

# 脑组织净摄水率在急性缺血性卒中研究中的进展

张露, 李长清\*

重庆医科大学附属第二医院神经内科, 重庆

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

## 摘要

急性缺血性卒中(AIS)是全球第三大死因, 且呈现出年轻化的趋势。临床上, Alberta卒中项目早期CT评分(ASPECTS)被广泛应用于卒中严重程度的评估, 但其运用中存在主观性较强、早期敏感性不足等局限性。近年来, 基于CT密度测定的脑组织净水摄取率(NWU)逐渐被人们提及, 并为临床提供了新的视角。作为一种新型定量影像学生物标志物, NWU通过量化缺血区域与对侧正常脑组织的密度差异, 可以客观反映脑组织的水肿程度, 从而进一步反应缺血区域侧支循环状态、预测恶性脑水肿(MCE)的发生、预测卒中后的治疗效果等。此外, 随着自动化计算方法的进步, NWU测量已从手动计算发展为基于人工智能的自动处理, 大大提高了其在临床环境中的实用性。本文旨在系统性讲述NWU的基本原理和测量方法、总结其在急性缺血性卒中的临床应用场景, 以期为临床实践提供更精准、高效的影像学决策支持。

## 关键词

净摄水率, 脑水肿, 缺血性脑卒中

# Research Progress of Net Water Uptake of Brain Tissue in the Management of Acute Ischemic Stroke

Lu Zhang, Changqing Li\*

Department of Neurology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: February 16, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 18, 2026

## Abstract

Acute ischemic stroke (AIS) is the third leading cause of worldwide death and is showing a trend of

\*通讯作者。

affecting younger people. Clinically, the Alberta Stroke Program Early CT Score (ASPECTS) is widely used to assess the severity of stroke, but it also has limitations such as strong subjectivity and insufficient early sensitivity. In recent years, the net water uptake (NWU) of brain tissue based on CT density measurement has been gradually mentioned and provided a new perspective for clinical practice. As a novel quantitative imaging biomarker, NWU can objectively reflect the degree of brain tissue edema by quantifying the density difference between the ischemic area and the contralateral normal brain tissue, thereby further reflecting the collateral circulation status of the ischemic area, predicting the occurrence of malignant cerebral edema (MCE), and predicting the therapeutic effect after stroke. In addition, with the advancement of automated calculation methods, NWU measurement has evolved from manual calculation to automatic processing based on artificial intelligence, greatly enhancing its practicality in clinical settings. This article aims to systematically describe the basic principles and measurement methods of NWU, summarize its clinical application scenarios in acute ischemic stroke, and provide more accurate and efficient imaging decision support for clinical practice.

## Keywords

Net Water Uptake, Cerebral Edema, Ischemic Stroke

Copyright © 2026 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

急性缺血性卒中(acute ischemic stroke, AIS)是全球范围内致残和致死的主要原因之一,其发病率在我国呈逐年上升的趋势。尽管静脉溶栓(intravenous thrombolysis, IVT)和血管内治疗(endovascular treatment, EVT)等治疗手段在临床治疗上取得了重大进展,但作为一种严重的危及生命的疾病,并非所有患者均能从中取得良好获益,其并发症如出血性转化(hemorrhagic transformation, HT)、恶性脑水肿(malignant cerebral edema, MCE)、无效再通等仍对患者的预后产生严重、深远的影响[1]。在这一临床背景下,基于CT密度测定的净摄水率(net water uptake, NWU)近年来逐渐受到广泛关注[2] [3]。作为一种定量评估缺血性脑组织水肿程度的影像学生物标志物, NWU 通过量化缺血区域与对侧正常脑组织的密度差异以客观反映脑组织的水肿程度,能够为预后预测及临床决策提供更为精准的信息[4]。阿尔伯塔省卒中项目早期计算机断层扫描评分(ASPECTS)是临床上广泛使用的半定量评估方法,且与 NWU 存在显著相关性, ASPECTS 评分越低, NWU 往往越高,提示更广泛的缺血性损伤[5]。但 ASPECTS 评分存在主观性强、对轻度水肿不敏感等等局限性,因此作为连续变量的 NWU,能够更精准地量化脑水肿程度。此外, NWU 还与多种临床结局相关,能够为神经功能独立性、MCE 和 HT 的发生风险以及再通治疗效果等提供客观依据[3]。

## 2. NWU 的基本概念与测量原理

在缺血性卒中发生的急性期,脑组织经历缺血缺氧,然后细胞内的钠钾泵出现功能障碍、细胞内钠离子和水滞留,形成细胞毒性水肿;而细胞内水分增加,使得脑组织的密度降低,在 CT 上表现为低密度影;随着梗死时间的延长,血脑屏障遭到破坏,血管内的蛋白质和液体渗出到细胞外间隙,形成血管源性水肿,进一步加重了脑组织的水肿,导致 CT 密度进一步降低[6]-[8]。据报告,脑组织每增加 1% 的含

