

同行专家业内评价意见书编号：20250854411

附件1

**浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）
同行专家业内评价意见书**

姓名：李灵钰

学号：22260302

申报工程师职称专业类别（领域）：电子信息

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年03月28日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

本人全面且深入地掌握了本专业基础理论与专业技术知识。在基础学科领域，精通数学、物理等知识，并将其灵活运用于神经影像学的复杂问题求解中。熟悉行业前沿技术，如多种先进的纤维束追踪算法，精准把握它们在反映大脑微观结构变化上的差异与优势。专业软件操作方面，熟练掌握 Python、Shell 编程，能娴熟运用 FSL、FreeSurfer、MRtrix 等工具包进行数据的精细处理。对 MySQL

数据库的架构、操作指令熟练掌握，确保海量脑影像数据的有序存储与高效检索。同时，通过大量实践积累了丰富的默会性工程知识，依据不同的研究需求、数据质量，迅速判断并采用最适配的技术流程，实现跨专业领域知识的融会贯通，为解决复杂工程问题筑牢根基。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

深度参与自动化沿纤维束统计工具qATP (Quantification Along Tract Profile) 开发项目。项目启动之初，积极投身于需求调研，与不同层级的神经影像学研究者、临床医生以及初学者广泛交流，精准提炼出操作便捷性、功能灵活性、数据规范性三大核心诉求，为后续设计指明方向。在系统架构搭建阶段，凭借扎实的专业知识选定 Linux 平台，运用 Python 和 Shell 脚本编写代码，整合 FSL、FreeSurfer 等关键依赖工具，打造出稳定且高效的工具主体。于前端交互界面构建中，充分考虑用户体验，使用 qt designer 和 PyQt 5.0

结合，布局参数设定、结果预览等功能板块，反复优化按钮、滑动条等控件的交互逻辑，保障用户操作流畅无阻。算法处理环节，集成预处理、配准、微结构定量参数生成、纤维束追踪与分割、沿纤维束定量统计、分析等一系列复杂算法，依据不同的数据类型（如单 b 值、多 b 值的 DWI 数据，预处理前后的 T1W 数据）以及用户多样化需求（从新手的“一键式”

操作到资深研究者的个性化定制），精细调适算法参数，确保工具输出精准可靠。数据库管理模块，依据数据库原理设计包含多个关联表的 MySQL

数据库，引入分区表技术有效优化查询性能，充分考虑数据一致性与完整性，从容应对大规模脑影像数据集的存储与快速查询挑战。后续持续跟进工具的应用推广，与多所高校、医院的科研团队紧密合作，提供专业技术支持，广泛收集反馈意见，不断对工具进行迭代升级。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

基于qATP的大学生坚毅品质的神经结构影像研究

在神经科学研究中，理解个体心理特质（如坚毅）的神经基础对于优化教育策略、促进身心健康以及提升个人成就具有重要意义。坚毅 (grit) 作为一种对长期目标兼具兴趣一致和坚持努力的个人特质，已被证明在学业表现、心理健康等方面具有重要影响。然而，尽管坚毅的行为和心理学研究较为丰富，其神经基础的研究仍相对不足，尤其是关于白质微结构的研究较少。本案例通过应用沿纤维束统计工具 (Quantification Along Tract Profile, qATP)，结合多模态磁共振成像技术，探索了大学生坚毅特质的神经基础及其对学业表现的预测作用。

坚毅是个体在长期目标中保持兴趣和努力的能力。研究表明，坚毅不仅与学业成绩、教育水平呈正相关，还与心理健康、抗压能力等密切相关。然而，现有的坚毅神经基础研究主要集中在灰质区域，忽略了白质连接的关键作用。白质作为大脑信息传递的“高速公路”，其微

结构特性对个体的心理和行为表现具有深远影响。扩散磁共振成像（dMRI）技术能够量化白质微结构特性，为研究坚毅的神经基础提供了新的视角。

本研究采用qATP工具，结合多模态磁共振成像技术，探究了大学生坚毅特质的神经基础及其对学业表现的预测作用。选取108名大学生，采集其坚毅量表得分、学业成绩（GPA）以及磁共振成像数据。使用MRtrix3软件对白质纤维束进行分割和定量分析，计算DTI和NODDI模型衍生的微结构参数，如各向异性分数（FA）、平均扩散率（MD）、神经突密度指数（NDI）等。通过Pearson相关性分析，筛选出与坚毅显著相关的白质纤维束及其微结构特征。构建卷积神经网络（CNN）模型，利用提取的微结构特征和坚毅得分预测学业表现，并通过SHAP理论解释模型的决策过程。

