



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 质子笔形束算法研究及其在 DeepPlan系统中的临床测试

张增鹏

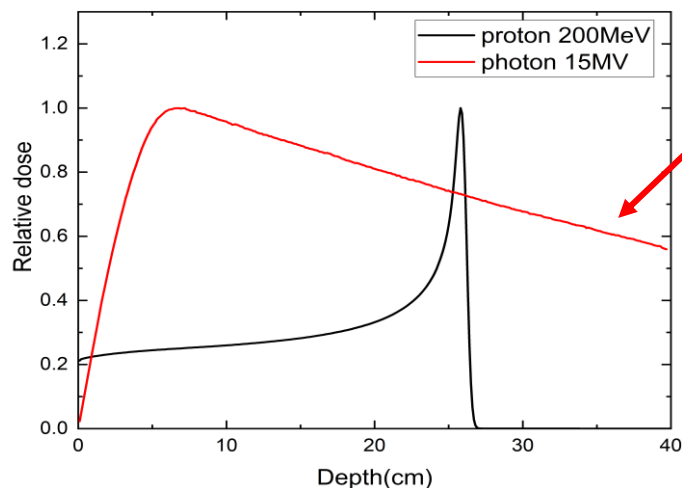
指导老师：徐榭 教授 裴曦 副教授

企业导师：顾先宝 高级工程师

中国科学技术大学 核科学与技术学院

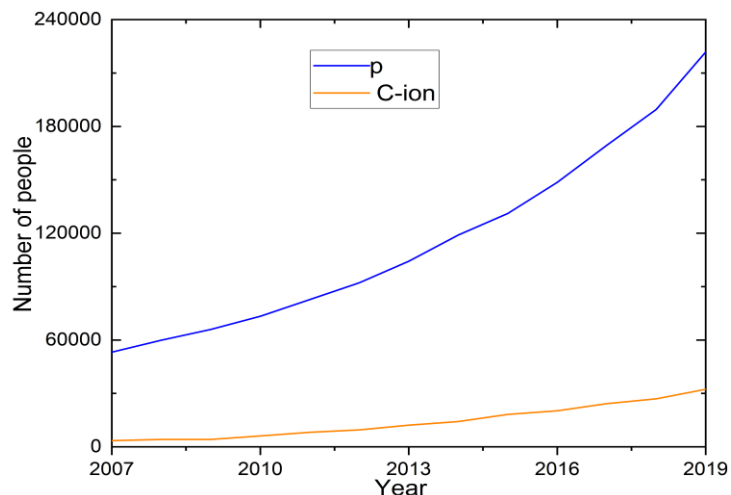
2021年05月20日

## 1.1 质子放疗快速发展



不利于保护肿瘤  
后端器官组织

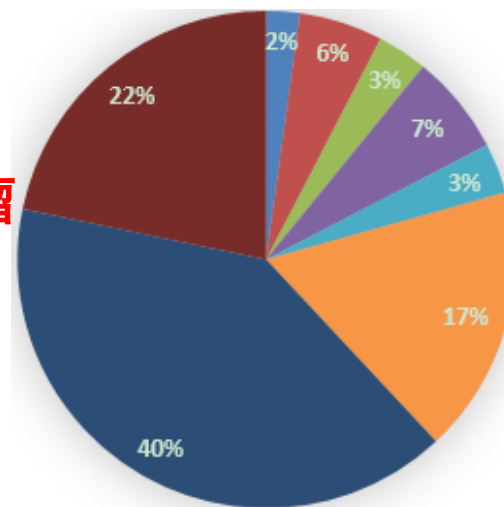
图1.1:质子治疗的优势



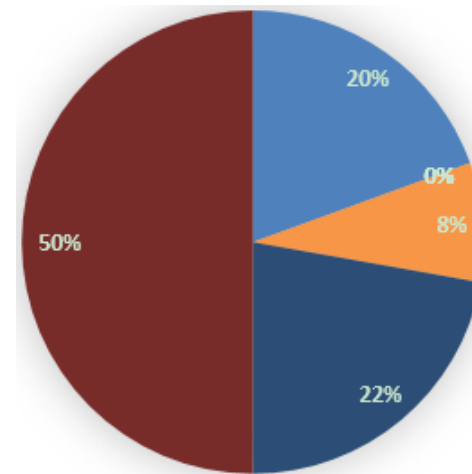
增长迅速

增长缓慢

图1.2:PTCOG-Patient Statistic



a: 在运行



b: 在建

图1.3:PTCOG-Facilities Statistic

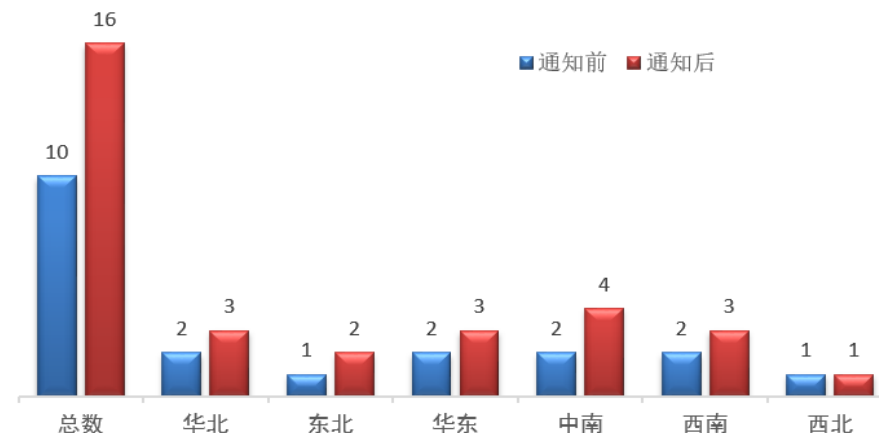


图1.4:“卫健委”质子放射治疗最新规划

## 1.2 质子放疗技术

### 1 被动散射 ★

- 散射体扩展照射野
- 能量调制器
- 需要外加准直器
- 射程补偿器
- 末端适形

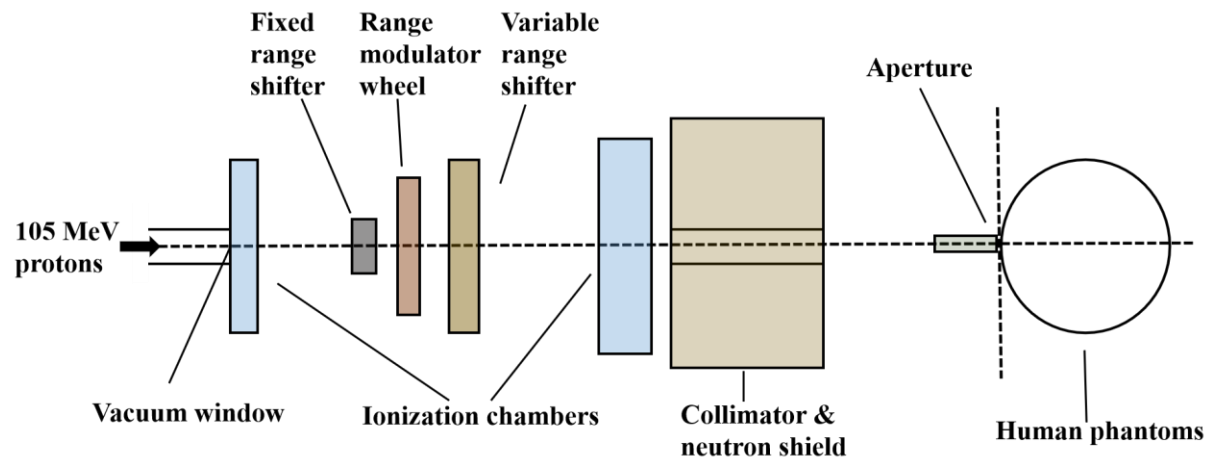


图1.4:IBA加速器单散射示意图

### 2 笔形束扫描 ★ ★ ★

- 将靶区分成若干层
- 每一层分为若干点
- 用质子束扫描靶区
- 前后两端适形

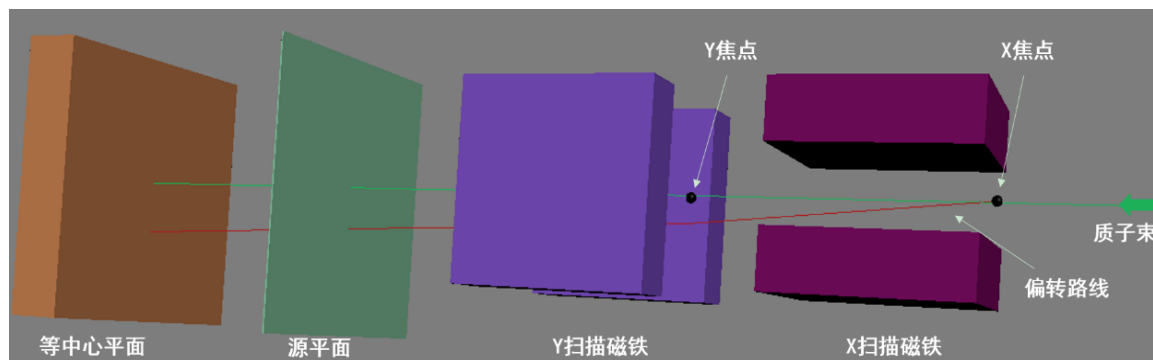


图1.5:笔形束扫描质子放疗示意图



## 1.3 国内外研究现状——质子治疗计划系统

国外	瑞典	Research RayStation	国内	中科大	核医学物理研究所
	美国	Varian Eclipse			DeepPlan
	美国	Elekta Xio		中科院	核能安全技术研究所
	荷兰	Philips Pinnacle			KylinRay
	.....			中科院	上海应用物理研究所
					Plateau

笔形束算法：算法简单，计算速度快→解析算法主流

现状：国产质子放疗系统开展的临床对比实验较少



## 课题目的

研究质子笔形束算法，开发DeepPlan质子剂量计算模块，并在DeepPlan系统中进行临床测试

## 课题任务

1. 建立基于UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型的质子模块
2. 将计算结果与UFHPTI临床测量数据进行对比分析
3. 将计算结果与RayStation临床病例结果进行对比分析



## 2 材料与方法

### 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

#### 2.1.1 笔形束算法

单个质子