水量, CT 密度就会降低约 1.8 Hu ( $r = 0.55, p < 0.0001$ ) [9], 因此理论上可以通过 CT 密度判断卒中患者的脑水肿程度。NWU 正是通过定量分析这种 CT 密度的变化来评估颅脑的水肿程度。通过病变侧缺血区脑组织的 CT 密度(density of ischemic lesion,  $D_{\text{ischemic}}$ )与对侧大脑半球相应区域正常脑组织的密度(density of normal lesion,  $D_{\text{normal}}$ )就可以得到 NWU 值, 其计算公式为[10]:

$$\text{NWU} = \left( 1 - \frac{D_{\text{ischemic}}}{D_{\text{normal}}} \right) \times 100\%$$

NWU 值越高, 提示了缺血脑组织中的净摄水量越多、水肿越严重, 与此同时间接反映了血脑屏障的破坏程度和组织不可逆损伤的程度[9] [11]。相较于单纯的病灶 CT 密度绝对值, 这一公式将梗死灶与正常组织的密度差异标准化, 消除了个体间 CT 密度差异的影响, 使得不同患者之间的 CT 密度具备可比性。因此 NWU 在敏感性、量化、预后预测和临床决策方面比传统 ASPECTS 更具显著优势[12]。

### 3. CT 平扫密度测量的因素

尽管 CT 平扫能够提供脑组织水肿的信息, 但其密度测量并非绝对精确, 在 CT 扫描过程及其后续图像处理过程中, 存在多种可能导致测量误差的因素:

头颅的不对称性是指左右侧大脑、颅骨、甚至颅内结构在大小、形状或位置上存在差异。这种不对称性在人群中普遍存在, 且程度因人而异。传统的 CT 扫描仪在 X 射线束穿过高密度物质(如骨骼)时, 会发生一定程度的能量衰减, 导致图像中心区域的 X 射线强度相对更高, 而边缘区域较低。这种现象被称为线束硬化或硬化伪影[13]。如果一侧颅骨比另一侧更厚或密度更高, X 射线束在该侧的衰减会更严重, 导致该区域的 CT 值被“抬高”(假性高密度)或周围区域的 CT 值被“压低”(假性低密度)。不对称的颅骨结构可能导致这种硬化效应在头颅两侧分布不均, 使得左侧和右侧正常脑组织的 CT 值出现系统性偏差。

陈旧性梗死灶是脑组织在过去经历过缺血事件后遗留的改变。相较于急性期梗死灶, 陈旧性梗死灶通常表现为脑组织结构的破坏、体积减小, 并且可能伴有脑室扩张或脑沟增宽。Leukocirariosis, 又称脑白质疏松, 是指脑白质区域(尤其是脑室周围和深部白质)出现的弥漫性、对称性低密度改变, 通常与慢性脑血管病、高血压、衰老等因素相关[14]。在 CT 平扫图像上, 陈旧性梗死灶和脑白质疏松均表现为密度的降低, 严重时其密度值可能近似于脑脊液。当测量 NWU 的感兴趣区(region of interest, ROI)恰好包含了上述改变时, 那么该 ROI 区域的平均 CT 值将被显著拉低, 最终可能导致陈旧性病灶与急性期病灶的混淆、以及脑实质密度基线受到影响。

当同一体素中含多种不同密度组织时, CT 值或者 MR 信号不能真实地反映其中某一组织的特性, 这就是部分容积效应(Partial Volume Effect, PVE)。在 AIS 的 CT 评估中, PVE 普遍存在且影响显著。在梗死病灶与正常脑组织的边界, 一个体素中同时包含部分梗死组织和部分正常脑组织, 这时患侧 ROI 区域的 CT 值因 PVE 而被高估、其水肿程度和 NWU 值被低估; 同时因为脑沟和脑室周围的脑组织区域的存在, 脑实质与脑脊液之间也出现 PVE 导致 CT 值被拉低、患侧和健侧 NWU 值均可能受到影响。

CT 平扫成像过程中因各种因素的影响, 可能会产生非真实的密度改变, 即伪影。伪影的种类繁多, 包括但不限于硬化伪影、金属伪影、运动伪影等等, 它能直接改变局部的 CT 值、或将真实病变误判或掩盖, 因此对 CT 密度测量和 NWU 计算精度的影响是直接且破坏性的。

### 4. NWU 的测量方法

测量 NWU 时, 需要在 CT 平扫图像上精确勾画出缺血病灶的 ROI, 并在对侧相应位置勾画镜像 ROI

作为对照[3]。随着对 NWU 研究的深入, 为了更精确、更便捷地量化脑组织水肿, 研究者们发展出了多种评估并测量 NWU 的方法, 其主要的区别在于勾画 ROI 的方式不同。

#### 4.1. 基于 CTP 的 NWU

CT 灌注成像能够提供脑血流动力学信息, 如脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、脑血容量(cerebral blood volume, CBV)和平均通过时间(mean transit time, MTT)等, 从而获得缺血半暗带区和核心梗死区的精准范围, 将此设为 ROI 可以进一步获得 CTP-NWU。该方法将灌注信息与脑水肿信息相结合, 理论上可以区分缺血半暗带和核心梗死区, 一项实验表明两者之间的 NWU 值存在差异, 其中梗死核心区的 CTP-NWU 显著高于缺血半暗带区的 CTP-NWU [4]。但部分实验也提出核心梗死区域的 CTP-NWU 相较其他方法并未展示出更好的预测预后能力[15]。

