D St Peter 等人在 2011 年提出[15], 在椎体前缘画一条水平线, 然后测量两个距离: 胸骨凹陷最低点与椎体间的最小距离, 以及胸廓最前端内缘与椎体间的最大距离, 见图 2。两条线之间的差值即为胸廓缺陷的程度。如果将测量之间的差值除以胸廓最大内径(即测量的较长距离), 并乘以 100, 就可以得到漏斗胸缺失的胸廓深度百分比, 根据定义, 这就是漏斗胸。相反地, 它表示需要通过植入钢板来纠正的胸廓深度百分比, 即校正指数。作为 HI 的演变, CI 的开发旨在提供一种可靠的工具, 精准量化漏斗胸畸形的严重程度。CI 不受胸廓宽度的影响, 可以精确评估胸骨凹陷导致的胸廓深度损失的百分比。



在漏斗胸凹陷最低点所在平面, 椎体前缘画一条水平线(c), 测量: 胸骨凹陷最低点与椎体间的最小垂直距离(a), 以及胸廓最前端内缘与椎体间的最大垂直距离(b), $CI = (b - a)/b \times 100\%$ 。

Figure 2. Measurement of correction index

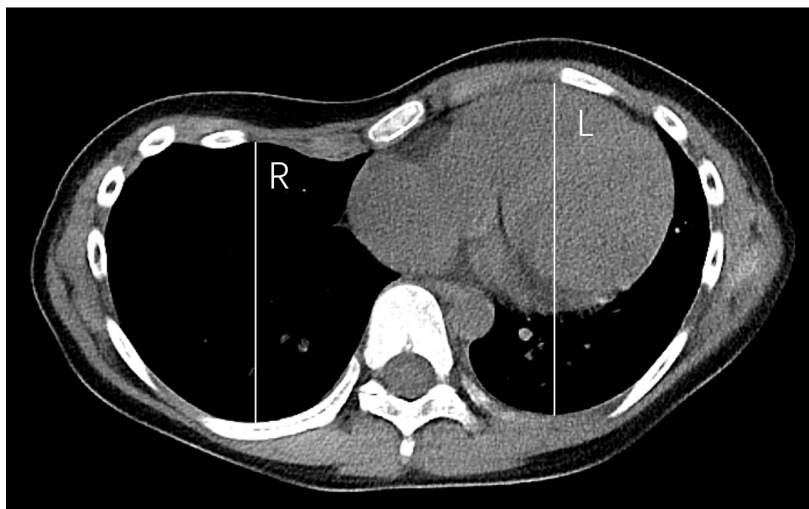
图 2. 矫正指数的测量

Olivia Ganescu 等人研究发现在畸形程度超过指数均值一个标准偏差的患者中,肺功能测试(PFT)和超声心动图(ECHO)结果异常的概率增加,这对应于 $HI > 4.8$ 和 $CI > 42\%$ 。CI 每增加一个标准差,异常 PFT 和 ECHO 的比率分别增加 2.2 倍和 2.0 倍。CI 严重程度与 PFT 结果异常相关,而 HI 与 PFT 结果异常不相关[8]。Tiffany J Zens 及其同事发现在漏斗胸畸形评价指标中,CI 与运动耐量下降最为密切相关[9]。

CI 对诊断漏斗胸具有较高的准确性。Shawn D St Peter 等人提出:漏斗胸患者与正常对照组的 HI 数据分布间有 48% 的重叠。然而,CI 却能完美地区分正常人群和患病人群[15]。Patrick M Poston 等人建议使用 CI 对漏斗胸患者进行术前评估,当 CI 为 28% 或更高时需行手术治疗。CI 和 HI 有很强的相关性,CI 为 28% 与长期接受的手术指征($HI > 3.25$)相关。然而与 HI 不同,即使在具有非标准胸廓形态的患者中,CI 仍然能够准确反映胸廓凹陷的严重程度[16]。

4. 不对称指数(Asymmetry Index, AI)

