

◁探索与研究▷

质子重离子放射治疗中心的发展现状及集约发展模式探讨

唐鑫磊,冯璐垚,温俊,辜锦燕,彭望清

(中山大学肿瘤防治中心,广州 510060)

【摘要】 本文梳理了国内外拟建、在建和已建成的质子重离子项目情况,分析了目前质子重离子项目建设发展中存在的问题,总结了集约建设发展模式的特点、必要性及优势。并以中山大学肿瘤医学科学中心质子重离子放射治疗中心为例,梳理分析当前集约化发展下的质子重离子放射治疗的一般流程及特殊要求,总结了质子重离子放射治疗中心建设的医疗工艺规划及布局。最终提出质子重离子放射治疗中心在未来发展过程中应结合设备集约化和小型化的发展趋势,提出超前设计的展望。

【关键词】 医院;医疗工艺;重离子;放射治疗中心;集约发展

【文献标志码】 A **【文章编号】** 1672-4232(2025)05-0014-05

【DOI编码】 10.3969/j.issn.1672-4232.2025.05.004

Discussion on the Current Development Status and Intensive Development Model of Proton and Heavy Ion Radiotherapy Centers/TANG Xin-lei, FENG Lu-yao, WEN Jun, GU Jin-yan, PENG Wang-qing(Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangzhou 510060, China)

【Abstract】 This article reviews the situation of planned, under-construction or completed proton and heavy ion projects at home and abroad, analyzes the problems existing in the current construction and development of proton and heavy ion projects, and summarizes the characteristics, necessity and development advantages of the intensive construction and development model. Taking the Proton and Heavy Ion Radiotherapy Center of Sun Yat-sen University Cancer Medical Science Center as an example, this paper sorts out and analyzes the general process and special requirements of proton and heavy ion radiotherapy under the current intensive development, and summarizes the medical process planning and layout for the construction of the proton and heavy ion radiotherapy center. Ultimately, it is proposed that in the future development process of proton and heavy ion radiotherapy centers, the trend of equipment intensification and miniaturization should be combined, and the outlook for the advanced design is put forward.

【Key words】 hospital; medical technology; heavy ion; radiotherapy center; intensive development

手术、化疗、放疗为肿瘤治疗的三大主要手段,其中放疗主要有光子放疗(X射线、 γ 射线等)及粒子放疗(质子、重离子)。一般而言,质子重离子疗法适用于早期及进展期肿瘤,而不适用于非实体肿瘤、转移性肿瘤等(见表1),具有有限的适应证。质子和重离子在入射人体组织后集中形成的布拉格峰具有独特的剂量分布优越性,更适合于精准放疗。而重离子治疗周期短,散射小、精度高,在横向剂量分布、相对生物学效应、LET坪峰比和氧增强比以及治疗效率等方面均优于质子^[1]。医用重离子加速器系统和医用质子加速器系统结构组成原理基本相同,将质子束和重离子束放疗的功能集成于同一医用加速器系统,能够有效实现高治疗增益和低成本投入的目的,这种集成化的需求及设备技术的发展使得加速器更加紧凑。

国际粒子放疗协作组织数据显示,截至2024年5月,国外在运营的重离子或质子重离子中心共12个,质子中心111个,主要分布在美国、日本和欧洲。国家卫生健康委官网数据显示,我国医用重离子或质子重离子项目(含建成、在建、拟建,包括港澳台地区)31家,质子项目(含建成、在建、拟建)51家,其中质子32家、重离子10家获得国家配置许可证,运营的质子重离子放疗中心有8家(含港澳台地区)。目前我国的质子重离子建设项目数量增长迅速,因其建设条件要求的特殊性,大部分项目选址偏远并独栋建设,以设备为核心组织医疗功能及流线,往往给患者就医造成不便^[2-3]。

未来智能化和小型化成为医用质子重离子发展的重点方向。小型化意味着更高效的功能组织和流线、

表1 质子重离子设备适应证

类别	肿瘤类型
适用	(1)中枢神经系统肿瘤:脑膜瘤、胶质瘤等。 (2)颅底肿瘤:脊索瘤、软骨肉瘤等。 (3)头颈部肿瘤:鼻咽癌、腺样囊性癌、黑色素瘤、软组织肉瘤等。 (4)胸部肿瘤:肺癌、食管癌、纵隔肿瘤等。 (5)腹盆腔部肿瘤:肝癌、胰腺癌、胆管癌、前列腺癌、直肠癌、子宫肿瘤及其他无法切除的盆腔肿瘤等。 (6)其他部位:骨肿瘤、软组织肉瘤等。
不适用	(1)非实体肿瘤,如血液疾病(白血病)等。 (2)肿瘤已发生多处转移,且转移灶 ≥ 3 个。 (3)同一部位一年内接受过放射治疗或者放射性粒子摄入。 (4)无法较长时间保持俯卧或仰卧等体位的患者等。