结果表明，坚毅水平与学业成绩呈正相关，且性别和年龄对坚毅水平及学业成绩无显著影响。右侧弓状束（AF）、左侧钩束（UF）和左侧下额枕束（IFOF）的微结构特征与坚毅水平显著相关。具体而言，AF的MD与坚毅水平负相关，NDI与坚毅水平正相关；UF的ODI与坚毅水平正相关，NDI与坚毅水平负相关；IFOF的FWF与坚毅水平正相关。CNN模型能够有效预测学业表现，测试集的真实值与预测值显著相关（ $r=0.564$ ， $p=0.005$ ），预测误差在可接受范围内（ $RMSE=0.321$ ）。SHAP分析进一步揭示了不同微结构特征和坚毅水平在预测学业表现中的具体贡献。

本案例通过应用qATP工具，结合多模态磁共振成像技术，揭示了大学生坚毅特质的神经基础及其对学业表现的预测作用。研究发现，右侧AF、左侧UF和左侧IFOF的微结构特征与坚毅水平显著相关，且这些特征能够有效预测学业表现。通过SHAP解释器分析，研究进一步揭示了不同微结构特征和坚毅水平在预测学业表现中的具体贡献和重要性。本研究为坚毅的神经基础提供了新的证据，并为未来教育干预和学业成绩预测提供了新视角。

本案例展示了qATP工具在解决复杂工程问题中的实际应用，尤其是在神经科学研究中的潜力。通过结合多模态磁共振成像技术和机器学习模型，qATP工具不仅能够揭示心理特质的神经基础，还能够预测个体的行为表现。未来，随着数据规模的扩大和技术的进一步优化，qATP工具有望在更多领域发挥重要作用，为复杂工程问题的解决提供新的思路和方法。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
White matter microstructure alterations of the posterior limb of internal capsule in first-episode drug naive schizophrenia patients	国际期刊	2024年10月15日	Brain Research	2(共同第一)/6	SCI期刊收录
沿纤维束的白质微结构定量统计方法的流程优化及其应用	学位论文送审专家评审结果全优	2025年03月30日		1/1	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 88 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 85 分
本人承诺	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：李灵视</p>	

浙江大学研究生院 攻读硕士学位研究生成绩表

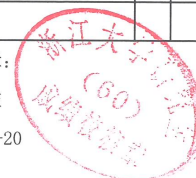
学号: 22260302	姓名: 李灵钰	性别: 女	学院: 工程师学院	专业: 电子信息	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 24.0学分	已获得: 30.0学分			入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	现代信号处理技术与应用		1.0	93	专业学位课	2022-2023学年秋冬学期	数据分析的概率统计基础		3.0	86	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	83	专业学位课	2022-2023学年冬季学期	智能化仪器软硬件系统设计与应用		1.0	75	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	神经影像数据挖掘与应用		2.0	96	专业选修课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	生物医学工程方法学		1.0	90	专业学位课	2022-2023学年春季学期	磁共振图像重建原理及算法		2.0	92	专业选修课
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	79	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	生理系统仿真与建模		2.0	88	专业选修课	2022-2023学年春季学期	智能医疗技术应用案例分析		1.0	98	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	91	公共学位课	2022-2023学年春夏学期	工程伦理		2.0	98	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	92	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	89	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	89	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。
2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-03-20





Research paper

White matter microstructure alterations of the posterior limb of internal capsule in first-episode drug naive schizophrenia patients

Qiuping Ding^{a,b,1}, Lingyu Li^{a,b,1}, Qiqi Tong^c, Hongjian He^{d,*}, Bin Gao^{e,*}, Ling Xia^a

^a Center for Brain Imaging Science and Technology, Key Laboratory for Biomedical Engineering of Ministry of Education, College of Biomedical Engineering and Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China

^b Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou, China

^c Research Center for Data Hub and Security, Zhejiang Lab, Hangzhou, China

^d School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China

^e Department of Psychiatry, The Second Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou, Zhejiang, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Neurite orientation dispersion and density imaging