积分深度剂量

多库伦散射

$$d(x, y, z, x_0, y_0, E) = IDD \times [(1 - w) \times \Phi_{mcs} + w \times \Phi_{nuc}] \quad (2-1)$$

$$\Phi_{mcs} = G_{mcs} + \delta_{mcs} \quad (2-23)$$

核散射权重

核散射

$$G_{mcs} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sigma_{mcs}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{mcs}^2}\right) \quad (2-3)$$

← 横向高斯分布

$$\delta_{mcs} = \frac{1}{2 \times \pi \times c_{mcs}^2} \exp\left(-\frac{c_{mcs}^2}{\sigma_{mcs}^2}\right) \quad (2-25)$$

← 散射修正项

质子束

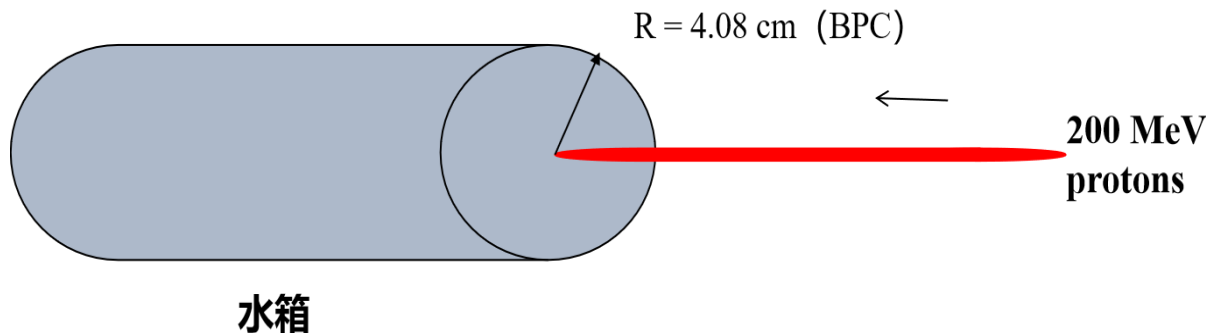
$$D(x, y, z, \sigma) = \sum d(x, y, z, \sigma) \quad (2-2)$$

### 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

#### 2.1.2 构建数据库

源模型（刘红冬 2019）

IDD数据库



0.1 MeV能量间隔

0.1 cm距离间隔

400 × 1801

多库伦散射数据库

图2.4 IDD蒙卡模拟示意图

Fermi-Eyges理论

$$\sigma_{mcs}^2(z) = C_0 z^2 + 2B_0 z + A_0 + \int_0^z (z - z')^2 T(z') dz' \quad (2-5)$$

Highland、Gottschalk

$$\sigma_{mcs}^2(z) = C_0 z^2 + 2B_0 z + A_0 + \sigma_{HL}^2 \quad (2-9)$$

0.1 MeV能量间隔

0.1 cm距离间隔

500 × 1801

刘红冬. 2019. 基于蒙特卡罗算法的质子放疗独立剂量验证方法与系统研究[D]. 合肥. 中国科学技术大学.

Highland V. 1975. Some practical remarks on multiple scattering. Nuclear Instruments & Methods, 129(2), 497-499.

Gottschalk B, 2012. Physics of proton interactions in matter. Proton therapy physics[M]. CRC press, Edited by Harald Paganetti.