漏斗胸表现多样,可以是对称的,最常涉及下胸骨;也可以是非对称的,其中凹陷位于一侧,大多数发生在右侧,胸骨向同一侧旋转[1]。不对称指数正是描述这一特性的指标,即不对称指数为漏斗胸凹陷最低点所在平面的右侧胸廓最大前后径与左侧胸廓最大前后径的百分比[17],见图 3。但 Sergio B. Sesia 等人认为 AI 的计算为:通过确定左右胸腔的最大前后径,将左侧测量值除以右侧测量值,并将结果减去 1,即 $AI = 1 - L/R$ 。在健康个体中, AI 通常在 -0.05 和 $+0.05$ 之间,高于或低于此范围表示一个半胸腔明显比另一个大。范围“0.05”是根据 5% 的错误概率设定的。AI 大于 0.05 表明右侧胸腔比左侧大,而小于 0.05 则表示左侧胸腔比右侧大。更常见的情况是左侧胸腔较大[18]。



在漏斗胸凹陷最低点所在平面测量:左侧胸腔最大前后径(L),右侧胸腔最大前后径(R), $AI = R/L \times 100\%$ 。

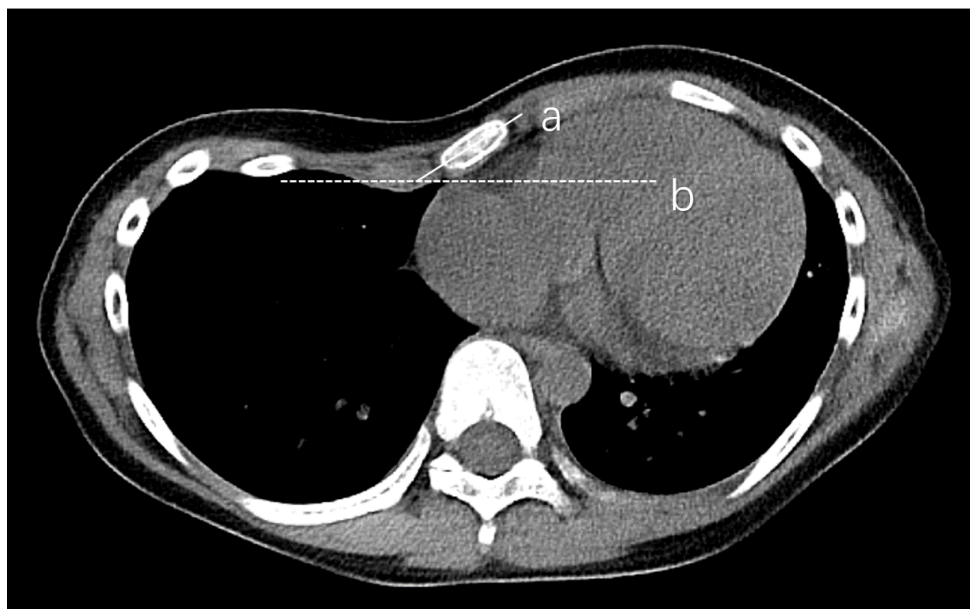
Figure 3. Measurement of asymmetry index

图 3. 不对称指数的测量

M Louise Lawson 等人提出:将 HI 和 AI 结合起来比仅使用 HI 更准确地描述 PE 的不对称程度[19]。Sergio B. Sesia 及其同事也发现了这一点,并表示:在胸骨末端测量的 HI 代表了评估漏斗胸严重程度的最有效标准化参数,而 AI 在胸骨剑突交界处测量最能评估不对称程度。使用这些预定义的 CT 水平可以更准确地描述漏斗胸畸形,同时考虑胸部不对称。这样的标准化测量不仅可以更准确地描述胸骨凹陷,提高不同类型畸形的可比性,还有助于医生在术前进行规划,以在凹陷不对称的情况下实现更对称的结果[18]。

5. 胸骨旋转角度(Sternal Torsion Angle)

在概念上, 胸骨旋转角度是不对称性的一个标志, 即胸骨切面长轴与水平线的夹角[17], 见图 4。胸壁右侧凹陷, 表示胸骨逆时针扭曲, 表示为正。胸骨旋转角度在 -5° 至 $+5^{\circ}$ 之间被视为对称。胸骨扭曲的严重程度以 10° 为界分为轻度、中度和重度。向左的轻度胸骨扭曲(胸骨旋转角度在 -5° 至 -15° 之间)表示为左轻度。向右的轻度胸骨扭曲(胸骨旋转角度在 $+5^{\circ}$ 至 $+15^{\circ}$ 之间)表示为右轻度。右侧中度($+15^{\circ}$ 至 $+25^{\circ}$)和严重不对称(超过 $+25^{\circ}$)表示为右中度和右重度[20]。