#### 4.2. 基于 ASPECTS 的 NWU

ASPECTS 作为临床最常用的评分工具之一, 可以通过评估大脑中动脉供血区的早期缺血改变来半定量地评估梗死范围, 被广泛用于评估卒中严重程度、评估溶栓效果以及预测卒中远期预后[16]。目前, ASPECTS 的自动化软件能够快速且准确地计算出每个评分区域的梗死信息及平均密度, 基于 ASPECTS 的 NWU 则是利用软件取得每个区域的 NWU 值, 通过平均值或加权平均计算出最终的 ASPECTS-NWU。一项针对 122 例接受机械取栓的前循环大血管闭塞(ALVOS)患者的研究发现, 基于 CT 平扫的 ASPECTS-NWU 是机械取栓术后 90 天神经功能结局的独立预测因素(OR = 2.131, 95% CI: 1.301~3.493,  $p = 0.003$ ), 其预测术后神经功能结局的曲线下面积(AUC)高达 0.881, 明显优于传统 ASPECTS 评分和入院 NIHSS 评分等指标[17]。

#### 4.3. 基于 CT 平扫的 NWU

##### 4.3.1. 基于基底节大脑中动脉供血区的 NWU

2016 年, 一项研究提出在不依赖 CTP 或 ASPECTS 的信息下, 仅通过在梗死侧基底节水平盲目勾画出整个大脑中动脉供血区域来计算平均密度并得出 NWU 值[18]。多变量分析显示, NWU 是 MCE 的独立预测因子(OR = 1.168, 95% CI: 1.041~1.310), 当  $NWU \geq 8.127\%$  时能够较好地识别出 MCE (AUC = 0.734, 敏感性 = 0.656, 特异性 = 0.862)。

##### 4.3.2. 基于图像块的 NWU 测量

在不同层面的 CT 平扫图像中, 通过  $30 \times 30$  体素大小的图像块将患侧可疑的梗死病灶勾画出来, 并镜像至健侧、勾画出同一层面及大小的图像块, 分别计算患侧和健侧的平均密度, 最终得出 NWU 值。相关研究提示, 该 NWU 可预测 MCE 的发生( $p < 0.05$ ), 其曲线下面积为 0.86 [19]。

基于 CT 平扫的 NWU 这一方法对操作者的影像学诊断经验要求较高, 不同水平的医师勾画的 ROI 可能存在较大差异, 因此影响 NWU 计算的准确性。此外, 上述方法的 ROI 并不能代表实际的梗死病灶, 因此尽管有相关研究表明其具备预测脑卒中预后或不良结局的能力, 其临床真实运用有待进一步验证。但对于部分没有 CTP 或 ASPECTS 自动化软件的基层医院而言是一个不错的替代方法。

#### 4.4. 多模态影像整合与 NWU

尽管 NWU 在水肿评估中具有独特优势, 但单一指标难以全面反映缺血脑组织的复杂病理状态。目前, 如何通过使用影像组学的方法来探究梗死信息也正在不断的研究中。NWU 与 CTP 参数的联合分析可更准确地预测水肿进展, 提示严重低灌注区域更容易发生进展性水肿[20]。此外, SWI 序列显示的不对

称突出静脉征(asymmetrically prominent veins sign, APVS)与 NWU 存在显著关联, APVS 阳性患者的 NWU 值更高, 且发生恶性水肿的风险增高[21]。此外, 人工智能技术的融入也为 NWU 与多模态影像的整合分析提供了新的可能。例如, 基于深度学习的自动化影像分析系统可同时提取 NWU、ASPECTS 评分、侧支循环状态等多维度特征, 并构建预测模型[22]。

#### 4.5. NWU 不同测量方式的总结

根据不同测量方式的原理, 可以最终分为 3 类: 手动 ROI 测量、ASPECTS 区域法、AI 全自动法, 每类测量方法均存在各自的优劣(具体见表 1)。

**Table 1.** Comparison of different NWU measurement methods

**表 1.** 不同 NWU 测量方法的对比

	手动 ROI	ASPECTS 区域法	AI 全自动法
原理	手动勾画 ROI, 计算双侧密度差异	利用 ASPECTS 标准解剖区域划分, 计算受累区域与健侧对比的密度差异	基于算法自动识别病灶并计算 NWU
优点	可依据病灶形态精确测量、对设备要求低	标准化程度较高; 计算较快捷; 已在多项研究中证实预测价值	速度快、标准化、可重复性高、无需人工干预
缺点	主观性强、重复性差、难以标准化	受 ASPECTS 区域划分影响, 无法精确覆盖所有不规则或弥漫性的病灶, 仍具有一定主观性	算法依赖性强; 对设备要求高
适用场景	早期概念验证性研究, 复杂或不典型病灶分布分析	预测发病时间、恶性脑水肿、预后等	急诊快速评估、大规模多中心研究、AI 辅助诊断
耗时	长	较短	短
准确性	依赖操作者, 可变性大	优于纯手动法	较高, 与手动/ASPECTS 法相当或更优