Schizophrenia

Posterior limb of the internal capsule

Positive and negative syndrome scale

Neurite density index

ABSTRACT

Objectives: Previous studies have shown that microstructural alterations in white matter (WM) could contribute to the symptom manifestation and support the dysconnectivity hypothesis in schizophrenia patients. These alterations were pervasive, non-specific, and reported inconsistently across the literature. This study aimed to specifically investigate the microstructure alterations of the posterior limb of the internal capsule (PLIC) in first-episode, drug-naive schizophrenia patients. Utilizing a multicompartamental biophysical model, we further explored the correlation between these alterations and syndrome scale scores.

Methods: Thirty-two individuals with first-episode, drug-naive schizophrenia (FES) and thirty demographically matched healthy controls were enrolled. High-resolution multi-shell diffusion MRI data were collected, followed by the application of a three-compartment Neurite Orientation Dispersion and Density Imaging (NODDI) model to scrutinize the alterations in white matter microstructure. Changes in sensory and motor fibers within the PLIC were specifically focused on. Additionally, the correlation between these pathological changes and scores on the Positive and Negative Syndrome Scale (PANSS) was investigated.

Results: The Neurite density index (NDI) in the left PLIC was significantly lower in FES patients compared to healthy individuals, and positively correlated with PANSS positive syndrome scores ($r = 0.0379$, $p = 0.046$). In the sensory component (left superior thalamic radiation within PLIC, STR_P), the NDI was significantly elevated ($p < 0.0001$). Conversely, the NDI in the motor component (left corticospinal tract within PLIC, CST_P) was reduced ($p = 0.007$) in FES patients compared to healthy individuals, and strongly correlated with PANSS positive syndrome scores ($p < 0.020$) and PANSS total scores ($p < 0.045$). Moreover, the NDI deviation of STR from total PLIC ($f_{STR,P}$) and NDI deviation in STR_P and CST_P compared to PLIC region (f_{PLIC}) were significantly higher in FES patients than in healthy controls ($p < 0.00001$), with an area under the curve (AUC) of f_{PLIC} reaching 0.872.

Conclusion: The study's findings provided new insights into the discrepancy of white matter microstructure changes associated with the sensory and motor fibers in the PLIC region in FES patients. These results contribute to the growing body of evidence suggesting that WM microstructural alterations play a critical role in schizophrenia pathophysiology.

Abbreviations: AUC, area under the curve; CST, Corticospinal tract; CST_P, corticospinal tract in posterior limb of internal capsule region; DTI, Diffusion tensor imaging; FA, Fractional anisotropy; FES, first-episode, drug-naive schizophrenia; FOV, field of view; HC, healthy control; NDI, Neurite density index; NODDI, Neurite orientation dispersion and density imaging; PANSS, Positive and negative syndrome scale; PLIC, Posterior limb of the internal capsule; STR, superior thalamic radiation; STR_P, superior thalamic radiation in PLIC region; TA, Total acquisition time; TE, echo time; TR, Repeated time; f_{PLIC} , NDI deviation in STR_P & CST_P vs. PLIC region; $f_{CST,P}$, NDI deviation in CST_P vs. PLIC region; $f_{STR,P}$, NDI deviation in STR_P vs. PLIC region.

* Corresponding authors.

E-mail addresses: hhezju@zju.edu.cn (H. He), gaobin2017@zju.edu.cn (B. Gao), xialing@zju.edu.cn (L. Xia).

¹ Qiuping Ding and Lingyu Li contributed equally to this work.

<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2024.149114>

Received 3 May 2024; Received in revised form 19 June 2024; Accepted 5 July 2024

Available online 6 July 2024

0006-8993/© 2024 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

经检索《Web of Science》的《Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)》数据库，下述论文被《SCI-EXPANDED》收录。（检索时间：2025年3月28日）

第 1 条，共 1 条

标题:White matter microstructure alterations of the posterior limb of internal capsule in first-episode drug naive schizophrenia patients

作者:Ding, QP(Ding, Qiuping);Li, LY(Li, Lingyu);Tong, QQ(Tong, Qiqi);He, HJ(He, Hongjian);Gao, B(Gao, Bin);Xia, L(Xia, Ling);

来源出版物:BRAIN RESEARCH 卷:1841 文献号:149114 提前访问日期:JUL 2024

DOI:10.1016/j.brainres.2024.149114 **出版年:**OCT 15 2024

入藏号:WOS:001273558200001

文献类型:Article

地址:

[Ding, Qiuping; Li, Lingyu; Xia, Ling] Zhejiang Univ, Coll Biomed Engn & Instrument Sci, Ctr Brain Imaging Sci & Technol, Key Lab Biomed Engn, Minist Educ, Hangzhou, Zhejiang, Peoples R China.

