

100kVp 管电压不同重建算法对 AI 辅助检测肺结节效能影响

曹源, 李丹阳, 张杨, 高道福, 顾俊, 张清

【摘要】 目的:比较管电压 100kVp 下使用 FBP(滤波反投影法)及不同等级迭代重建算法胸部 CT 图像在 AI 肺结节中检测效能并寻找较优重建算法。**方法:**使用西门子双源(Definition FLASH)CT 搜集 189 例门诊肺结节筛查患者行双能量扫描,管电压 100 kVp,分别采用 FBP 及 SAFIRE1、3、5 级重建算法重建图像得出 1 mm 肺部图像,测量各组图像平均信噪比(SNR)与对比噪声比(CNR);同时将薄层图像导入 AI 辅助诊断软件(北京推想公司)行结节自动检测,将检测结果与金标准进行比较得出不同算法结节检测敏感度、准确度、假阳性率,分别对全部结节及实性、亚实性、 ≥ 4 mm、 < 4 mm 结节不同算法敏感度、准确度、假阳性率行统计学分析, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。**结果:**100kVp 下 FBP、SAFIRE1、SAFIRE3、SAFIRE5 重建图像 CNR 和 SNR 随着迭代等级增加逐渐提升,差异具有统计学意义($P < 0.05$),AI 自动检测全部肺结节各种重建算法敏感度分别为 73.5%、70.9%、73.7%、73.3%,差异无统计学意义($P > 0.05$),假阳性率分别为 1.36/CT、1.49/CT、2.31/CT、4.87/CT,FBP 算法结节自动检测假阳性率最低,差异具有统计学意义($P < 0.05$),准确度分别为 72.2%、69.4%、61.7%、43.1%,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。**结论:**管电压 100kVp 下不同重建算法 AI 检测全部肺结节、实性结节、亚实性结节 ≥ 4 mm 和 < 4 mm 结节敏感度均无显著差别,但 FBP 假阳性率最低,因此检测效能最优。

【关键词】 人工智能; 图像处理, 计算机辅助; 低剂量; 肺结节; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】 R-05; R734.2; R814.3; R814.4 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2020)10-1324-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.10.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of iterative reconstruction algorithm on deep learning-based pulmonary nodule detection in 100kVp CT scans CAO Yuan, LI Dan-yang, ZHANG Yang, et al. Department of Radiology, Affiliated Zhongshan Hospital Dalian University, Dalian 116001, China

【Abstract】 Objective: To investigate the influence of iterative reconstruction algorithm on deep learning (DL)-based artificial intelligence diagnostic system in detecting pulmonary nodules on 100kVp CT scans. **Methods:** CT images of 189 patients for lung nodule screening were acquired using a dual-source scanner (SOMATOM Definition Flash, Siemens Healthineers) at 100kVp. Images were reconstructed with filtered back projection (FBP) algorithm and sinogram affirmed iterative reconstruction (SAFIRE) algorithm with varying weights of 1, 3, and 5. The signal to noise ratio (SNR) and contrast to noise ratio (CNR) of reconstructed images were measured. The DL-based AI diagnostic system (InferRead CT Lung Research, Infervision, Beijing) was employed to detect nodules from reconstructed images. The detection results were compared with the gold standard, and the sensitivity and accuracy and false positive rate of nodule detection with different algorithms were obtained. False positive rate was statistically analyzed, $P < 0.05$ was considered statistically significant. **Results:** At 100kVp, the CNR and SNR of FBP, SAFIRE1, SAFIRE3, SAFIRE5 reconstructed images gradually increase with the increase of iteration level, while the difference is statistically significant ($P < 0.05$). The sensitivity of AI automatic detection with various reconstruction algorithms was 73.5%, 70.9%, 73.7%, 73.3%, respectively, with the difference insignificant ($P > 0.05$). The false positive rates were 1.36/CT, 1.49/

作者单位: 116001 辽宁, 大连大学附属中山医院医学影像科(曹源, 李丹阳, 张杨, 高道福, 张清); 北京推想科技(顾俊)

作者简介: 曹源(1985—), 男, 辽宁大连人, 主管技师, 主要从事 CT 影像技术工作。

通讯作者: 张清, E-mail: zhangqingsmile@163.com

基金项目: 大连市科技计划项目(2015E12SF120)

CT, 2.31/CT, 4.87/CT, respectively, with the difference statistically significant ($P < 0.05$) and the lowest false positive rate under FBP algorithm. The accuracy is 72.2%, 69.4%, 61.7%, 43.1%, respectively, with the difference statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusion:** There is no significant difference in the sensitivity of AI detection of all pulmonary nodules, solid nodules, subsolid nodules, ≥ 4 mm and < 4 mm nodules under different reconstruction algorithms at a tube voltage of 100 kVp. However, the lowest false positive rate was achieved with FBP, indicating is the best detection efficiency.