### 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

#### 2.1.2 构建数据库

##### 核散射数据库

0.1 MeV能量间隔

0.1 cm距离间隔

500 × 1801

$$w_{nuc}(z_{eq}, E_0) = 0.052 \cdot \log \left( 1.13 + \frac{z_{eq}}{11.2 - 0.023 \cdot R_B} \right) + 0.35 \frac{0.0017 \cdot R_B^2 - R_B}{(R_B + 3)^2 - z_{eq}^2} - 1.61 \times 10^{-9} \cdot z_{eq} \cdot (R_B + 3)^2 \quad (2-14)$$

$$\sigma_{nuc}^0(z_{eq}, E_0) = 2.85 + 0.0014 \cdot R_B \cdot \log(z_{eq} + 3) + 0.06 \cdot z_{eq} - 7.4^{-5} \cdot z_{eq}^2 - 0.22 \frac{R_B}{(z_{eq} - R_B - 5)^2} \quad (2-15)$$

$$\sigma_{nuc}^{cor}(z_{eq}, E_0) = (1 + c_0 e_0) \sigma_{nuc}^0(z_{eq}, E_0) \quad (2-16)$$

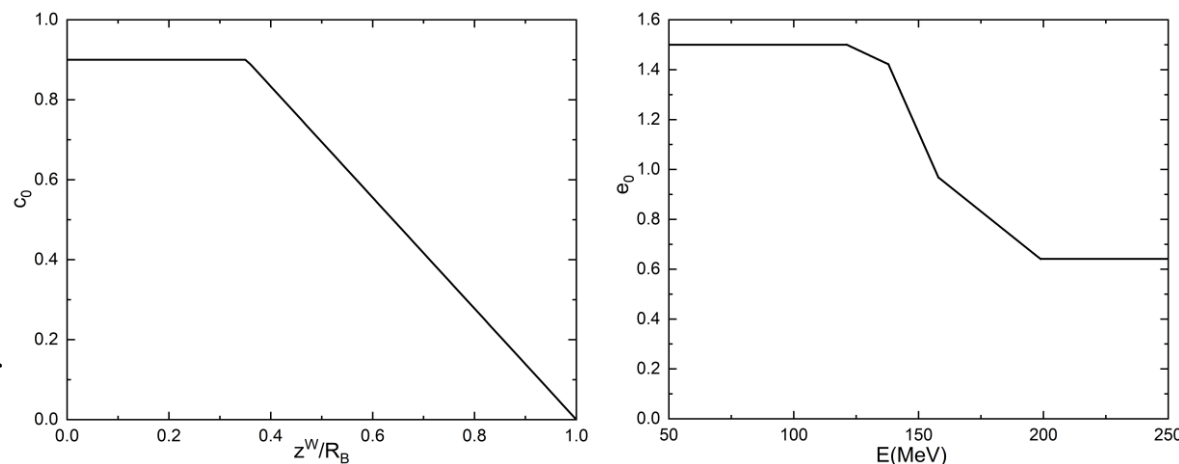


图2.3 用于核散射的校准因子

Soukup M, Fippel M and Alber M. 2005. A pencil beam algorithm for intensity modulated proton therapy derived from Monte Carlo simulations[J]. Physics in Medicine and Biology, 50: 5089-5104.



## 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

### 2.1.3 质子模块编程

#### 光线追踪

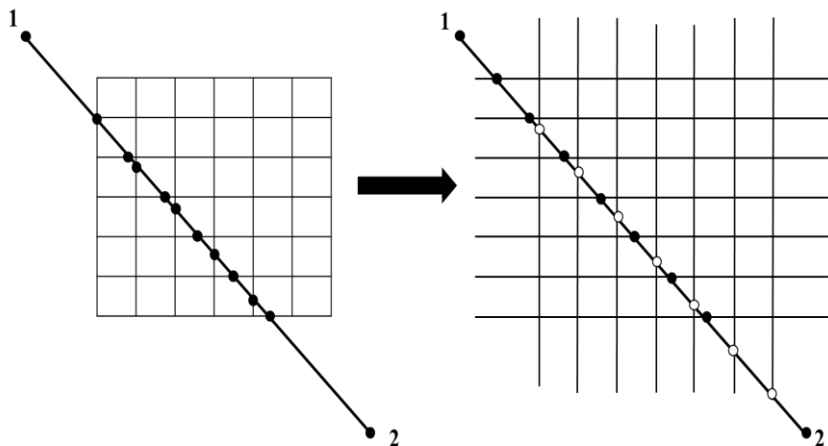


图2.5 快速光线追踪示意图

#### 坐标转换

$$[V]_G = R_Y(\theta_G)[V]_F \quad (2-20)$$

$$R_Y(\theta_G) = \begin{pmatrix} \cos\theta_G & 0 & -\sin\theta_G \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_G & 0 & \cos\theta_G \end{pmatrix} \quad (2-21)$$

#### 绝对剂量

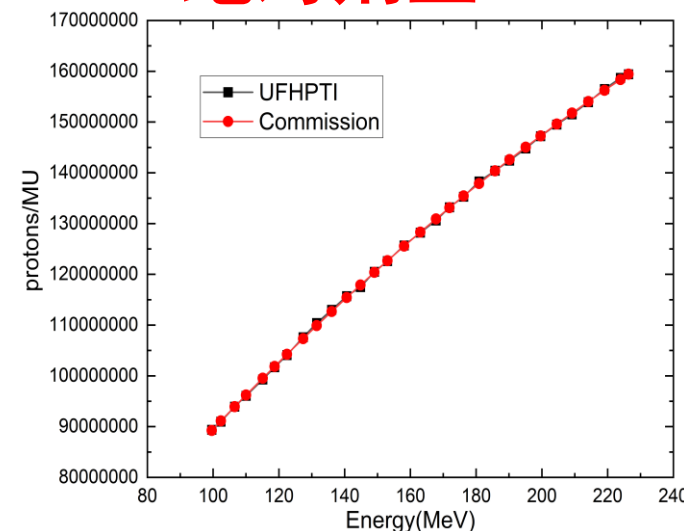


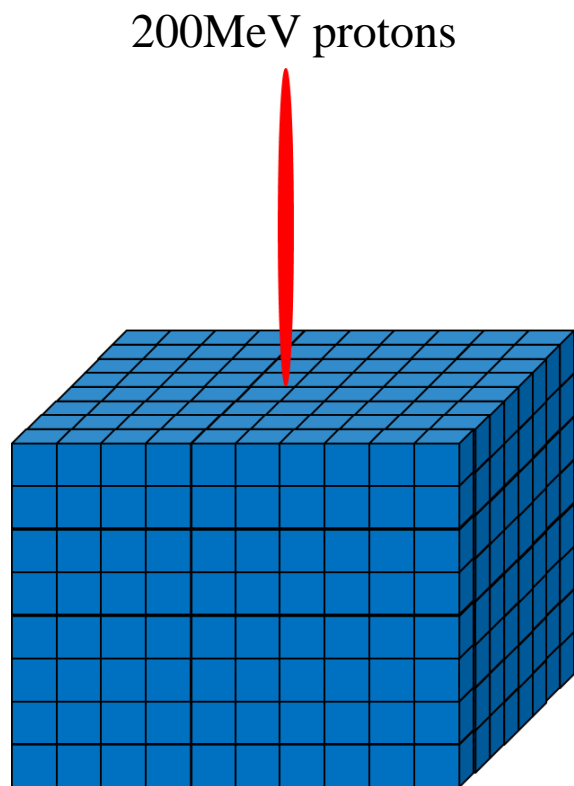
图2.7 单位MU对应的质子数

Han G, Liang Z and You J. 1999. A fast ray-tracing technique for TCT and ECT studies[C]. Nuclear Science Symposium, 3: 1515-1518.  
Siddon RL. 1998. Solution to treatment planning problems using coordinate transformations[J]. Medical Physics, 8(6).