在漏斗胸凹陷最低点所在平面测量胸骨切面长轴(a)与水平线(b)的夹角。

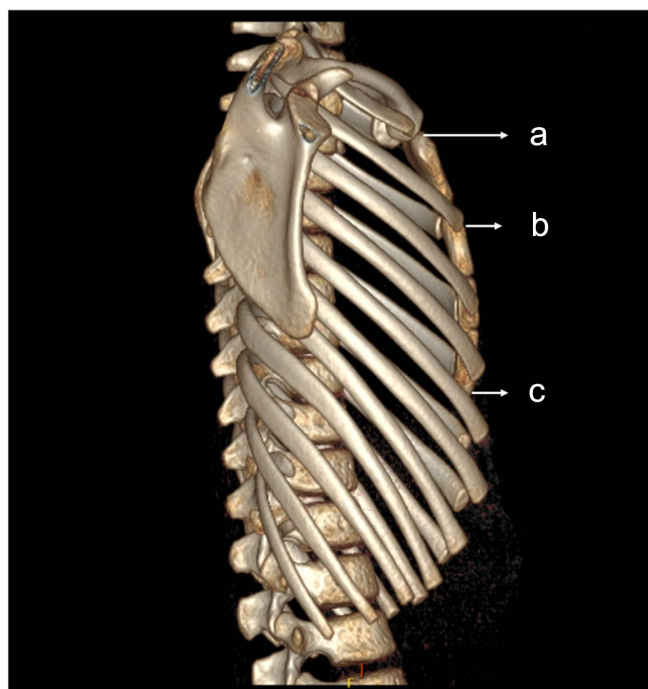
Figure 4. Measurement of sternal torsion angle

图 4. 胸骨旋转角度的测量

数据显示右侧(顺时针)胸骨扭曲比左侧扭曲更频繁, 并且更严重。值得注意的是, 没有胸骨扭曲的患者表现出更良性的表型, 包括胸廓畸形的严重程度以及心脏压迫的存在和程度。此外, 虽然不显著, 但没有胸骨扭曲的患者显示出更高的左心室射血分数, 以及心包积液和异常隔壁运动的较低比率。心脏压迫分类与胸骨扭曲之间存在显著关系, 特别是在右侧扭曲的患者中存在更深的三尖瓣环压迫, 这可能解释了与没有胸骨扭曲的患者相比, 临床症状更重的患者的胸骨扭曲高发率。胸骨扭曲与胸廓畸形指数显著相关, 特别是与 CI 相关。事实上, 与 HI 相比, CI 对于检测显著胸骨扭曲的预测准确性更高[21]。

6. 泰坦尼克指数(Titanic Index, TI)

泰坦尼克指数在 2023 年由 Gastón Bellía-Munzón 等人提出[22], 通过胸骨凹陷部分的百分比重点评估凹陷的长度。使用轴向 CT 图像测量位于前胸线(anterior costal line)后的胸骨凹陷比例, 方程式为 $(C - B)/(C - A) \times 100\%$, 见图 5。其中, A 是胸骨柄的上缘, B 是胸骨开始凹陷的位置, 而 C 是胸骨剑突关节。但儿童胸骨骨性结构需发育较成熟才能得到准确的三维图像以供测量。Gastón Bellía-Munzón 等人使用 ROC 曲线分析发现 TI 是预测多个(>2)支撑板放置的更好指标, TI 大于 66.5%对于需要超过 2 根植入物的要求具有 93%的敏感性和 92%的特异性。此外, 他们还提出 TI 与 HI 之间存在显著相关性($r = 0.29, p = 0.010$), 与 CI 之间的相关性更密切($r = 0.45, p < 0.0001$)。



在胸部 CT 三维重建图像上测量计算 TI 的标志点: a: 胸骨柄上缘, b: 胸骨开始凹陷的位置, c: 胸骨剑突关节, $TI = (c - b) / (c - a) \times 100\%$ 。