【Key words】 Artificial intelligence; Image processing, computer-assisted; Low-dose; Pulmonary nodules; Tomography, X-ray computed

目前低剂量 CT 作为胸部肺结节筛查已成为临床首选检查^[1,2], 常规胸部 CT 降低剂量主要以降低管电流和降低管电压两种方法, 单纯降低管电流会增加胸部两边图像质量不足^[3]; 管电压降低较管电流降低更能有效降低辐射剂量, 但过度降低管电压会造成密度分辨率下降^[4], 研究表明 100 kVp 应用迭代重建算法不但可明显降低辐射剂量还能保证图像质量以满足胸部影像诊断^[5]。

随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术不断取得新突破, 深度学习与大数据等前沿技术在医疗领域广泛应用^[6], AI 医学影像作为医疗辅助诊断系统不仅准确率高而且大大提高医生工作效率, 受到越来越多影像医生青睐^[7], 但目前 AI 应用多采用常规管电压 120 kVp FBP 图像, 对低管电压不同重建算法图像应用甚少。本文针对管电压 100 kVp 条件下不同重建算法对 AI 辅助检测肺结节效能影响做了相关研究。

材料与方法

1. 一般资料

搜集 2019 年 1 月 14 日—2 月 14 日行胸部双能量 CT 检查患者 189 例, 男 93 例, 女 96 例; 年龄 22~68 岁, 平均 (48.1 ± 11.8) 岁; BMI 指数 $18.1 \sim 33.9 \text{ kg/m}^2$, 平均 $(24.9 \pm 3.4) \text{ kg/m}^2$ 。排除标准: 因金属伪影、呼吸伪影等导致 CT 图像质量不佳者; 患者存在肺炎、肺不张、胸腔积液等影响病灶确认及标注者。

2. 图像采集与重建

所有患者均行西门子双源 (Definition FLASH) CT 双能量胸部扫描, 采用双能量管电压组合 (两个球管电压分别为 Sn140 kVp、100 kVp), 采用自动管电流调节技术 Care Dose 4D, 重建层厚 1.0 mm, 将 100 kVp 数据分别采用 FBP 及 SAFIRE1、3、5 等级迭代重建算法行图像重建, 每例患者 4 组图像, 分别为 FBP、SAFIRE1、SAFIRE3、SAFIRE5。选用 AI 辅助软件 (InferRead CT Lung Research, Infervision, Beijing, China) 行肺结节自动检测。该系统以 40 万训练数据为根基, 数据库数据来源于全国多家大型三甲医院, 是

一款已被广泛运用于协助肺结节检测深度学习软件。

3. 金标准制定

由两位主治以上职称放射科医生双盲对双能 CT 融合 120 kVp 图像结合 AI 显示结果行肺结节标注, 报告结节数量、位置、大小及密度, 最后再由 1 名副主任医生进行确认并建立金标准。

4. 客观图像质量测量

选取气管分叉轴面层面降主动脉和同侧竖脊肌分别放置面积 60 mm^2 ROI, 记录平均 CT 值及其标准差 (SD), 采用公式计算各重建算法组平均 SNR 与 CNR^[8]:

$$\text{SNR} = \frac{\text{CT}_{\text{降主动脉}}}{\text{SD}_{\text{降主动脉}}}$$

$$\text{CNR} = \frac{\text{CT}_{\text{降主动脉}} - \text{CT}_{\text{左侧竖脊肌}}}{\text{SD}_{\text{降主动脉}}}$$

5. 统计分析

采用 SPSS 20.0 软件进行分析 4 组不同算法敏感度、准确度、假阳性率、SNR 和 CNR 比较采用单因素方差分析, 两两之间采用多重比较。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