[Ding, Qiuping; Li, Lingyu] Zhejiang Univ, Polytech Inst, Hangzhou, Peoples R China.

[Tong, Qiqi] Zhejiang lab, Res Ctr Data Hub & Secur, Hangzhou, Peoples R China.

[He, Hongjian] Zhejiang Univ, Sch Phys, Hangzhou, Zhejiang, Peoples R China.

[Gao, Bin] Zhejiang Univ, Sch Med, Affiliated Hosp 2, Dept Psychiat, Hangzhou, Zhejiang, Peoples R China.

通讯作者地址:

He, HJ (corresponding author), Zhejiang Univ, Sch Phys, Hangzhou, Zhejiang, Peoples R China.; Gao, B (corresponding author), Zhejiang Univ, Sch Med, Affiliated Hosp 2, Dept Psychiat, Hangzhou, Zhejiang, Peoples R China.

电子邮件地址:hhezju@zju.edu.cn; gaobin2017@zju.edu.cn; xialing@zju.edu.cn

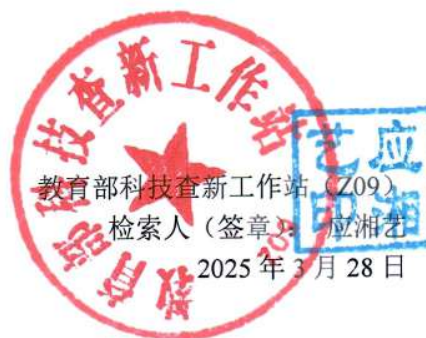
IDS 号:ZE2Q6

ISSN:0006-8993

eISSN:1872-6240

注:

1. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。
2. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。





专家姓名	评阅时间	总体评价	评阅结果
***		A (优秀)	同意答辩
***	2025-01-24	A (优秀)	同意答辩
***	2025-01-24	A (优秀)	同意答辩

最终判定结果: 同意答辩

评阅结果



学号: 22260302

姓名: 李灵钰

论文题目: 沿纤维束的白质微结构定量统计方法的流程优化及其应用

英文题目: Enhanced Quantification Along Tract Profile (qATP) for White Matter Micro-structure: Pipeline Optimization and Neuroimaging Application

评阅意见

* 评阅意见:

该论文针对沿纤维束的微结构定量统计方法中算法重测信度评估不充分、多种工具间兼容性和灵活性差等问题开展了多个方面研究。该论文选题为本工程领域的前沿问题,具有一定的代表性和先进性。该研究旨在解决dMRI分析过程相

* 不足之处及修改意见:

论文的结构合理,但研究内容、书写及图表的规范等需要提升,具体意见如下:
1.存在少量中英标点混用的情况。

* 总体评价:

A (优秀)

* 评阅结果:

同意答辩

返回

分类号： R318

单位代码： 10335

密 级： 公开

学 号： 22260302

浙江大学

硕士学位论文 (专业学位)



中文论文题目： 沿纤维束的白质微结构定量统计方法的
流程优化及其应用

英文论文题目： **Enhanced Quantification Along Tract
Profile (qATP) for White Matter Micro
structure: Pipeline Optimization and
Neuroimaging Application**

申请人姓名： 李灵钰

校内导师（组）： 何宏建

行业导师： 岳斌

专业学位类别、领域： 电子信息/生物医学工程

研究方向： 脑影像数据挖掘

培养类型： 全日制非定向

所在学院： 工程师学院

论文提交日期

 2025年3月10日

摘要

扩散磁共振成像（dMRI）能够在宏观尺度描绘大脑白质纤维束连接，并在微观尺度刻画大脑微结构特征。沿大脑纤维束的微结构定量统计方法可以准确捕捉大脑微结构特征在纤维束的局部变化，对于白质相关疾病和认知神经科学研究具有重要价值。近年来，随着 dMRI 成像质量的提升和分析算法的改进，沿纤维束的微结构定量统计流程得到极大丰富。同时，也伴随着各算法重测信度评估不充分、多种工具间兼容性和灵活性差等问题。为此，本文围绕沿纤维束的微结构定量统计方法开展了以下工作：