## 2 材料与方法

### 任务二：计算UFHPTI临床测量数据

#### 2.2.1 计算IDD

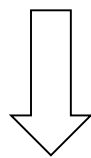


30组能量

体模  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}^3$

体素  $1 \times 1 \times 1 \text{mm}^3$

材料 水



每个平面求和——IDD

图2.9：IDD计算示意图

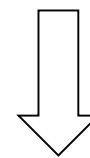
#### 2.2.2 计算空气中质子束斑大小

30组能量

体模  $40 \times 40 \times 400 \text{mm}^3$

体素  $0.5 \times 0.5 \times 1 \text{mm}^3$

材料 空气



选取五个位置——matlab高斯拟合

## 2 材料与方法

### 任务二：计算UFHPTI临床测量数据

#### 2.3.3 计算SOBP和横向剂量

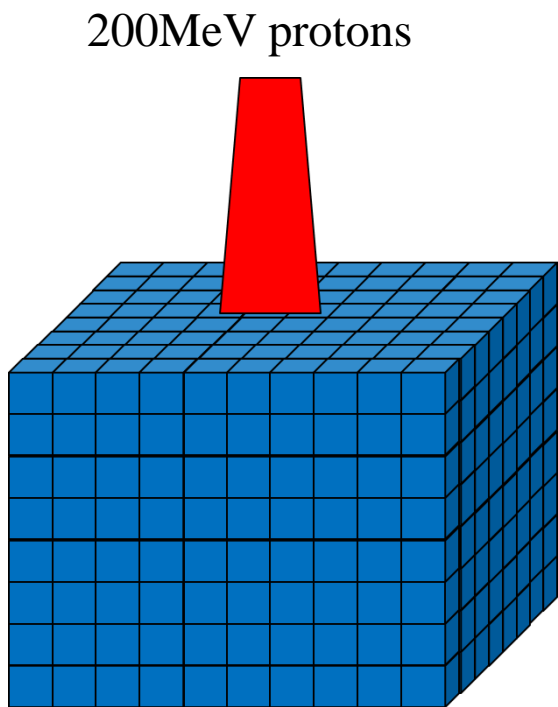


图2.11：SOBP计算示意图

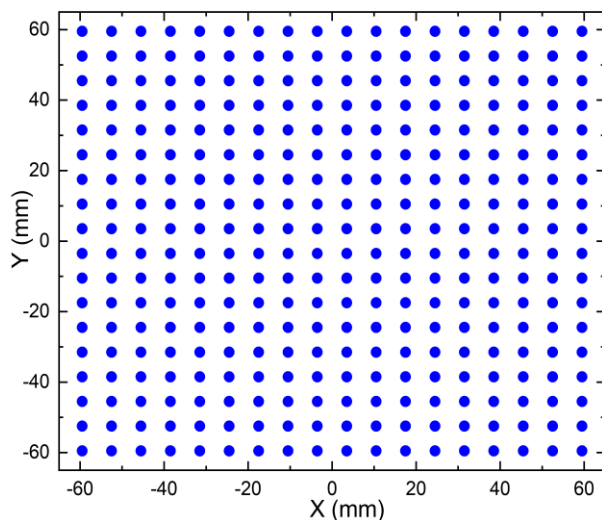


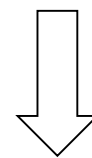
图2.12 等中心平面束斑位置示意图

20组能量层 6480个质子束

体模  $200 \times 200 \times 400 \text{mm}^3$

体素  $2 \times 2 \times 2 \text{mm}^3$

材料 水



纵向：

对垂直于质子束流平面求和——SOBP

横向：

距离体模表面15cm处——等中心平面



## 任务三：计算临床病例

### 3.1.1 剂量计算过程

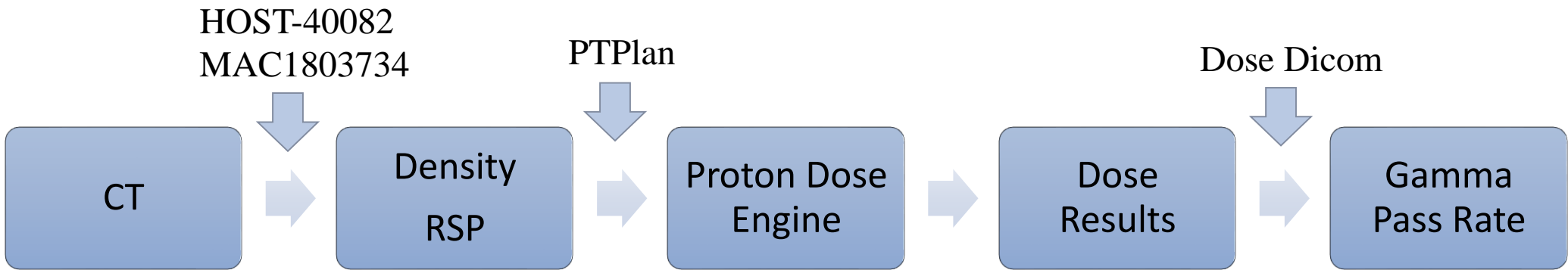


图2.13：临床病例计算流程

表2.1：临床病例情况介绍

序号	肿瘤类型	射束方向	质子总数
病例1	前列腺癌	270°   90°	1039   977
病例2	前列腺癌	270°   90°	1307   1303
病例3	前列腺癌	270°   90°	1626   1624
病例4	头部肿瘤	90°   180°	300   321
病例5	头部肿瘤	180°   260°   100°	626   585   633

## 任务三：计算临床病例——剂量验证过程

### 3.1.1 剂量验证过程

#### 伽马分析

评估点      参考点

$$\Gamma(\vec{r}_e, \vec{r}_r) = \sqrt{\frac{\alpha^2(\vec{r}_e, \vec{r}_r)}{\Delta d^2} + \frac{\delta^2(\vec{r}_e, \vec{r}_r)}{\Delta D^2}} \quad (2-32)$$

$$\gamma(e) = \min\{\Gamma(\vec{r}_e, \vec{r}_r)\} \forall \{\vec{r}_r\} \quad (2-33)$$