金标准共检测出 1016 个肺结节, 其中 $< 4 \text{ mm}$ 结节 778 个, $\geq 4 \text{ mm}$ 结节 238 个, 实性结节 801 个, 亚实性结节 215 个。AI 肺结节自动检测系统对 FBP、SAFIRE1、SAFIRE3 和 SAFIRE5 共 4 组图像检测真阳性结节数无明显差别, 统计分析结果表明 4 组算法检测灵敏度差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 4 组算法检测结节假阳性率差异具有统计学意义 ($P < 0.05$), 其中 FBP 图像假阳性率低于其它算法 (表 1、图 1)。同时 4 组重建算法图像各部位 CT 值均无明显变化, 噪声值随迭代等级提升而降低, SNR 和 CNR 随着迭代等级提升呈上升趋势且两两之间差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

4 组重建算法对检测实性结节和亚实性结节敏感度无统计学差异, 但两两比较亚实性结节 FBP 和 SAFIR5 具有统计学差异, 各组算法准确度具有统计学意义 ($P < 0.05$), 随着迭代等级提升而降低 (表 2)。

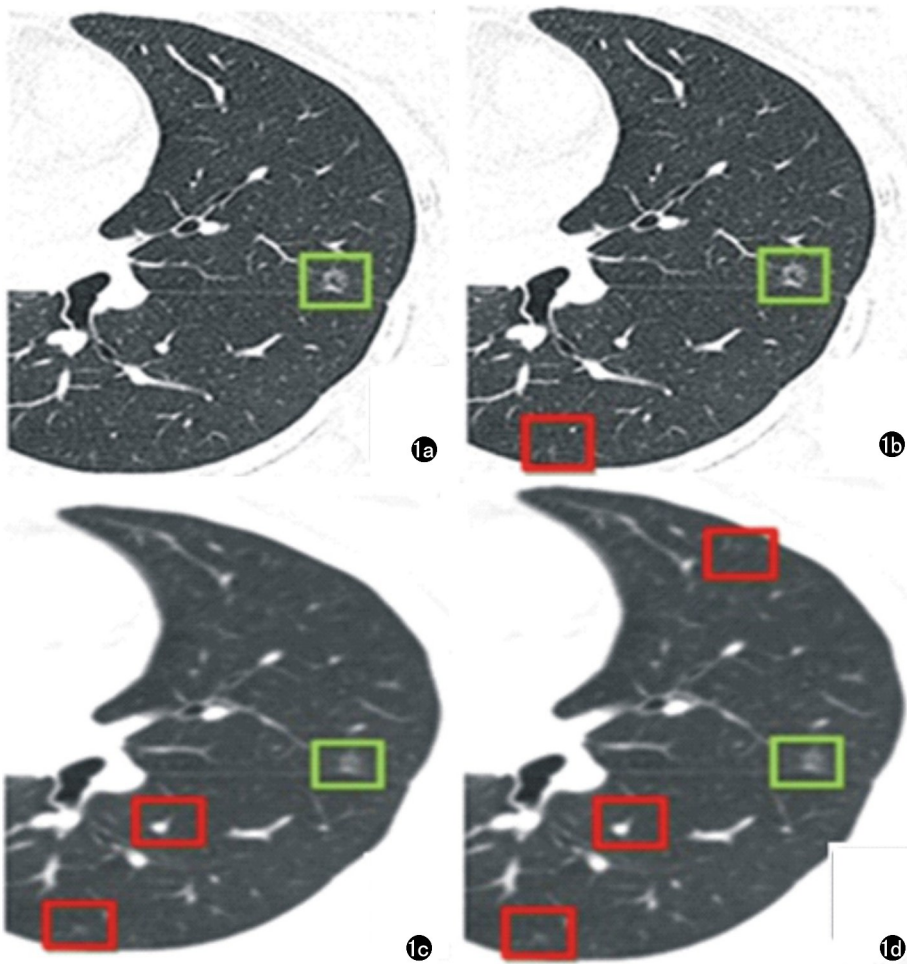


图 1 女,53 岁,经金标准标注左肺下叶示 1 个磨玻璃结节。a、b、c、d 分别代表 FBP、SAFIRE1、SAFIRE3、SAFIRE5 肺结节检测图像,其中 FBP 准确显示真阳性结节且无假阳性结节,其他各组不但检测出真阳性结节且随着迭代等级提升假阳性结节逐渐增加。绿框:AI 检测出真阳性结节;红框:AI 检测出假阳性结节。

4 组重建算法对 AI 检测长径 ≥ 4 mm 结节敏感度和准确度均无统计学差异,对于长径 < 4 mm 敏感度无统计学差异,但准确度具有统计学意义($P < 0.05$),且准确度随着迭代等级提升而降低(表 3)。