## 5. NWU 在 AIS 中的应用

### 5.1. 侧支循环的关系

侧支循环是指当大脑动脉严重狭窄或闭塞时, 颅内侧支血管开放和血流重新分布的一种现象。血流可以通过 Willis 环、眼动脉吻合支、新生血管等途径为闭塞血管区域提供血流代偿, 使得缺血组织获得一定程度的糖氧血供、降低缺血事件的风险[23]。因此侧支循环的状态是决定缺血脑组织灌注水平的关键因素之一, 良好的侧支循环在一定程度上反应急性缺血性卒中患者的临床结局, 并且提示静脉溶栓和血管内治疗的良好获益[23]。2022 年, Tobias 提出了脑侧支循环级联(cerebral collateral cascade, CCC)模型, 该方法能够综合评估动脉、组织级和静脉流出情况, 进一步反映侧支循环的状态和脑微血管的完整性[24]。Tobias 将接受血栓切除术的 647 名急性卒中患者按照侧支循环良好到侧支循环不良的顺序分为 CCC+、CCC mixd、CCC—三个组别, 多变量 logistic 回归显示, 随着侧支循环状态的变差, 其功能结局越不好, 且 CCC 的程度与最终梗死体积显著相关[24]。

在动脉侧支循环方面, 将良好侧支循环定义为改良 Tan 评分 2~3 分, 研究发现侧支循环不良与较高的 NWU 值显著相关(8.1% vs. 4.2%,  $p < 0.001$ ), 且这种关联关系独立于其他因素[25]。分析其原因, 可能是因为侧支循环通过影响脑组织氧供和代谢状态, 从而减少细胞毒性水肿的发生。

针对组织侧支循环层面, Tobias 通过脑灌注研究中的低灌注强度比(HIR, 即脑组织中[Tmax > 10 秒/Tmax > 5 秒]的体积比)来测量组织水平的侧支循环(TLC), 良好 TLC 被定义为  $HIR \leq 0.4$ 。研究发现良好 TLC 的患者, 其 NWU 值更低(median = 8.67%, IQR: 5.13~14.8 versus. Median = 17.0%, IQR:

11.73~22.03), 且良好 TLC (OR = 2.35, CI: 1.31~4.21,  $p = 0.004$ )和较低的 NWU (OR = 0.75, CI: 0.70~0.79,  $p < 0.001$ )均为良好功能恢复情况的独立预测因素[26]。这一结果表明,即使在宏观侧支循环相似的情况下,组织水平的微灌注差异仍会对水肿进展产生显著影响。

静脉流出(VO)作为脑循环的重要组成部分,同样与 NWU 密切相关。皮质静脉显影评分(cortical vein opacification score, COVES)是常见的静脉侧支循环评估方法,将良好的静脉流出定义为 COVES 评分  $\geq 3$  分,则会发现患者的 NWU 值显著低于静脉流出不良者(median = 7%, IQR: 4.6%~11.5% versus. median = 17.9%, IQR: 12.3%~22.2%,  $p < 0.001$ ),且这种差异独立于动脉侧支循环状态[27]。这种结果可能是因为静脉流出障碍阻碍了脑组织代谢产物的清除、加剧了氧化应激和炎症反应,进而促进了水肿的形成。

## 5.2. NWU 预测溶栓后神经功能改善

AIS 在灌注治疗的早期目标是恢复缺血区域的血流灌注,静脉溶栓是最有效的恢复脑血流的方法之一,也是临床中急性缺血性卒中的首选治疗方法之一。在再灌注治疗恢复血流的同时,有加重血脑屏障损伤、进一步引发再灌注损伤的风险。有研究表明,延迟的血管再通治疗可能会导致更严重的脑水肿以及其他并发症如出血性转化,特别是在血脑屏障严重损伤的情况下风险显著增加[28] [29]。因此,再灌注治疗的时机选择至关重要,早期再灌注能在血脑屏障破坏程度较轻时恢复血流,有助于限制水肿进展,从而降低并发症风险。

NWU 作为反应脑组织水肿程度的新兴定量指标,在预测溶栓后早期神经功能改善程度方面显示出重要价值[3]。理论上,较低的 NWU 值提示更小的核心梗死面积和更大的缺血半暗带区域,而这意味着这部分组织在再灌注治疗如静脉溶栓治疗后具备较大的挽救能力;相反,高 NWU 值往往提示较大的不可逆梗死存在,即使实现血管再通,神经功能改善也有限。因此,一项评估 NWU 与溶栓后神经功能改善关系的研究发现,治疗后 24 小时和 7 天的美国国立卫生研究院卒中量表(National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS)评分的改善程度与基线 NWU 呈负相关[12]。在接受阿替普酶静脉溶栓的患者中,低 NWU 组在治疗后 24 小时和 7 天的 NIHSS 评分降低更明显,提示低基线 NWU 患者对溶栓治疗的反应更好。