更小的占地面积、更紧凑的建筑空间布局、更经济实用的防护材料,智能化意味着更优化的治疗方案、更精准的信息服务、更精简的人员架构,同时也要兼顾患者对于就医环境品质的要求。本文通过分析当前质子重离子项目建设过程中存在的问题,围绕放疗患者就医流程,拟从医疗工艺视角探索质子重离子装备与集约化发展的有效模式。

1 当前国内质子重离子中心建设存在的问题

1.1 布局缺乏顶层设计,亟待合理规划

目前能统计到的数据显示,我国建成、在建、拟建的医用质子重离子中心共计82家,省份覆盖率高达85%。部分放疗设备制造商和投资商过分乐观估计患者市场、夸大质子重离子经济上的收益,与地方政府及医院签署合作协议后因投资、配置许可、风险高等原因迅速无疾而终。2019年10月起,国家卫生健康委陆续出台相关甲类设备配置许可,环保部门对质子重离子设备辐射安全许可、放射治疗许可实施严格审批管控,在一定程度上抑制了各类公立/民营机构大兴建设、迅速扩展的现象,但仍缺少对质子重离子全国区域范围内布局的顶层设计指导意见^[4]。

1.2 建设周期长、建设及运营成本高

新建质子重离子治疗设备项目建设周期包括项目筹建、行政审批、设计建造、设备安装、调试验收、临床试验、试运营治疗、临床运营,预计约5~7年^[5];从设备采购协议到设备验收预计60~72个月,设备基建设计至竣工验收至少24个月(包括完成项目环境影响评价和职业病危害预评价),临床试验机运营前准备时间约12~15个月。

质子重离子治疗设备项目造价昂贵,目前正在运营的质子重离子放疗中心基本由国家或地方政府或企业联合医院进行投资^[6]。重离子装备设备投资约为6亿~15亿元,质子装备设备投资约为4亿~5亿元,土建单位造价约为8 000~20 000元/m²,年维护费用约为设备合同的6%~8%。

质子重离子放疗技术十分复杂,人员素质要求高,人才培养周期长。根据《质子和重离子加速器放射治疗技术管理规范(2017版)》,医疗机构开展质子或重离子放疗技术,至少要有具备质子或重离子放射治疗技术临床应用能力、10年以上放射治疗工作经验、副高级以上职称的医师、物理师各3人,并有经过培训符合开展技术要求的其他专业技术人员。因此,需提前储备医生、物理师、剂量师、治疗师和护理人员、工程师及信息数据人员等,储备放射生物学人才,着手进行质

表2 国内部分重离子项目设备及土建投资统计表

项目	设备投资 (亿元)	单方造价 (元/m ²)	备注
武威重离子中心	5.5	7 780	2020年3月正式运营
兰州重离子肿瘤治疗中心	/	12 000	在建,设备调试完成
妈祖重离子医院	/	14 630	在建,2021年10月设备进场安装
浙江省肿瘤医院重离子医学中心	6+	19 500	在建,2022年11月设备进场安装
武汉大学重离子医学中心	6	13 500	
徐州质子重离子医院	10	11 000	2024年6月设备完成安装
上海质子重离子医院	13	16 600	2015年5月正式运营

子重离子放射生物方面的实验室和临床转化研究,人力成本极高。

1.3 专项工程要求高,缺乏可参考规范/标准

质子重离子治疗设备安装及运行条件极其复杂,其设计不同于其他医疗用房,对建筑结构承重、基层平整度、安装精度、结构沉降范围、设备四周净空、设备转运、配套系统安装及管线预埋等均有严格的要求,要满足质子重离子治疗设备运行及检修必需的工艺条件。医疗设备机房及配套用房的方案前瞻性、设计合规性、施工可靠性直接关系到医疗设备的运行安全。

国内质子重离子建设和配置尚缺乏足够的国家或行业指导性的标准/规范,目前唯一团体标准为2023年由全国卫生产业企业管理协会组织编制的《医疗机构质子重离子中心建设标准》(T/NAHIEM 83-2023),还缺少具体的设计规范细则和指导。

配置医用质子重离子设备需要加强统筹布局,减少重复建设,亟待出台相应建设标准,规范和指导建设及运营。也因其建设周期长、投入成本巨大^[7],医疗机构及地方政府在投资决策时应充分结合城市及医院的发展规划谨慎投资,从节约成本及以患者为中心的角度考虑质子重离子项目的建设模式。