讨 论

CT 作为肺癌常用诊断方法广泛应用临床,而常规 CT 检查由于辐射剂量大,普遍筛查一直受到限制。国家肺癌筛查试验(NLST)表明高危人群筛查随着低剂量 CT 适用肺癌死亡率大大减少,相比于 120 kVp,管电压 100 kVp 辐射剂量平均约降低 50%^[9],因此 100 kVp 属于目前低电压低辐射主流市场,而在管电压下降辐射剂量降低同时图像噪声也会随之增加,使得难以检测和区分肺结节^[10-11]。西门子最新迭代重建算法(sinogram affirmed iterative reconstruction, Safire)不仅进一步提高图像域迭代对噪声去除性能且引入基于原始数据迭代伪影去除技术解决了原始滤波反投影中因剂量降低产生噪声问题而且重建速度大大提高。

本研究显示随着迭代等级提升图像 CT 值无明显变化,图像噪声有显著下降,因此图像 SNR 和 CNR 都有明显提高。研究^[12-14]证实纯磨玻璃肺结节与间质性病变检出率随噪声降低而显著提高,因此本研究中亚实性结节敏感度随着迭代等级增加有所升高,除此之外无论在长径 ≥ 4 mm、 < 4 mm 结节还是实性结节均对 AI 检测肺结节敏感度无明显增加,反而除 ≥ 4 mm 结节外假阳性率都逐渐增高,分析原因研究表明图像噪声对深度学习软件检测部分肺结节并没有影响^[15],而迭代算法是对投影数据以 FBP 算法进行重建,将获

表 1 四组重建算法图像 AI 检测结节数、敏感度、假阳性率、准确度、SNR、CNR

参数	FBP	SAFIRE1	SAFIRE3	SAFIRE5	F	P
真阳性结节数	738	711	751	745	—	—
假阳性结节数	266	291	454	953	—	—
真阴性结节数	278	305	265	271	—	—
敏感度(%)	73.5 $\pm$ 26.2	70.9 $\pm$ 27.2	73.7 $\pm$ 25.6	73.3 $\pm$ 25.4	0.49	0.69
假阳性率/CT	1.36 $\pm$ 1.29	1.49 $\pm$ 1.36 ^{cd}	2.31 $\pm$ 1.81 ^{abd}	4.87 $\pm$ 2.84 ^{abc}	135.11	< 0.05
准确度(%)	72.2 $\pm$ 25.0	69.4 $\pm$ 26.1 ^{cd}	61.7 $\pm$ 24.7 ^{abd}	43.1 $\pm$ 20.2 ^{abc}	55.87	< 0.05
降主动脉 CT 值(HU)	49.23 $\pm$ 7.17	49.04 $\pm$ 6.72	48.78 $\pm$ 5.97	48.56 $\pm$ 5.50		
降主动脉 SD 值(HU)	169.77 $\pm$ 25.33	144.87 $\pm$ 21.90	95.28 $\pm$ 14.90	46.39 $\pm$ 8.41		
SNR	0.29 $\pm$ 0.05	0.34 $\pm$ 0.06 ^{acd}	0.52 $\pm$ 0.09 ^{abd}	1.08 $\pm$ 0.21 ^{abc}	1587.86	< 0.05
CNR	0.08 $\pm$ 0.02	0.09 $\pm$ 0.07 ^{cd}	0.13 $\pm$ 0.10 ^{abd}	0.25 $\pm$ 0.19 ^{abc}	85.40	< 0.05

注:^a表示与 FBP 比较差异有统计学意义;^b表示与 SAFIRE1 比较差异有统计学意义;^c表示与 SAFIRE3 比较差异有统计学意义;^d表示与 SAFIRE5 比较差异有统计学意义

表 2 四组重建算法对不同密度肺结节的敏感度和准确度

参数	FBP	SAFIRE1	SAFIRE3	SAFIRE5	F	P
实性结节						
敏感度(%)	75.4±26.8	69.7±30.5	72.3±29.0	71.9±28.2	1.24	0.30
准确度(%)	79.0±24.4	77.4±27.5	74.9±27.3	57.8±25.4 ^{abc}	24.79	<0.05
亚实性结节						
敏感度(%)	69.1±40.8	74.6±38.5	78.6±36.8	79.7±35.2 ^a	1.85	0.14
准确度(%)	59.3±40.5	57.3±38.5 ^{cd}	44.6±34.5 ^{abd}	48.4±27.1 ^{abc}	14.45	<0.05

注:^a表示与 FBP 比较差异有统计学意义;^b表示与 SAFIRE1 比较差异有统计学意义;^c表示与 SAFIRE3 比较差异有统计学意义;^d表示与 SAFIRE5 比较差异有统计学意义