## 5.3. NWU 与血管再通

血管再通是急性缺血性卒中治疗成功的关键,通常用改良脑梗死溶栓分级(modified Thrombolysis in Cerebral Infarction, mTICI)进行评估, mTICI  $\geq 2b$  被认为是成功再通[30]。一项前瞻性研究纳入 122 例接受机械取栓术的急性前循环大血管闭塞患者,将良好结局定义为术后 90 天改良 Rankin 量表(mRS)评分 0~2 分,不良结局定义为术后 90 天 mRS 评分 3~6 分,分析发现术前 CT-ASPECTS-NWU 是不良结局的独立预测因子(OR = 2.131, 95% CI: 1.301~3.493),且其预测效能(AUC = 0.881)优于侧支循环状态(AUC = 0.765)和术前 ASPECTS 评分(AUC = 0.723),其最佳截断值为 7.55% [17]。这一结果表明,术前 NWU 值越高,患者术后神经功能恢复越差。另一项研究也显示,对于 NWU  $< 15\%$  的患者,取栓治疗联合最佳药物治疗能显著改善功能预后,但当 NWU  $> 15\%$  时,取栓治疗带来的额外功能获益有限,与单纯药物治疗相比功能预后改善不显著[31]。

NWU 与血管再通率之间存在复杂的双向关系,一方面,基线 NWU 可能预测患者的预后结果;另一方面,是否再通成功又能反过来显著影响 NWU 的后续变化[3] [12] [32]。传统观念认为 CT 平扫上的低密度病灶反应了不可逆的脑组织损伤,这部分低密度病灶通常不会恢复,后期会逐渐形成软化灶。但是有实验表明在完全再灌注治疗后有极少数患者的低密度能够得到逆转。为了研究血管内治疗后患者的脑水肿变化情况,将入院 CT 平扫和随访 CT 平扫信息对比得出  $\Delta$ NWU,最终发现 14.7% 的患者出现水肿停

止、1.6%的患者出现明显水肿逆转, 而患者的再通程度越高(OR = 2.96, 95% CI: 1.46~6.01,  $p < 0.01$ )、成像到再通时间越短(OR per hour = 0.32, 95% CI: 0.18~0.54,  $p < 0.0001$ )与该事件的发生显著相关[32]。MR CLEAN NO-IV 试验的数据也显示, 急性卒中患者的成功再灌注(eTICI 2b/3)均与 24 小时和 1 周时的 NWU 进展减少显著相关[12]。

#### 5.4. NWU 预测恶性脑水肿

MCE 是 AIS, 尤其是大面积梗死患者最严重的并发症之一, 常常导致脑疝和死亡等不良结局。因此早期识别出 MCE 高风险患者对于是否采取去骨瓣减压术等挽救性措施至关重要。NWU 作为定量脑水肿的指标, 其基线 NWU 的数值与 MCE 的发生存在统计学上的联系, 具备预测 MCE 发生的价值。Broocks 等人的开创性研究发现, 发生 MCE 患者的早期病灶 NWU 值显著高于未发生者, 并以 NWU > 12.7% 作为阈值, 其识别 MCE 的 AUC 高达 0.93 [10]。此外, Wang 等人在入院 CT 平扫上测量了不同 ASPECT 区域的 NWU 值, 即受影响区域的 ASPECTS-NWU (af-ASPECTS-NW)、皮质下 ASPECTS-NWU (sc-ASPECTS-NWU) 和皮质性 ASPECTS-NWU (c-ASPECTS-NWU), 经过多变量逻辑回归分析表明, 只有基线 sc-ASPECTS-NWU 是恶性大脑中动脉梗死的相关因素, 且 sc-ASPECTS-NWU 对恶性梗死的预测价值最高, 其 ROC 曲线下面积为 0.91 [33]。这一结果提示, 皮层下区域的早期水肿可能是 MCE 发生的关键预警信号。

为了提高预测精度, 研究者们还提出了加权 NWU (wNWU) 的概念, 其计算方法为: NWU 值  $\times$  受累 ASPECTS 区域数, 该方法可以同时反应水肿的程度和范围[34]。研究发现, 在成功再通的患者中, wNWU 是 MCE 的独立预测因子(OR = 1.61, 95% CI: 1.24~2.09), 而未再通成功患者中未见此现象[34]。这表明再通治疗可能改变水肿进展的轨迹, 且 wNWU 能够捕捉这一动态变化。此外, 特定区域的水肿可能也具备预测 MCE 的价值。例如, 岛叶区域的 NWU (Insula-NWU) 对 MCE 的预测效能优于整体 ASPECTS-NWU [35]。这些研究共同表明, NWU 是预测 MCE 的可靠工具, 且其动态测量和区域化分析能提供更为精准的风险分层信息。