- $\gamma(e) < 1$ ，通过伽马分析

#### DVH(Dose Volume Histogram)

横坐标：剂量，cGy

95%的靶体积达到处方剂量

纵坐标：体积百分比，即特定区域中有多少体积接受的剂量大于或等于x轴标明的剂量

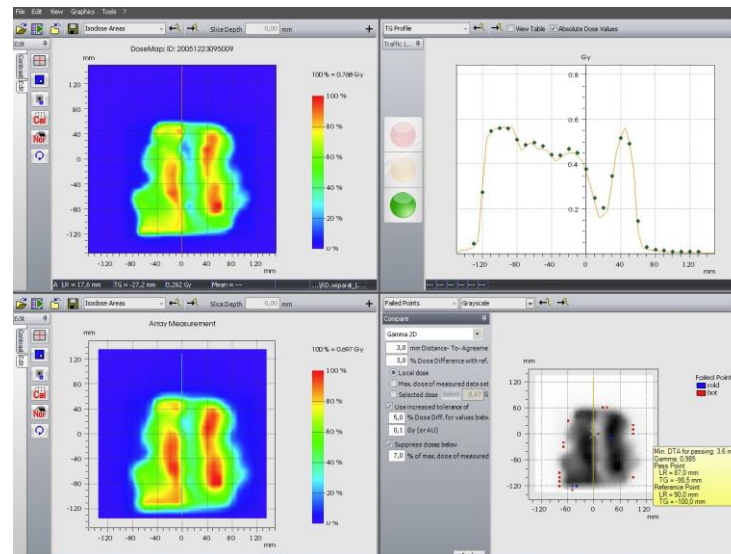


图2.14: VeriSoft主界面图

## 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

### 3.1.1 构建完整的数据库

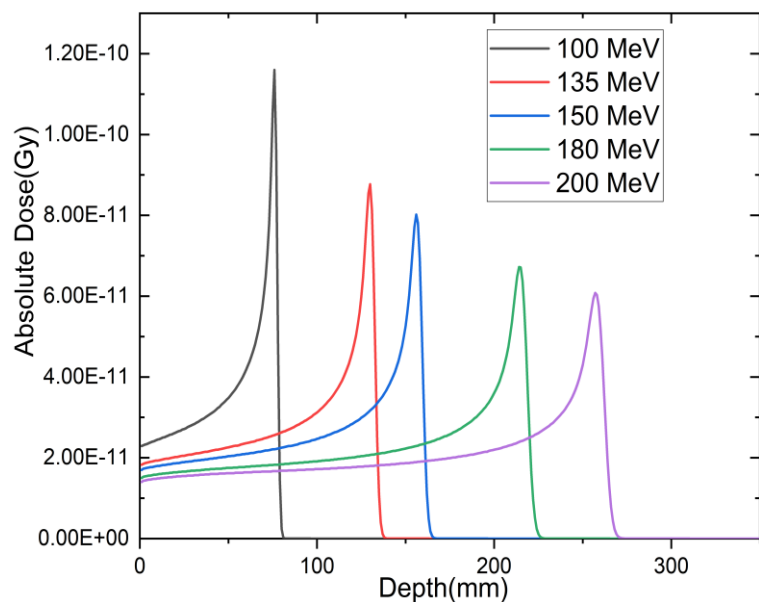


图3.1 五种不同能量的IDD数据曲线

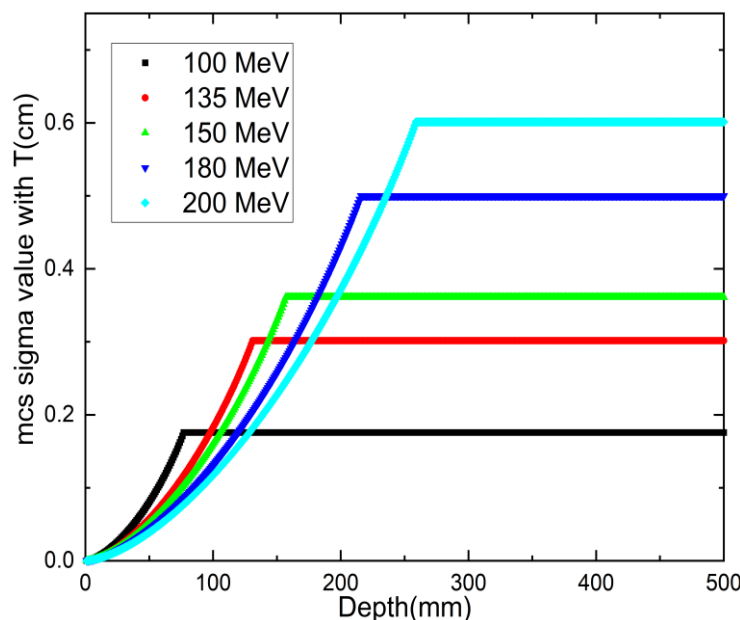


图3.3 多库伦散射数据曲线图

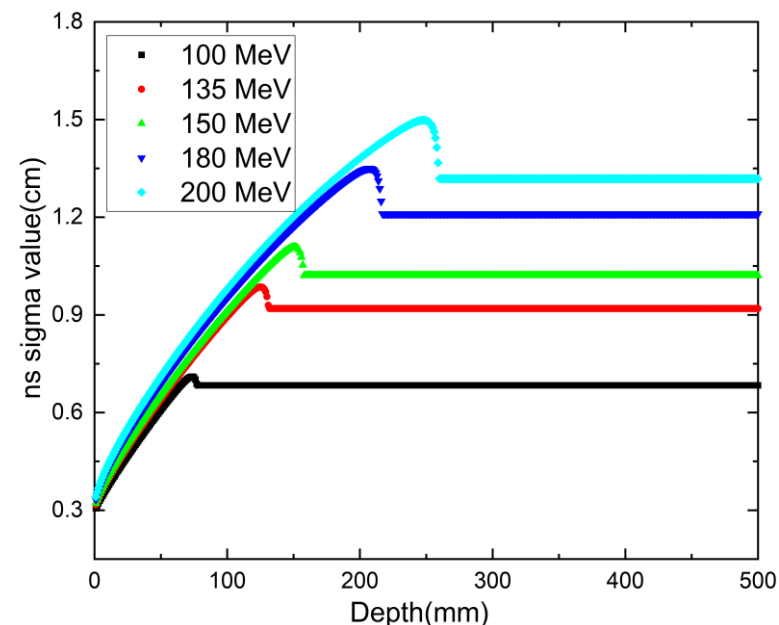


图3.4 核散射数据曲线图



## 任务一：构建UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型

### 3.1.2 DeepPlan质子模块

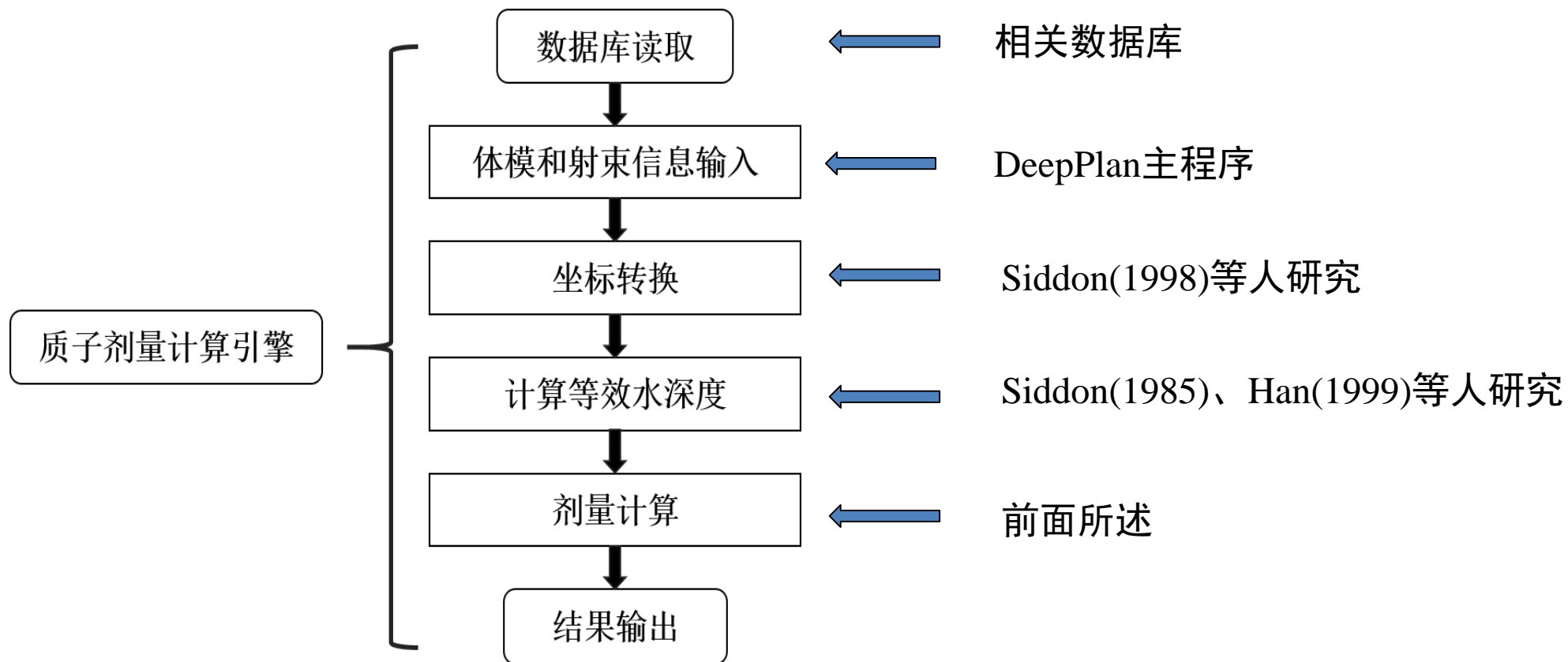


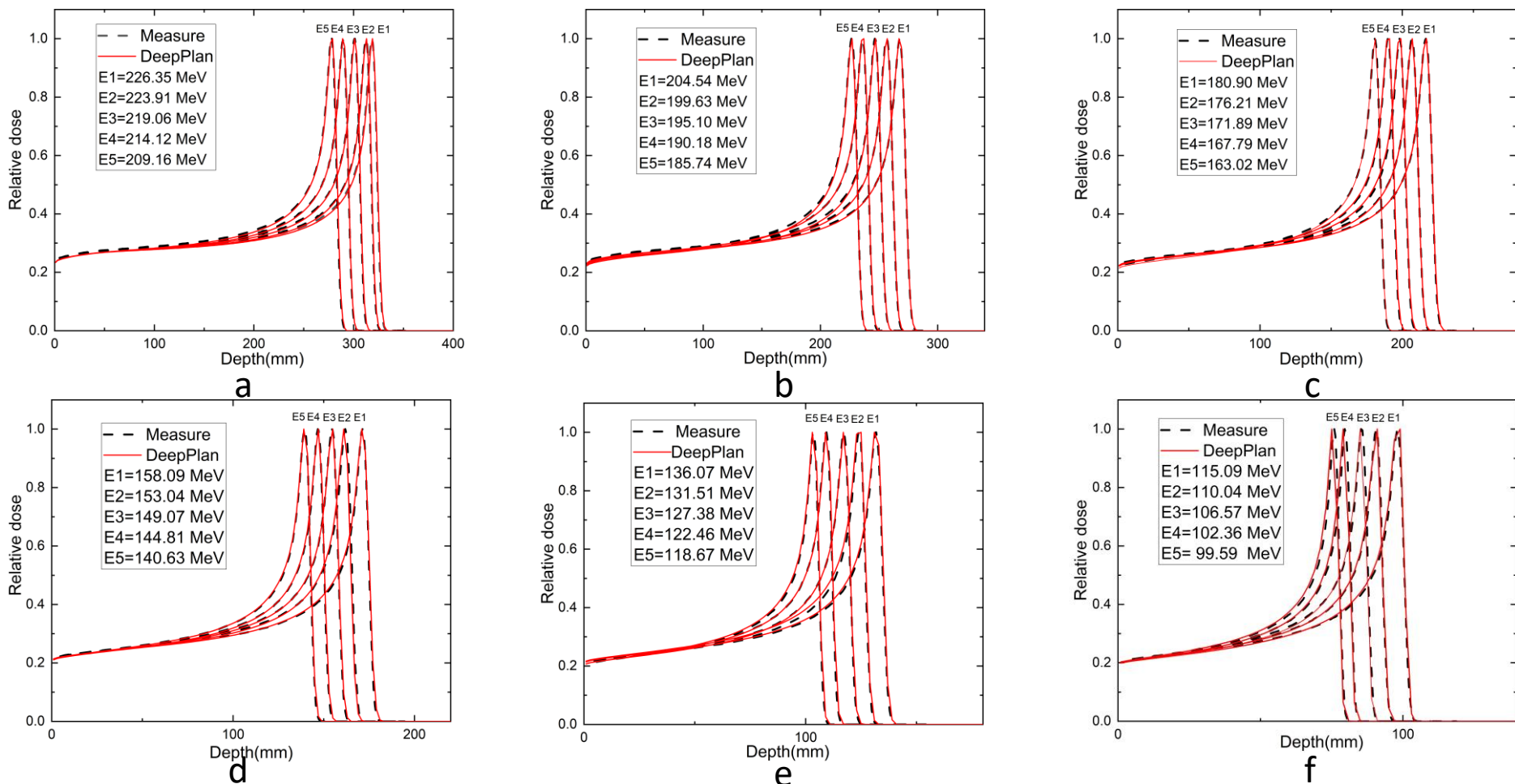
图3.5 DeepPlan质子剂量计算引擎流程图