2 质子重离子中心的布局模式及集约化发展优势

按目前质子重离子治疗中心的功能设置,装置区和治疗区为核心区,基本涵盖模拟治疗和放射治疗两个阶段。按照核心区在总体布局中设置的位置可以分为表3所示的三种规划模式^[8-10]。当前模式均各有利弊,因质子重离子建设的特殊性,集约化的布局模式更多会充分利用土地资源、挖掘地下空间潜力,往往采用模式一。

对肿瘤患者而言,局部肿瘤的控制并不一定会转化为生存期的延长。集中处理看诊、确诊、模拟定位、

表3 质子重离子中心一般布局模式

模式	特点	优势	劣势	代表
模式一 核心区设置在地下室	治疗层通常位于地下负一层(深度6~7 m)或负二层(深度10 m),装置区需要爬升的空间或加速器大厅上空可以突出在地面。	①有效利用地下空间;②利用地下土壤辅助辐射屏蔽,降低造价;③减少辐射源对人流和城市环境安全的影响。	①基坑支护和土方开挖量大;②防水难度大;③造价高;④大型设备吊装转运难度大;⑤空间舒适性差,缺乏自然采光和通风;⑥竖向交通压力大。	上海质子重离子医院、兰州重离子医院、妈祖质子重离子医院、浙江省肿瘤医院
模式二 核心区设置在建筑物首层	治疗相关建筑功能以核心区为中心水平展开布置。	①减少项目基坑支护、土方开挖工程量;②降低防水难度;③便于设备安装;④空间舒适性较好,自然采光通风条件好。	①无法利用土壤辅助防护;②用地面积较大;③辐射屏蔽部分工程造价较高;④环境辐射剂量标准值更加严格。	武威重离子医院重离子治疗中心、合肥离子医学中心、一洲国际质子医学中心
模式三 核心区设置于半地下空间	将装置区和治疗室设置于地下部分,将治疗区等待大厅、休息室等空间与医护空间、诊断空间设置于半地下室面向室外环境一侧。	能因地制宜利用建设场地的有利条件,满足治疗中心各部分不同的环境需求。	对建设用地的条件有较高要求,并不能对当下类似项目有普遍的适用性。	广州泰和肿瘤医院(一期)

治疗计划、复诊等流程,减少患者通行时间,提高反馈的及时性,让质子重离子放射治疗成为一种可选项而不是必选项,将会大大提高患者的就医体验。把质子重离子纳入医院放射治疗中心统筹建设势在必行。

2.1 有利于放疗学科和围放疗技术的发展,有效发挥高端设备的集聚和规模效应

把质子重离子纳入医院放射治疗中心统筹建设,不仅能促进放疗学科的学术发展,提高临床治疗水平,还能发挥高端设备的集聚和规模效应,实现资源优化配置,推动整个放疗领域技术进步。在科研方面,有助于建立统一数据库,实现各平台临床数据共享,集中科研力量推动重装备治疗技术革新,也有助于吸引国际科研团队,促进国际交流与合作。在临床医疗方面,可提高放疗设备使用效率,针对患者提供个性化治疗方案,减少治疗过程中的副作用,提高治疗效率。在教学方面,可使得设备、师资、学术交流等教学资源得到有效整合,为学生提供更全面、更前沿的学习机会,增强实践能力和临床思维,推动跨学科教育,培养复合型人才。

2.2 有利于医院各专科间的相互支撑,有效覆盖患者的治疗需求

首先,重离子治疗与常规放射治疗相互补充,可提高治疗的适应证范围和治疗效果。通过整合各平台工作流程,可简化就医流程,缩短患者等待时间,提升服务响应速度,为患者提供更加连贯和综合的医疗服务,提升患者就医体验。其次,促进不同专科之间协作有助于构建多学科团队,增强医院核心竞争力。第三,集成患者的医疗记录、检查结果和治疗计划等信息,便于医生全面了解患者情况,做出更精确的诊断和治疗决策。

2.3 有利于医院整体集约化发展,有效降低医院建设成本

把质子重离子纳入医院放射治疗中心统筹建设,能实现医疗设备、人力资源、信息资源等共享,避免重复投入和资源浪费,提高资源利用效率。重离子治疗设备和设施的高昂成本可通过与其他放射治疗设备共

享来分摊,降低单位成本。一般重离子设备投入高,回报周期长,如果医院本身吸引病人就医的能力不足,极易导致项目亏损,只有大型医院依靠其本身的医学水平和技术实力自带流量,才有可能支撑起重离子的运营成本。