MCE 的发生使得病灶挤压周围脑组织、颅内压力升高, 导致中线结构向对侧移位, 即中线移位(MLS)。MLS 是诊断 MCE 的重要影像学依据之一, 且其移位的程度通常与 MCE 的严重程度呈正相关。研究发现, NWU 对 MLS 的预测价值同样显著。与没有 MLS 的患者相比, MLS 患者的核心梗死区域 NWU (median = 6.8, IQR: 3.2~10.4 vs. median = 4.9, IQR: 2.2~8.1,  $p = 0.048$ )、缺血半暗带区域 NWU (median = 2.9, IQR: 1.8~4.3 vs. median = 0.2, IQR: -2.5~-2.7,  $p < 0.001$ )均显示出更高的数值, 并且进一步分析发现缺血半暗带区域 NWU 对 MLS 的预测性能高于核心梗死区域的 NWU (AUC = 0.708 vs. 0.603,  $p < 0.001$ ) [36]。这一结果与半暗带的病理生理特点相符, 即半暗带组织仍具有一定的代谢活性, 其水肿进展更易导致占位效应。此外, NWU 与 MLS 之间的统计学关系在血管再通患者中同样显著, 提示再灌注治疗、血流的恢复存在加剧半暗带血管源性水肿的风险[36]。

#### 5.5. NWU 预测出血转化

出血转化(HT), 尤其是症状性颅内出血(symptomatic intracerebral haemorrhage, sICH)是急性缺血性卒中患者最常见以及最严重的并发症之一, 与致残率和病死率增高显著相关。据统计, 急性脑卒中患者出现 HT 的概率约为 7%~29%, 而接受静脉溶栓的患者其发生率增加至 10%~48% [37]。因此, 早期预测急性缺血性卒中患者溶栓后是否出现 HT 具有重要意义。研究发现, 较高的 NWU 是 EVT 后发生 ICH 的独立预测因素(OR = 1.56, 95% CI: 1.03~2.34,  $p = 0.007$ ) [6]。Xu 等的研究也显示, 在接受机械取栓的患者中, 缺血半暗带 NWU (OR = 1.442, 95% CI: 1.177~1.766,  $p < 0.001$ )和核心梗死区 NWU (OR = 1.155, 95%

CI: 1.027~1.299,  $p = 0.016$ )均是 sICH 的独立危险因素, 且缺血半暗带 NWU 的预测效能更高(AUC = 0.773 vs. 0.673) [8]。这可能是因为缺血再灌注损伤容易导致半暗带血脑屏障的破坏, 进而引发出血。

值得注意的是, NWU 与 sICH 的关系可能与急性卒中治疗方式密切相关。XU 等的研究结果还发现了在未接受机械取栓治疗的患者中, 只有基线 NIHSS 评分与 sICH 显著相关, 而 NWU 没有显示出预测价值[8], 这表明血管内治疗可能通过改变血流动力学状态, 放大了 NWU 与血脑屏障损伤之间的关联。

## 6. 总结与展望

NWU 作为一种定量、无创的影像学指标, 在急性缺血性卒中的管理中展现出巨大的临床价值, 它不仅能够早期识别缺血脑组织的水肿程度, 预测恶性脑水肿、症状性颅内出血等严重并发症的发生风险, 还能为血管再通治疗的效果评估和个体化治疗方案的制定提供重要依据。近年来, 自动化测量技术等的应用显著提高了 NWU 的测量准确性和临床实用性, 使其逐渐成为急性卒中影像评估的核心指标之一。

尽管如此, NWU 的临床应用仍面临一些挑战, 包括但不限于测量标准化、观察者间一致性以及影像干扰因素的校正。为了推动 NWU 从科研工具向临床常规检查的转变以及论证 NWU 指导临床治疗的有效性, 现阶段仍需要更多的大型研究数据作为支撑。随着未来 NWU 研究进一步的深入, NWU 有望成为急性卒中精准医疗的重要组成部分, 为改善患者预后做出更大贡献。