## 任务二：与 UFHPTI 临床测量数据对比分析

### 3.2.1 IDD 结果对比



平均相对偏差

0.01%

图3.7 30组不同能量下IDD结果对比

## 任务二：与 UFHPTI 临床测量数据对比分析

### 3.2.2 空气中质子束斑大小对比

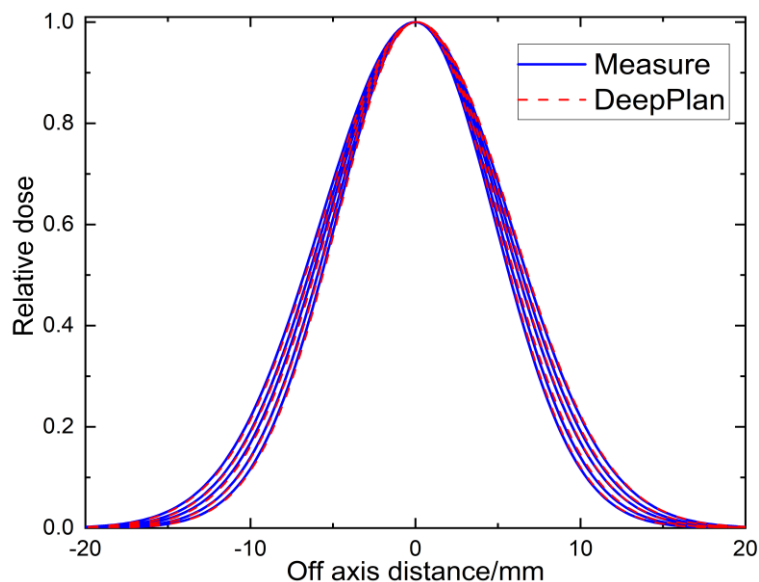


图3.8 199.63 MeV质子束在不同位置结果对比

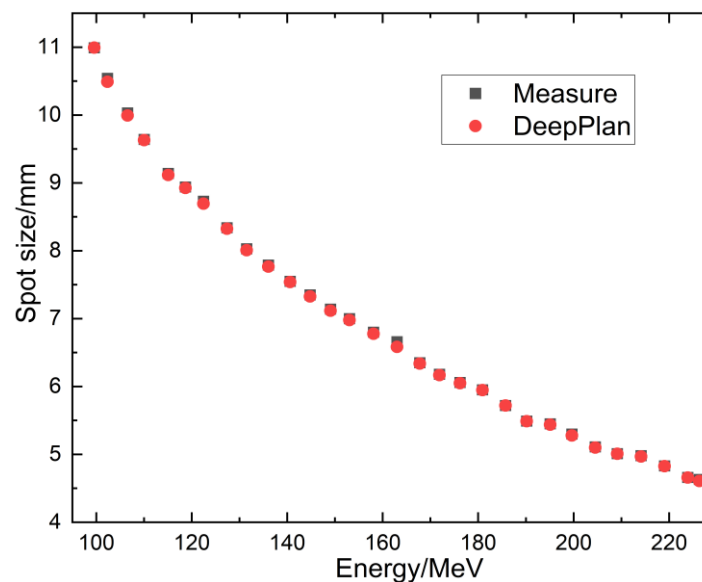


图3.9不同能量质子束在等中心平面的束斑尺寸

大多数偏差在**0.3%以内**，平均相对偏差为**0.15%**

## 任务二：与 UFHPTI 临床测量数据对比分析

### 3.2.3 SOBP 和横向剂量分布

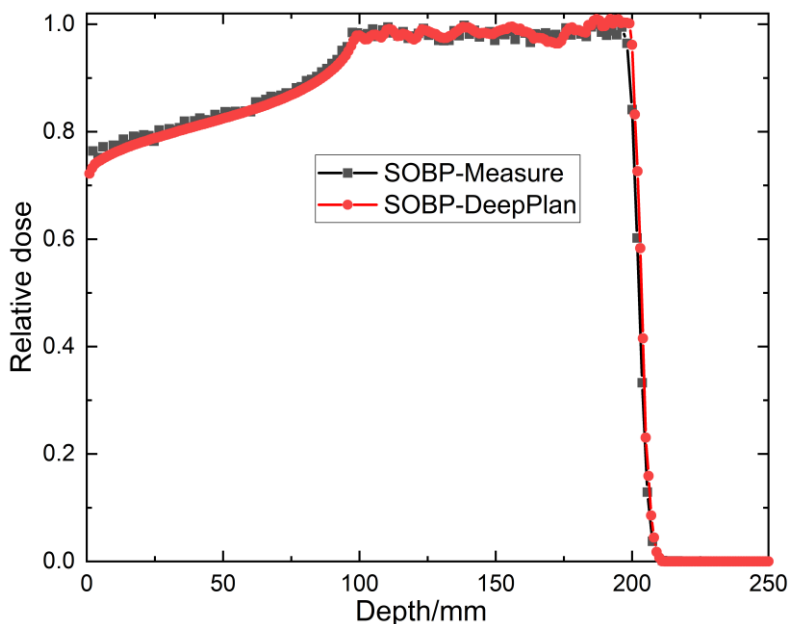


图3.10 纵向扩展布拉格峰对比结果

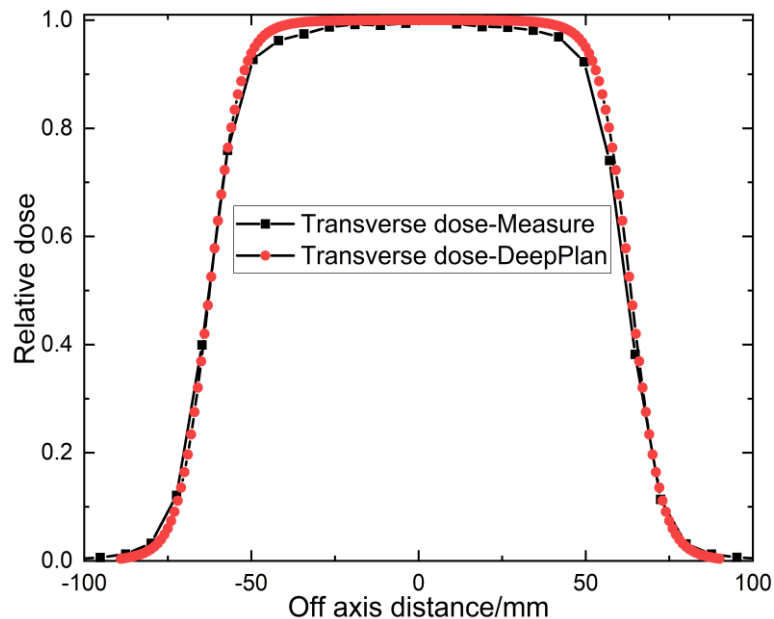


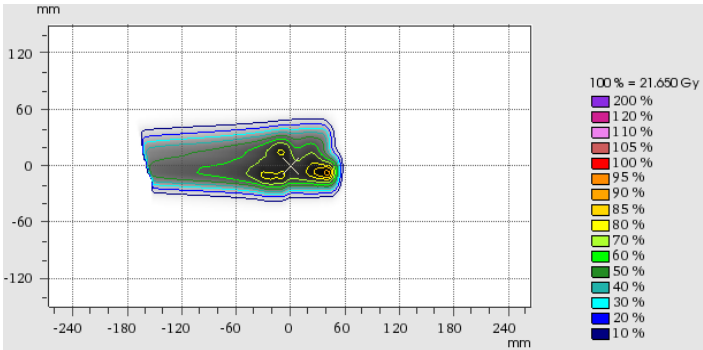
图3.11 横向剂量分布对比结果

SOBP 大多数偏差在 **1% 以内**，平均相对偏差为 **0.1%**

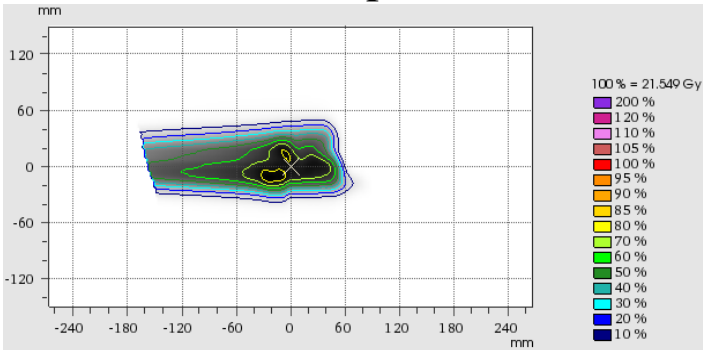
横向剂量分布大多数偏差在 **1% 以内**，平均相对偏差为 **0.4%**

## 任务三：与RayStation临床病例结果的对比分析

### 3.3.1 二维平面结果对比



a: DeepPlan