首先，针对沿纤维束定量统计中微结构参数生成、纤维束分割和沿纤维束统计三个关键步骤，开展了重测可靠性评估。研究发现，TractSeg 纤维束分割方法在多种微结构成像参数中均表现出较高的可靠性。对于其他纤维束分割方法，全脑纤维束追踪质量和截断纤维束的处理能提升可靠性。在沿纤维束采样方式中，虽然不同分段方法均具有较高的可靠性，但其定量结果存在差异。针对沿中心线分段方法，本研究提出将分段内加权平均的统计策略，进一步提升了该分段方法可靠性。

其次，首次将沿纤维束定量统计方法应用于大学生群体中坚毅水平的神经基础研究，揭示了右侧弓状束、左侧钩束和左侧下额枕束中部分区域的微结构特征与坚毅水平的显著相关性。此外，上述微结构特征和坚毅水平能够有效预测学业表现，并能通过解释器揭示上述特征的贡献和重要性。模型对两年后学业水平的预测能力进一步证明了白质微结构特征及坚毅水平的长期效应。这些发现验证了沿纤维束定量统计方法在神经科学问题中的应用价值，为学业表现预测和教育干预提供新的视角。

最后，开发了一款集成化的沿纤维束定量统计工具 qATP，支持从数据预处理到定量结果数据分析。qATP 构建了统一的接口和用户友好的前端界面，整合多种沿纤维束定量方法及其参数，并建立了标准化的数据库，显著提升了数据交换的效率和跨平台兼容性。qATP 工具不仅实现了便捷“一键式”操作，还提供了灵活的高级自定义选项，能够满足多样化的研究需求。该工具已在多个科研项目中得到应用，为神经影像挖掘提供了高效、可靠的分析平台。

关键词：扩散磁共振成像；大脑纤维束；微结构；定量统计；重测可靠性

目 录

致 谢	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
目 录	V
图 目 录	VIII
表 目 录	X
缩 写 表	XI
1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本文研究内容与贡献	5
1.4 本文章节安排	7
2 基本理论和方法	9
2.1 微结构成像原理	9
2.1.1 扩散加权成像	9
2.1.2 基于 dMRI 的建模方法	9
2.2 纤维束分割原理	11
2.3 沿纤维束统计原理	13
2.4 本章小结	15
3 沿纤维束分析的大脑微结构定量统计方法可靠性研究	17
3.1 引言	17
3.1.1 研究背景	17
3.1.2 研究方法概要	17
3.2 研究方法	18
3.2.1 实验数据与预处理	18

3.2.2	微结构参数计算	19
3.2.3	纤维束分割方法	19
3.2.4	沿纤维束采样策略	20
3.2.5	可靠性评价指标	21
3.3	研究结果	22
3.3.1	纤维束分割方法对比	22
3.3.2	纤维束采样方法对比	29
3.4	讨论	33
3.4.1	DTI 和 NODDI 微结构参数在沿纤维束定量中的稳定性	33
3.4.2	纤维束分割对微结构定量结果的影响	33
3.4.3	沿纤维束采样方式对微结构定量结果的影响	34
3.4.4	局限性与展望	35
3.5	本章小结	35
4	大学生坚毅品质的神经结构影像研究探索	37
4.1	引言	37
4.1.1	研究背景	37
4.1.2	研究方法概要	39
4.2	研究方法	39
4.2.1	被试与实验步骤	39
4.2.2	行为学数据采集	39
4.2.3	磁共振数据采集与预处理	41
4.2.4	沿纤维束分析	41
4.2.5	影像-行为相关性分析	42
4.2.6	基于 CNN 的学业表现预测	42
4.3	研究结果	43
4.3.1	行为学测量结果	43
4.3.2	影像-行为学相关性分析	43
4.3.3	学业表现预测	44
4.4	讨论	48