## 参考文献

- [1] 吴川杰, 吉训明. 急性缺血性卒中再灌注治疗研究年度进展 2022[J]. 中华医学杂志, 2023, 103(11): 858-862.
- [2] Mallavarapu, M., Kim, H.W., Iyyangar, A., Salazar-Marioni, S., Yoo, A.J., Giancardo, L., *et al.* (2025) A Novel Automated CT Biomarker to Predict Outcomes in Acute Ischemic Stroke: Net Water Uptake. *Frontiers in Neurology*, **16**, Article 1629434. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1629434>
- [3] Cheng, X., Shi, J., Wu, H., Zhu, W. and Lu, G. (2022) Review of Net Water Uptake in the Management of Acute Ischemic Stroke. *European Radiology*, **32**, 5517-5524. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08658-x>
- [4] Han, Q., Yang, J., Gao, X., Li, J., Wu, Y., Xu, Y., *et al.* (2022) Early Edema within the Ischemic Core Is Time-Dependent and Associated with Functional Outcomes of Acute Ischemic Stroke Patients. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 861289. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.861289>
- [5] Iancu, A., Buleu, F., Chita, D.S., Tutelca, A., Tudor, R. and Brad, S. (2023) Early Hemorrhagic Transformation after Reperfusion Therapy in Patients with Acute Ischemic Stroke: Analysis of Risk Factors and Predictors. *Brain Sciences*, **13**, Article 840. <https://doi.org/10.3390/brainsci13050840>
- [6] Nawabi, J., Kniep, H., Schön, G., Flottmann, F., Leischner, H., Kabiri, R., *et al.* (2019) Hemorrhage after Endovascular Recanalization in Acute Stroke: Lesion Extent, Collaterals and Degree of Ischemic Water Uptake Mediate Tissue Vulnerability. *Frontiers in Neurology*, **10**, Article 569. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00569>
- [7] Broocks, G., Kniep, H., Kemmling, A., Flottmann, F., Nawabi, J., Elsayed, S., *et al.* (2019) Effect of Intravenous Alteplase on Ischaemic Lesion Water Homeostasis. *European Journal of Neurology*, **27**, 376-383. <https://doi.org/10.1111/ene.14088>
- [8] Xu, T., Yang, J., Han, Q., Wu, Y., Gao, X., Xu, Y., *et al.* (2022) Net Water Uptake, a Neuroimaging Marker of Early Brain Edema, as a Predictor of Symptomatic Intracranial Hemorrhage after Acute Ischemic Stroke. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 903263. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.903263>
- [9] Kucinski, T., Väterlein, O., Glauche, V., Fiehler, J., Klotz, E., Eckert, B., *et al.* (2002) Correlation of Apparent Diffusion Coefficient and Computed Tomography Density in Acute Ischemic Stroke. *Stroke*, **33**, 1786-1791. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000019125.80118.99>
- [10] Broocks, G., Flottmann, F., Scheibel, A., Aigner, A., Faizy, T.D., Hanning, U., *et al.* (2018) Quantitative Lesion Water Uptake in Acute Stroke Computed Tomography Is a Predictor of Malignant Infarction. *Stroke*, **49**, 1906-1912. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.118.020507>
- [11] Vorasayan, P., Bevers, M.B., Beslow, L.A., Sze, G., Molyneaux, B.J., Hinson, H.E., *et al.* (2019) Intravenous Glibenclamide Reduces Lesional Water Uptake in Large Hemispheric Infarction. *Stroke*, **50**, 3021-3027. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.119.026036>
- [12] Olszewski, W., Cavalcante, F., van Poppel, L., Beenen, L., Emmer, B.J., van den Wijngaard, I., *et al.* (2025) Subacute Edema