b: RayStation

图3.12 临床病例1的二维平面结果比较

表3.2 DeepPlan与RayStation关于各病例的二维伽马分析结果

病例序号	射野方向	伽马通过率(%)
病例1	Beam1(270°)	96.1
	Beam2(90°)	95.1
病例2	Beam1(270°)	98.7
	Beam2(90°)	98.9
病例3	Beam1(270°)	96.3
	Beam2(90°)	96.4
病例4	Beam1(90°)	96.7
	Beam2(180°)	97.3
病例5	Beam1(180°)	95.0
	Beam2(260°)	99.4
	Beam3(100°)	98.7

## 任务三：与RayStation临床病例结果的对比分析

### 3.3.2 DVH结果对比

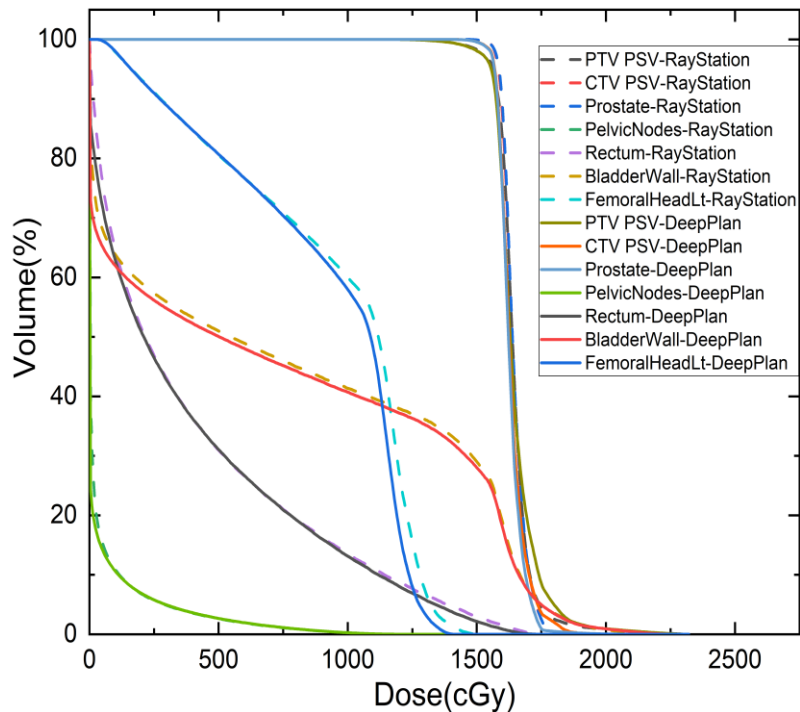


图3.14 病例1的DVH结果对比

表3.3 DeepPlan与RayStation关于各病例的DVH结果

病例序号	PTV中覆盖95%的靶区体积		相对偏差
	RayStation(cGy)	DeepPlan(cGy)	
病例1	1562	1558	0.26%
病例2	3868	3896	0.72%
病例3	1600	1631	1.93%
病例4	1902	1939	1.95%
病例5	730	750	2.74%

## 任务三：与RayStation临床病例结果的对比分析

### 3.3.3 三维剂量结果对比

表3.4 DeepPlan与RayStation关于各病例的三维伽马分析结果