Figure 5. Measurement of Titanic index

图 5. 泰坦尼克指数的测量

7. 总结与展望

近年来, 影像学检测手段快速进展, 为漏斗胸的诊断提供了重要的影像学依据。其中, 胸部 X 片影像内容局限, 且在胸壁严重不对称的病例中, X 线检查测得的胸廓指数准确性较低[23]; 光学扫描无法显示胸廓内部情况[24]; 核磁扫描检查时间长, 儿童配合度欠佳。考虑到 CT 检测方便、准确性高、可重复性强, 它不仅能清晰显示胸廓骨骼形态, 还能详细观察凹陷畸形与胸廓内脏器之间的关系以及心脏旋转和位移情况。这为临床诊断和手术治疗提供了重要信息, 并为漏斗胸患者个体化治疗提供了巨大支持。尽管 CT 辐射剂量相对较大, 但仍然是漏斗胸常规检查项目[13]。然而, 未来还需进一步深入研究和验证, 以为漏斗胸的临床管理提供更为科学的指导。

参考文献

- [1] Kelly Jr., R.E. (2008) Pectus Excavatum: Historical Background, Clinical Picture, Preoperative Evaluation and Criteria for Operation. *Seminars in Pediatric Surgery*, **17**, 181-193. <https://doi.org/10.1053/j.sempedsurg.2008.03.002>
- [2] Colombani, P.M. (2009) Preoperative Assessment of Chest Wall Deformities. *Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **21**, 58-63. <https://doi.org/10.1053/j.semtcv.2009.04.003>
- [3] David, V.L. (2022) Current Concepts in the Etiology and Pathogenesis of Pectus Excavatum in Humans—A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, 1241. <https://doi.org/10.3390/jcm11051241>
- [4] Nuss, D., Obermeyer, R.J. and Kelly, R.E. (2016) Nuss Bar Procedure: Past, Present and Future. *Annals of Cardiothoracic Surgery*, **5**, 422-433. <https://doi.org/10.21037/acs.2016.08.05>
- [5] 陶绍霖, 康珀铭, 冯涌耕, 等. 胸腔镜辅助改良 Nuss 手术治疗儿童漏斗胸临床疗效的单中心回顾性分析[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2023, 30(6): 867-872.
- [6] Sujka, J.A. and St. Peter, S.D. (2018) Quantification of Pectus Excavatum: Anatomic Indices. *Seminars in Pediatric Surgery*, **27**, 122-126. <https://doi.org/10.1053/j.sempedsurg.2018.05.006>