- Progression after Acute Ischemic Stroke: Impact of Intravenous Alteplase Administration and Reperfusion Degree. *Frontiers in Neurology*, **16**, Article 1698480. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1698480>
- [13] 宁志光, 马国峰, 于远, 等. 宽体探测器 CT 多物质伪影降低技术对 CT 扫描图像质量的影响[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(10): 790-793.
- [14] Wardlaw, J.M., Smith, C. and Dichgans, M. (2019) Small Vessel Disease: Mechanisms and Clinical Implications. *The Lancet Neurology*, **18**, 684-696. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(19\)30079-1](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(19)30079-1)
- [15] Raza, S.A., Barreira, C.M., Rodrigues, G.M., Frankel, M.R., Haussen, D.C., Nogueira, R.G., et al. (2018) Prognostic Importance of CT ASPECTS and CT Perfusion Measures of Infarction in Anterior Emergent Large Vessel Occlusions. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, **11**, 670-674. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2018-014461>
- [16] Kuang, H., Najm, M., Chakraborty, D., Maraj, N., Sohn, S.I., Goyal, M., et al. (2018) Automated ASPECTS on Non-contrast CT Scans in Patients with Acute Ischemic Stroke Using Machine Learning. *American Journal of Neuroradiology*, **40**, 33-38. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a5889>
- [17] 陆泽华, 金雨洁, 金晓凤, 等. 平扫 CT 的阿尔伯特卒中计划早期 CT 评分区域净取水率评估急性前循环大血管闭塞性卒中机械取栓患者的预后[J]. 中华放射学杂志, 2025, 59(5): 505-510.
- [18] Xu, H., Sun, Y., Luo, N., Wang, J., Chang, G., Tao, L., et al. (2021) Net Water Uptake Calculated in Standardized and Blindly Outlined Regions of the Middle Cerebral Artery Territory Predicts the Development of Malignant Edema in Patients with Acute Large Hemispheric Infarction. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article 645590. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.645590>
- [19] Fu, B., Qi, S., Tao, L., Xu, H., Kang, Y., Yao, Y., et al. (2020) Image Patch-Based Net Water Uptake and Radiomics Models Predict Malignant Cerebral Edema after Ischemic Stroke. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article 609747. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.609747>
- [20] Yedavalli, V., Salim, H.A., Lakhani, D.A., Balar, A., Mei, J., Nguyen, T.N., et al. (2025) Tmax 10 Volume Is Independently Associated with NWU Delta in Large Core Stroke. *Clinical Neuroradiology*. <https://doi.org/10.1007/s00062-025-01569-6>
- [21] 向薇, 梁志刚. 急性缺血性卒中患者磁敏感加权成像不对称突出静脉征的临床意义[J]. 国际脑血管病杂志, 2022, 30(8): 595-599.
- [22] Shi, J., Wu, H., Dong, Z., Liang, X., Liu, Q., Zhu, W., et al. (2022) Automated Quantitative Lesion Water Uptake in Acute Stroke Is a Predictor of Malignant Cerebral Edema. *European Radiology*, **32**, 2771-2780. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08443-2>
- [23] Uniken Venema, S.M., Dankbaar, J.W., van der Lugt, A., Dippel, D.W.J. and van der Worp, H.B. (2022) Cerebral Collateral Circulation in the Era of Reperfusion Therapies for Acute Ischemic Stroke. *Stroke*, **53**, 3222-3234. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.121.037869>
- [24] Faizy, T.D., Mlynash, M., Kabiri, R., Christensen, S., Kuraitis, G.M., Mader, M.M., et al. (2022) The Cerebral Collateral Cascade: Comprehensive Blood Flow in Ischemic Stroke. *Neurology*, **98**, e2296-e2306. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000200340>
- [25] Xia, H., Sun, H., He, S., Zhao, M., Huang, W., Zhang, Z., et al. (2021) Absent Cortical Venous Filling Is Associated with Aggravated Brain Edema in Acute Ischemic Stroke. *American Journal of Neuroradiology*, **42**, 1023-1029. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a7039>
- [26] Faizy, T.D., Kabiri, R., Christensen, S., Mlynash, M., Kuraitis, G., Broocks, G., et al. (2021) Perfusion Imaging-Based Tissue-Level Collaterals Predict Ischemic Lesion Net Water Uptake in Patients with Acute Ischemic Stroke and Large Vessel Occlusion. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, **41**, 2067-2075. <https://doi.org/10.1177/0271678x21992200>
- [27] Faizy, T.D., Kabiri, R., Christensen, S., Mlynash, M., Kuraitis, G., Meyer, L., et al. (2021) Venous Outflow Profiles Are Linked to Cerebral Edema Formation at Noncontrast Head CT after Treatment in Acute Ischemic Stroke Regardless of Collateral Vessel Status at CT Angiography. *Radiology*, **299**, 682-690. <https://doi.org/10.1148/radiol.2021203651>
- [28] Liu, S., Chen, T. and Li, Y. (2026) Advances in No-Reflow after Stroke Reperfusion Therapy. *Experimental Neurology*, **396**, Article ID: 115532. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2025.115532>
- [29] Kim, T., Koo, J., Kim, S., Song, I., Chung, S. and Lee, K. (2018) Blood-Brain Barrier Permeability Assessed by Perfusion Computed Tomography Predicts Hemorrhagic Transformation in Acute Reperfusion Therapy. *Neurological Sciences*, **39**, 1579-1584. <https://doi.org/10.1007/s10072-018-3468-1>
- [30] Deng, G., Xiao, J., Yu, H., Chen, M., Shang, K., Qin, C., et al. (2021) Predictors of Futile Recanalization after Endovascular Treatment in Acute Ischemic Stroke: A Meta-Analysis. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, **14**, 881-885. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2021-017963>
- [31] Broocks G., Bendszus, M., Simonsen, C.Z., et al. (2025) Net Water Uptake at CT Predicts the Treatment Effect of

- Thrombectomy for Low ASPECTS Stroke. *Radiology*, **317**, e250708
- [32] Brooks, G., McDonough, R., Meyer, L., Bechstein, M., Kniep, H., Schön, G., *et al.* (2021) Reversible Ischemic Lesion Hypodensity in Acute Stroke CT Following Endovascular Reperfusion. *Neurology*, **97**, e1075-e1084. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000012484>
- [33] Wang, J., Xiong, X., Ma, Y., Yin, Y., Ye, J. and Fu, J. (2024) Higher Baseline Subcortical Net Water Uptake in Computed Tomography Predicts Malignant Middle Cerebral Artery Infarction in Patients with Acute Ischemic Stroke. *Clinical Radiology*, **79**, e1339-e1346. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2024.08.001>
- [34] Xu, H., Zheng, M., Liu, W., Peng, W., Qiu, J., Huang, W., *et al.* (2024) Enhanced Prediction of Malignant Cerebral Edema in Large Vessel Occlusion with Successful Recanalization through Automated Weighted Net Water Uptake. *World Neurosurgery*, **188**, e312-e319. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.05.101>
- [35] Cheng, X., Tian, B., Huang, L., Shen, X., Liao, A., Zhou, C., *et al.* (2025) Location-Specific Net Water Uptake and Malignant Cerebral Edema in Acute Anterior Circulation Occlusion Ischemic Stroke. *American Journal of Neuroradiology*, **46**, 1329-1335. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a8659>
- [36] Chen, C., Yang, J., Han, Q., Wu, Y., Li, J., Xu, T., *et al.* (2023) Net Water Uptake within the Ischemic Penumbra Predicts the Presence of the Midline Shift in Patients with Acute Ischemic Stroke. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article 1246775. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1246775>
- [37] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性脑梗死后出血转化诊治共识 2019 [J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(4): 252-265.