4.4.1 坚毅的大脑微结构基础	48
4.4.2 坚毅和白质微结构对学业表现的影响	50
4.4.3 沿纤维束统计的积极意义	51
4.4.4 局限性与展望	51
4.5 本章小结	52
5 沿纤维束分析的大脑结构定量统计工具	53
5.1 引言	53
5.1.1 需求分析	53
5.1.2 设计内容及目标	54
5.2 系统框架和模块搭建	54
5.2.1 前端界面	55
5.2.2 算法处理	57
5.2.3 数据库管理	59
5.3 沿纤维束定量统计工具应用示例	60
5.3.1 “一键式”基础应用	60
5.3.2 高级模块化应用	62
5.4 本章小结	64
6 总结与展望	65
6.1 工作总结	65
6.2 不足与展望	66
参考文献	69
作者简介及在学期间主要研究成果	77

图 目 录

图 1-1	大脑微结构沿纤维束差异（左）与高速公路车流差异（右）的类比 ^[6]	2
图 1-2	本文研究内容.....	7
图 2-1	水分子扩散模式与 DTI 模型微结构成像原理 ^[33]	10
图 2-2	NODDI 模型微结构成像原理 ^[34]	11
图 2-3	纤维束分割方法 ^[8,27,35]	12
图 2-4	沿纤维束统计原理.....	14
图 3-1	沿纤维束定量统计方法可靠性评估流程.....	18
图 3-2	使用 waypoint ROI 截断纤维束（以左侧 ILF 为例）.....	20
图 3-3	针对 centerline 纤维束分段方法的分段内统计策略.....	21
图 3-4	全脑纤维束追踪参数对定量结果的影响（以左侧 IFO 为例）.....	23
图 3-5	不同纤维束分割方法在重复扫描间的纤维束 3D 可视化比较.....	24
图 3-6	纤维束形态学差异对定量结果的影响.....	26
图 3-7	截断后不同纤维束分割方法间的 ACIP.....	26
图 3-8	纤维束截断操作对统计结果的影响.....	27
图 3-9	纤维束截断操作对统计结果的影响.....	28
图 3-10	分段策略对统计结果的影响.....	30
图 3-11	不同分段策略下右侧 UF 沿纤维束对 FA 定量的 Bland-Altman 图.....	30
图 3-12	不同分段策略下左侧 IFO 沿纤维束对 FA 定量结果.....	31
图 3-13	分段内统计方法对统计结果的影响.....	32
图 3-14	对 centerline 加权平均前后右侧 UF 沿纤维束对 FA 定量的 Bland-Altman 图.....	32
图 4-1	坚毅神经基础研究技术路线.....	40
图 4-2	沿纤维束微结构定量特征与坚毅水平相关性.....	45
图 4-3	基于微结构特征和坚毅水平的学业水平预测.....	46
图 4-4	基于 SHAP 的预测模型解释.....	46
图 4-5	预测模型 SHAP 值与预测结果相关性检验.....	47
图 4-6	CNN 模型对第三年学业水平（GPA-2）的预测.....	47

图 5-1	qATP 系统框架.....	55
图 5-2	qATP 界面设计.....	56
图 5-3	qATP 主要处理流程.....	58
图 5-4	系统数据库设计方案.....	60
图 5-5	qATP 输出结果.....	61
图 5-6	qATP 模块化应用及成果.....	63

1 绪论

1.1 研究背景与意义

扩散磁共振成像（diffusion magnetic resonance imaging, dMRI）通过检测组织内水分子微观扩散行为，既能够在宏观尺度描绘大脑白质纤维束连接，又能够在微观尺度刻画大脑微结构特征^[1]。由 dMRI 获得的特征组织参数被广泛应用于定量分析白质微结构变化，描绘白质中水分子扩散特性、髓鞘完整性、纤维密度等参数，被认为是白质相关疾病诊断、分期分型与疗效评估的潜在影像标志物。大量临床相关研究表明，包括阿尔茨海默症和帕金森病等在内的神经系统疾病都存在显著的大脑扩散微结构信号改变和白质纤维完整性异常^[2,3]。这些微结构特征不仅与神经系统疾病的发生和发展密切相关，还与认知功能、情绪调节等行为学指标存在显著关联^[4,5]。因此，对大脑微结构特征的统计分析显得尤为重要，有助于理解神经退行性疾病、认知障碍以及情绪失调等疾病的潜在机制。