- [7] Haller Jr., J.A., Kramer, S.S. and Lietman, S.A. (1987) Use of CT Scans in Selection of Patients for Pectus Excavatum Surgery: A Preliminary Report. *Journal of Pediatric Surgery*, **22**, 904-906. [https://doi.org/10.1016/S0022-3468\(87\)80585-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3468(87)80585-7)
- [8] Ganescu, O., LaRusso, K., St-Louis, E., Saint-Martin, C., Cavalle-Garrido, T., Zielinski, D., *et al.* (2022) The Utility of Echocardiography and Pulmonary Function Testing in the Preoperative Evaluation of Pectus Excavatum. *Journal of Pediatric Surgery*, **57**, 1561-1566. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2021.12.010>
- [9] Zens, T.J., Casar Berazaluze, A.M., Jenkins, T.M., Hardie, W., Alsaied, T., Tretter, J.T., *et al.* (2022) The Severity of Pectus Excavatum Defect Is Associated with Impaired Cardiopulmonary Function. *The Annals of Thoracic Surgery*, **114**, 1015-1021. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2021.07.051>
- [10] Abu-Tair, T., Turial, S., Hess, M., Wiethoff, C.M., Staatz, G., Lollert, A., *et al.* (2018) Impact of Pectus Excavatum on Cardiopulmonary Function. *The Annals of Thoracic Surgery*, **105**, 455-460. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2017.09.037>
- [11] Lawson, M.L., Mellins, R.B., Paulson, J.F., Shamberger, R.C., Oldham, K., Azizkhan, R.G., *et al.* (2011) Increasing Severity of Pectus Excavatum Is Associated with Reduced Pulmonary Function. *The Journal of Pediatrics*, **159**, 256-261.E2. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2011.01.065>
- [12] Nuss, D., Obermeyer, R.J., Kelly Jr., R.E. (2016) Pectus Excavatum from a Pediatric Surgeon's Perspective. *Annals of Cardiothoracic Surgery*, **5**, 493-500. <https://doi.org/10.21037/acs.2016.06.04>
- [13] Janssen, N., Daemen, J.H.T., Van Polen, E.J., Coorens, N.A., Jansen, Y.J.L., Franssen, A., *et al.* (2023) Pectus Excavatum: Consensus and Controversies in Clinical Practice. *The Annals of Thoracic Surgery*, **116**, 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2023.02.059>
- [14] Mortellaro, V.E., Iqbal, C.W., Fike, F.B., Sharp, S.W., Ostlie, D.J., Snyder, C.L., *et al.* (2011) The Predictive Value of Haller Index in Patients Undergoing Pectus Bar Repair for Pectus Excavatum. *The Journal of Surgical Research*, **170**, 104-106. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.02.014>
- [15] St. Peter, S.D., Juang, D., Garey, C.L., Laituri, C.A., Ostlie, D.J., Sharp, R.J., *et al.* (2011) A Novel Measure for Pectus Excavatum: The Correction Index. *Journal of Pediatric Surgery*, **46**, 2270-2273. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2011.09.009>
- [16] Poston, P.M., Patel, S.S., Rajput, M., Rossi, N.O., Ghanamah, M.S., Davis, J.E., *et al.* (2014) The Correction Index: Setting The Standard for Recommending Operative Repair of Pectus Excavatum. *The Annals of Thoracic Surgery*, **97**, 1176-1179. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2013.12.050>
- [17] Cartoski, M.J., Nuss, D., Goretsky, M.J., Proud, V.K., Croitoru, D.P., Gustin, T., *et al.* (2006) Classification of the Dysmorphology of Pectus Excavatum. *Journal of Pediatric Surgery*, **41**, 1573-1581. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2006.05.055>
- [18] Sesia, S.B., Heitzelmann, M., Schaedelin, S., Magerkurth, O., Kocher, G.J., Schmid, R.A., *et al.* (2019) Standardized Haller and Asymmetry Index Combined for a More Accurate Assessment of Pectus Excavatum. *The Annals of Thoracic Surgery*, **107**, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2018.07.086>
- [19] Lawson, M.L., Barnes-Eley, M., Burke, B.L., Mitchell, K., Katz, M.E., Dory, C.L., *et al.* (2006) Reliability of a Standardized Protocol to Calculate Cross-Sectional Chest Area and Severity Indices to Evaluate Pectus Excavatum. *Journal of Pediatric Surgery*, **41**, 1219-1225. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2006.03.003>
- [20] Yoshida, A., Uemura, S., Yamamoto, M., Nouse, H., Kuyama, H. and Muta, Y. (2013) Correlation of Asymmetric Chest Wall Deformity and Growth in Patients with Pectus Excavatum. *Journal of Pediatric Surgery*, **48**, 771-775. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2012.11.036>
- [21] Capunay, C., Martinez-Ferro, M., Carrascosa, P., Bellia-Munzon, G., Deviggiano, A., Nazar, M., *et al.* (2020) Sternal Torsion in Pectus Excavatum Is Related to Cardiac Compression and Chest Malformation Indexes. *Journal of Pediatric Surgery*, **55**, 619-624. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2019.05.008>
- [22] Bellía-Munzón, G., Sanjurjo, D., Toselli, L., Vallee, M., Elmo, G. and Martínez-Ferro, M. (2023) Novel Index to Estimate the Cephalocaudal Extent of the Excavation in Pectus Excavatum: The Titanic Index. *Journal of Pediatric Surgery*, **58**, 605-607. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2022.12.010>
- [23] McHugh, M.A., Poston, P.M., Rossi, N.O. and Turek, J.W. (2016) Assessment of Potential Confounders When Imaging Pectus Excavatum with Chest Radiography Alone. *Journal of Pediatric Surgery*, **51**, 1485-1489. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2016.02.041>
- [24] Taylor, J.S., Madhavan, S., Szafer, D., Pei, A., Koppolu, R., Barnaby, K., *et al.* (2019) Three-Dimensional Optical Imaging for Pectus Excavatum Assessment. *The Annals of Thoracic Surgery*, **108**, 1065-1071. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2019.04.074>