表 3 四组重建算法对不同大小肺结节的敏感度和准确度

参数	FBP	SAFIRE1	SAFIRE3	SAFIRE5	F	P
≥4mm						
敏感度(%)	93.0±23.8	93.6±24.0	99.4±80.2	99.0±77.2	0.41	0.74
准确度(%)	65.4±34.5	63.4±34.5	58.1±33.9	58.5±35.0	1.40	0.24
<4mm						
敏感度(%)	68.8±29.6	64.7±31.2	68.2±29.6	67.2±30.5	0.67	0.57
准确度(%)	80.0±25.4	78.1±27.0 ^{cd}	67.7±26.7 ^{abd}	42.7±29.4 ^{abc}	79.28	<0.05

注:^a表示与 FBP 比较差异有统计学意义;^b表示与 SAFIRE1 比较差异有统计学意义;^c表示与 SAFIRE3 比较差异有统计学意义;^d表示与 SAFIRE5 比较差异有统计学意义

得图像数据与基于统计光子和电子噪声理想噪声模型进行比较,去除噪声得到校正图像,对此校正图像再通过正投影更新原始投影数据用于下次迭代计算,如此进行多次迭代重建图像,但随着迭代次数增加(等级提升)图像过度细腻造成失真^[16-17]也是造成假阳性率升高原因,对于长径≥4 mm 结节检测准确度无明显差别,原因可能 AI 对于大结节模型训练程度相对精确,所以准确度无明显差别。

本研究使用是推想科技 AI 诊断辅助软件,它是多数基于 FBP 算法胸部 CT 图像训练出来模型^[18],对于 FBP 算法胸部图像 AI 检测肺结节阳性率尚可,但对于在迭代算法图像上可能缺乏经验,也是造成假阳性率依旧偏高原因之一。

随着辐射剂量逐渐被人们所重视,越来越多人选择了低剂量胸部 CT 来筛查肺结节。本文之所以采用双源 CT100kVp 图像就是避免多次扫描给患者带来伤害,同一组患者既得到了 120kVp 图像又得到了 100kVp 图像且有相关报道显示^[19]双源 CT100kVp 图像约等同于单源 CT100kVp 图像,也可以证实在双源 CT100kVp 下相关研究可行性。本文显示在 100kVp 下各种重建技术 AI 检测肺结节敏感度均在 70%左右,这与 Giovanni 等^[20]研究显示 AI 检测肺结节敏感度高达 92.20%相差较大,究其原因是目前多数报道 AI 检测肺结节都是 120kVp 下进行的,我们金标准也是基于 120kVp 图像所做出的,因此我们应该继续加大深度学习训练模型多元化以满足不同条件下检测效能考证。

综上所述,低剂量(100kVp)条件下为保证诊断准确率,除亚实性结节外人工智能检测肺结节 CT 重建

算法应首选 FBP。

参考文献:

[1] Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure[J]. N Engl J Med, 2007, 357: 2277-2384.

[2] Aberle DR, Adams AM, Berg CD, et al. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening[J]. N Engl J Med, 2011, 365: 395-409.

[3] 马琼英, 余世勇, 余伟, 等. 胸部智能毫安低剂量 CT 扫描的应用价值[J]. 中华肺部疾病杂志, 2017, 10(6): 728-729.

[4] 马磊, 姜兴岳. 双源 CT Flash 模式联合低电压扫描及迭代重建技术在胸部扫描的应用[J]. 山东医学高等专科学校学报, 2018, 40(1): 45-48.

[5] 王杰, 曾勇明, 彭刚, 等. SAFIRE 重建算法对胸部 CT 图像质量和辐射剂量的影响[J]. 中国医学影像技术, 2013, 29(11): 1896-1900.

[6] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436.

[7] 周舒畅, 王玉钵, 胡球洁, 等. 2017 年 RSNA 胸部影像学[J]. 放射学实践, 2018, 33(3): 229-237.

[8] Russi EW, Bloch KE, Weder W. Lung volume reduction surgery; what can we learn from the National Emphysema Treatment Trial[J]. Eur Respir J, 2003, 22(4): 571-573.

[9] 贾楠, 王新江, 惠萍, 等. 适应性统计迭代重建技术降低胸部 CT 扫描剂量的初步临床研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2010, 18(6): 551-553.