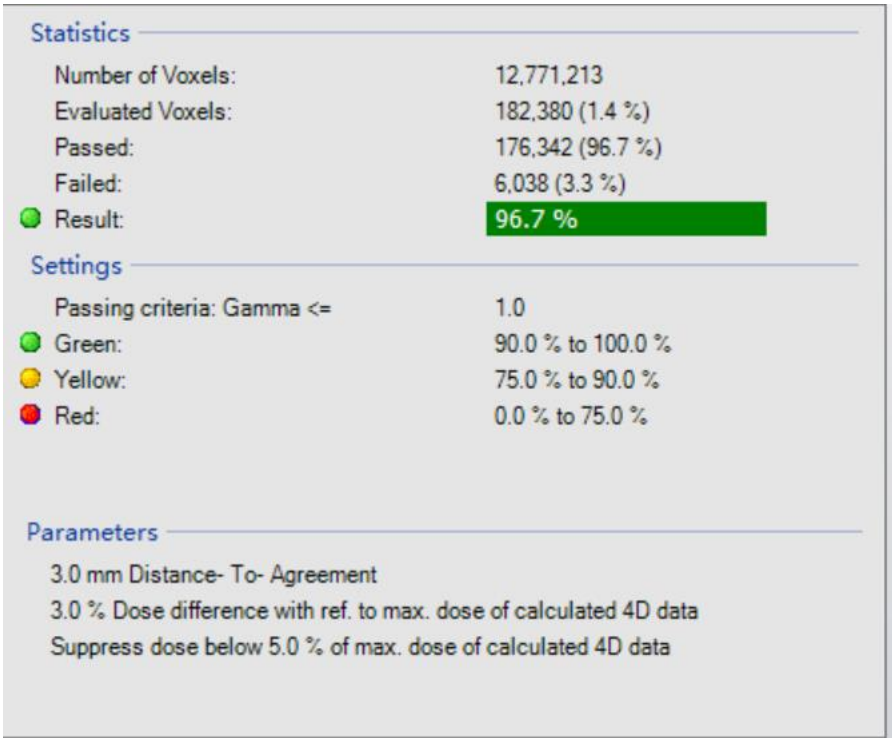


图3.15 病例2的三维伽马分析结果图

病例序号	射野方向	伽马通过率(%)
病例1	Beam1(270° )	97.2
	Beam2(90° )	96.2
病例2	Beam1(270° )	96.7
	Beam2(90° )	96.2
病例3	Beam1(270° )	96.4
	Beam2(90° )	96.0
病例4	Beam1(90° )	96.9
	Beam2(180° )	92.5
病例5	Beam1(180° )	90.9
	Beam2(260° )	96.0
	Beam3(100° )	97.4





## 4 总结与展望

### 总结

- ✓ **任务一**完成了质子笔形束算法研究，建立了UFHPTI质子加速器笔形束扫描模型，实现代码编写
- ✓ **任务二**完成了与UFHPTI临床测量数据的对比分析，表明DeepPlan质子模块模型构建的准确性
- ✓ **任务三**完成了与国外商用软件RayStation在临床病例的对比分析，表明了DeepPlan质子模块临床应用的可行性

### 展望

- 质子光子联合放疗
- 优化时加入质子生物效应的模块，完善质子放疗计划

### 创新

- 基于临床质子加速器，采用蒙卡模拟及参数修正的方式完成质子笔形束算法的研究及代码编写，对以后国产质子治疗计划系统在临床方面的应用具有一定的先驱和指导意义