既往研究多集中在体素层面，通过将个体的磁共振脑影像配准到标准空间，再进行逐个体素的微结构特征比较，但这种方法在边缘部位容易受到配准误差的影响，同时也受到健康和疾病状态中纤维束位置解剖变异性的制约。此外，也有研究针对单个大脑纤维束分析，但通常对整个白质纤维束区域的微结构参数平均。然而，微结构特征不是沿纤维束平均分布的，对整个纤维束的微结构进行平均可能会掩盖潜在的重要信息。正如图 1-1 中展示的，就像行驶在高速公路上不同车速的车流，大脑微结构沿纤维束具有不同的分布特征^[6]。引起这种差异的一个原因是纤维束交叉区域的存在，这使得该处各向异性分数等特征降低，另外神经纤维会在纤维束的不同位置进出也会引起微结构特征的改变。如果起关键作用的轴突只存在于纤维束某一位置，那么关注这部分的微结构特征将对整个纤维束进行平均更加敏感。因此，沿纤维束统计微结构特征有助于识别纤维束内的局部变化，进一步揭示纤维束在不同位置上的微结构差异。

综上所述，沿纤维束的微结构定量统计可以更准确地捕捉到微结构特征在纤维束不同部位的变化，揭示神经系统中的微观结构差异。因此，发展和应用这种统计分析方法，对于提高白质相关疾病的诊疗水平和推动认知神经科学研究的深入具有重要价值。

6 总结与展望

扩散磁共振成像 (dMRI) 技术通过捕捉水分子微观扩散行为, 为研究大脑白质纤维束连接和微结构特征提供了强大工具。近年来, 沿纤维束的微结构定量统计方法逐渐成为研究热点, 其通过分析纤维束内局部微结构特征的变化, 克服了传统体素层面分析中配准误差和解剖变异性的局限, 显著提升了分析的灵敏性和准确性。这些方法在神经退行性疾病、认知障碍及情绪失调等疾病的机制研究中展现出重要价值。然而, 当前沿纤维束定量统计方法仍面临可靠性评估不足、工具兼容性差等问题, 尤其是在高阶模型的应用和跨平台工具的开发方面亟待改进。

6.1 工作总结

本研究围绕“沿纤维束的微结构定量统计方法研究与应用”这一课题, 针对当前沿纤维束定量分析中存在的可靠性评估不充分、工具普适性不足等问题, 开展了系统性研究, 并取得以下主要成果:

1) 沿纤维束定量统计方法的优化与可靠性评估

首先, 针对沿纤维束定量统计中微结构参数生成、纤维束分割和沿纤维束采样三个关键步骤, 开展了可靠性评估。研究发现, TractSeg 纤维束分割方法在 FA 和 NDI 等多种微结构成像参数中均表现出较高的可靠性。对其他纤维束分割方法, 全脑纤维束追踪质量和截断纤维束的处理提升可靠性。在沿纤维束采样方式中, 虽然不同分段方法均具有较高的可靠性, 但其定量结果存在差异。特别地, 针对 centerline 分段方法, 本研究提出将分段内加权平均的统计策略, 进一步提升了该分段方法可靠性。

2) 神经科学问题应用: 坚毅品质的神经结构影像研究

其次, 本研究首次将沿纤维束定量统计方法应用于健康大学生群体中坚毅水平的神经基础研究, 揭示了右侧弓状束、左侧钩束和左侧下额枕束中部分区域的微结构特征与坚毅水平的显著相关性。此外, 上述微结构特征和坚毅水平能够有效预测学业表现, 并通过 SHAP 解释器揭示了各特征的贡献和重要性。模型对两年后学业水平 (GPA-2) 的预测能力进一步证明了白质微结构特征及坚毅水平的长期效应。这些发现不仅验证了沿纤维束定量统计方法在神经科学问题中的应用价值, 也为学业表现预测和教育干预提供了新的视角。

3) 工具开发: qATP (Quantification Along Tract Profile)