[10] Gould MK, Donington J, Lynch WR, et al. Evaluation of individuals with pulmonary nodules: when is it lung cancer? [J] Chest, 2013, 143: e93s-e120s.

[11] 薛涛. 探讨多层螺旋 CT 低剂量胸部扫描在肺结节病诊断中的应用效果[J]. 继续医学教育, 2016, 30(2): 152-153.

[12] Hong SG, Kang EJ, Park JH, et al. Effect of hybrid kernel and iterative reconstruction on objective and subjective analysis of lung nodule calcification in low-dose chest CT[J]. Korean J Radiol, 2018, 19(5): 888-896.

- [13] Wang S, Wang R, Zhang S, et al. 3D convolutional neural network for differentiating pre-invasive lesions from invasive adenocarcinomas appearing as ground-glass nodules with diameters $< 3\text{cm}$ using HRCT[J]. Quant Imaging Med Surg, 2018, 8(5): 491-499.
- [14] 朱熹, 夏巍, 周中柱, 等. 低剂量 CT 不同重建技术对计算机辅助诊断肺结节的影响[J]. 放射学实践, 2019, 34(11): 1255-1259.
- [15] Norio H, Tomoko M, Yusuke S, et al. Evaluating medical images using deep convolutional neural networks: A simulated CT phantom image study[J]. Technol Health Care, 2019, 28(911): 1-8.
- [16] Yang WJ, Yan FH, Liu B, et al. Can sinogram-affirmed iterative (SAFIRE) reconstruction improve imaging quality on lowdose lung CT screening compared with traditional filtered back projection (FBP) reconstruction[J]? J Comput Assist Tomogr, 2013, 37(2): 301-305.
- [17] Schulz B, Beeres M, Bodelle B, et al. Performance of iterative image reconstruction in CT of the paranasal sinuses: A phantom study[J]. AJNR, 2013, 34(5): 1072-1076.
- [18] Kai Liu, Qiong Li, Jiechao Ma. Evaluating a fully automated pulmonary nodule detection approach and its impact on radiologist performance[J]. Radiology: Artificial Intelligence, 2019, 1(3): e180084.
- [19] 郑玲, 顾海峰, 杨刚, 等. 双源 CT 成像技术及其临床应用的新进展[J]. 医学研究生学报, 2008, 21(4): 404-407, 411.
- [20] da Silva GLF, Valente TLA, Silva AC, et al. Convolutional neural network-based PSO for lung nodule false positive reduction on CT images[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2018, 162: 109-118.

(收稿日期: 2019-11-21 修回日期: 2020-05-13)

欢迎订阅 2021 年《放射学实践》

《放射学实践》是由国家教育部主管, 华中科技大学同济医学院主办, 与德国合办的全国性影像学学术期刊, 创刊至今已 36 周年。遵照同行评议、价值导向、等效应用原则, 国内各大学、协会、组织机构通过科技工作者推荐、专家评议、结果公示等规定程序, 《放射学实践》杂志入选中国科协发布 10 大领域《我国高质量科技期刊分级目录》业内认可的较高水平期刊。2018 年 8 月, 《放射学实践》杂志再次入选北京大学和北京高校图书馆期刊工作研究会共同主持的国家社会科学基金项目“学术期刊评价及文献计量学研究”研究成果——《中国核心期刊要目总览》。这是继 1999 年之后的第 5 次入选临床医学/特种医学类核心期刊。

本刊坚持服务广大医学影像医务人员的办刊方向, 关注国内外影像医学的新进展、新动态, 全面介绍 X 线、CT、磁共振、介入放射及放射治疗、超声诊断、核医学、影像技术学等医学影像方面的新知识、新成果, 受到广大影像医师的普遍喜爱。

本刊为国家科技部中国科技论文核心期刊、中国科学引文数据库统计源期刊, 在首届《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》执行评优活动中, 被评为《CAJ—CD 规范》执行优秀期刊。

主要栏目: 论著、继续教育园地、专家荐稿、研究生展版、图文讲座、本刊特稿、实验研究、传染病影像学、影像技术学、外刊摘要、学术动态、请您诊断、病例报道、知名产品介绍、信息窗等。

本刊为月刊, 每册 25 元, 全年定价 300 元。

国内统一刊号: ISSN 1000-0313/CN 42-1208/R 邮政代号: 38-122

电话: (027) 69378385

E-mail: fsxsjzz@163.com 网址: <http://www.fsxsj.net>

编辑部地址: 430199 武汉市蔡甸区中法新城同济医院专家社区别墅 C 栋