最后,本研究开发了一款集成化的沿纤维束定量统计工具 qATP,支持从数据预处理到定量结果数据分析。①针对大规模脑影像数据的处理和分析问题,qATP整合了数据预处理和神经科学分析功能,实现了标准化的自动化处理流程,显著提升了操作便捷性和效率。②针对不同层次用户的需求,qATP采用模块化设计,支持用户根据需求调整分析参数,同时优化了用户界面,使其更易于操作和扩展。③针对不同数据来源的兼容性和数据安全问题,qATP引入了标准化的数据处理和存储机制,确保不同用户可以在统一的标准下共享和分析数据,并保证数据安全性。④针对多模态数据的处理和分析需求,qATP支持多模态数据的处理和分析,结合复杂的分析功能,能够为多模态数据的处理和分析提供全面支持。qATP构建了统一的接口和用户友好的前端界面,整合多种沿纤维束定量方法及其参数,并建立了标准化的数据库,显著提升了数据交换的效率和跨平台兼容性。qATP工具不仅实现了便捷“一键式”操作,还提供了灵活的高级自定义选项,能够满足多样化的研究需求。该工具已在多个科研项目中得到应用,为神经影像学研究提供了高效、可靠的分析平台。

6.2 不足与展望

在可靠性评估和应用研究方面仍存在数据样本的局限性。可靠性研究部分所使用的数据集虽然质量较高(如 HCP-TR),但被试数量较少,且数据采集条件较为理想化,缺乏对普通临床数据或低质量数据的适应性验证。这种局限性可能影响研究结果的普适性和外推性。未来研究应扩大样本范围,纳入更多样化的群体(如不同年龄段、不同文化背景以及特殊人群),并开展大队列研究,以验证本研究发现的普遍性和可靠性。特别是针对临床数据,未来可以探索在不同数据质量条件下的适用性,进一步提升方法的鲁棒性。同样地,本研究的神经科学应用部分主要基于健康大学生群体,样本量相对有限,且未涵盖其他年龄段或特殊人群。未来研究可以扩大样本范围,进一步验证研究结果的普适性。

在算法优化和工具开发方面,还应着眼于以下几点:(1)注重多模态数据整合。本研究主要基于 dMRI 数据进行分析,未来可以结合其他模态数据(如 fMRI),从多维度揭示大脑结构与功能的关系,为神经科学研究提供更全面的视角。例如, RadTract 工具已经整合了纹理信息等影像组学特征,提供了更丰富的微结构信息^[15]。未来可以借鉴

此类方法，将功能连接、脑电活动等多模态数据与白质微结构特征联合分析，从而更全面地揭示大脑网络的复杂性和动态性。(2) 工具箱功能的扩展与兼容性、运行效率提升。尽管 qATP 工具已具备较完善的功能，但仍需进一步优化用户体验和计算效率。未来可以增加更多微结构模型的支持。丰富纤维束分割方法和微结构建模方法接口，以适应日新月异的技术发展。探索与其他神经影像分析工具的兼容性，进一步提升工具的普适性和实用性。面对大量的神经影像分析需求，应当增强计算效率，通过并行计算和分布式计算技术，提升工具的计算效率，以应对大规模数据的分析需求。(3) 在系统安全性上，将前后端一体架构改进为前后端分离架构，加入用户登录和 API 网关等模块，便于管理和维护，确保数据安全性。进一步地，出于商业化考虑和人体信息伦理要求，应引入端到端加密、数据加密传输以及多重身份验证机制，有效保障数据安全性。(4) 在界面设计上，未来可以丰富预览界面功能，结合 Fury 等工具包，将可视化预览界面由 2D 层面预览扩增至 3D 预览与交互。此外，当前参数设置界面较简单，后续通过设计合理的菜单结构和功能布局，减少用户的学习成本。

此外，还应重视对应用价值的深入挖掘。尽管本研究揭示了白质微结构特征与坚毅水平及学业表现的关系，但其应用价值仍有待进一步挖掘。未来研究可以探索以下方向：(1) 临床诊断与治疗：开发基于白质微结构特征的疾病诊断模型或疗效评估指标，为神经退行性疾病和精神疾病的早期诊断和个性化治疗提供支持。(2) 认知训练与干预：通过分析白质微结构特征的变化，评估认知训练或行为干预的效果，为提升认知功能和学业表现提供科学依据。(3) 跨学科研究：结合基因组学、行为学和神经影像学等多学科数据，探讨白质微结构特征的遗传基础及其与行为特征的关系，为精准医学和个性化教育提供新的思路。