3 质子重离子放射治疗中心的医疗工艺规划

3.1 项目基本情况

中山大学肿瘤医学科学中心总建筑面积30.47×10⁴ m²,床位数1 100张,规划为一栋15层(局部14层)综合建筑体。因场地设计条件极为苛刻,中心引进重离子装备,与放疗中心集约布置:放疗中心直线加速器治疗区及模拟定位治疗区设置在负2层,重离子治疗区在负4层,重离子核心爬升区顶板覆土,埋深达30 m。该重离子全地理式设计属全球首家,其工程建设上对基坑支护及防水的挑战极大。

3.2 医院体系化布局

医院按院区功能组团大致分为四大体系:门诊体系、手术麻醉体系、临床实验体系和临床影像体系,详见图1。其中临床影像体系由影像科、超声科、心电科、核医学科、放射治疗科等需要借助影像设备的科室组成,这些科室均为重装备的科室。

3.3 医疗工艺前期策划

医院当前放射治疗设备采取的工作模式为:一周工作日开放5天,设备每天开放17小时,人员采取三班倒的排班模式。通过调取医院历年各类医疗运营数据、设备诊疗量数据并进行相关性分析,得出以日均门诊量、住院量关联的诊疗量比例。新建院区按规划门诊量6 000人次/日为基数,进行设备诊疗量测算,从而反推出设备数量,详见表4。配置质子重离子设备相当于增加了5个治疗舱,因此调整直线加速器配置数量为10台。此外配置后装机1台、模拟CT定位2台、

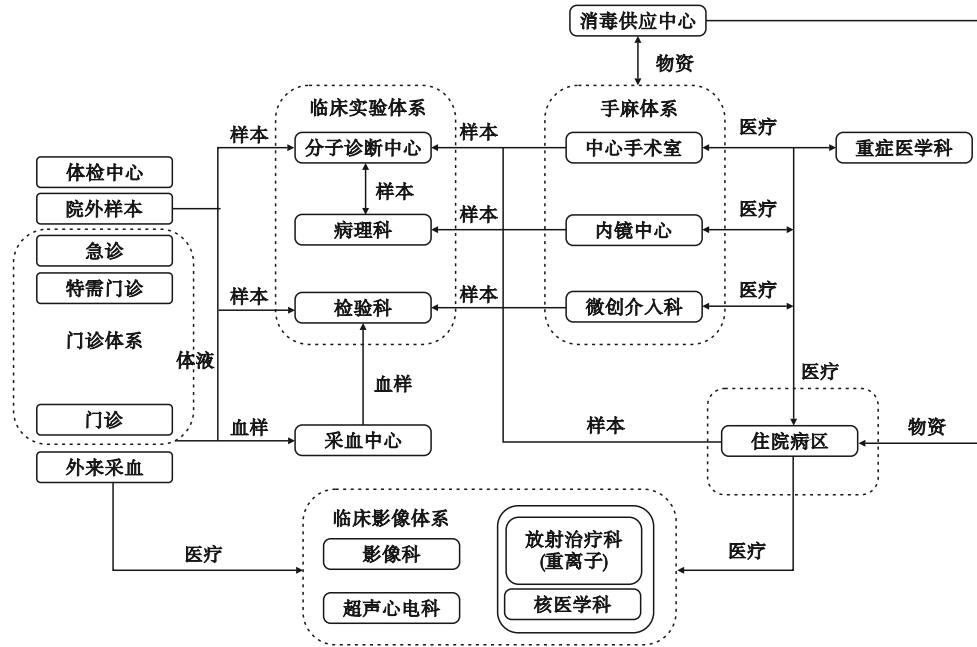


图1 医院一般的医疗体系

模拟MRI定位2台、模拟X光定位2台。

表4 质子重离子中心规模测算

设备名称	计算模型	诊断占比(%)	单机诊疗量(人/台)	设备数量
直线加速器	$=(日门诊量+住院量) \times 18\% \sim 22\%$	100	100	约15台
模拟X光		38	25	约1台
模拟CT	$=(日门诊量+住院量) \times 2.0\% \sim 2.5\%$	42	25	约2台
模拟MRI		20	25	约1台
后装机	$=(日门诊量+住院量) \times 0.2\% \sim 0.3\%$	100	25	约1台

4 质子重离子放射治疗中心的医疗工艺布局

4.1 医疗工艺一级流程

医疗工艺一级流程是指在医院建筑总体医疗工艺设计阶段所进行的流程与布局设计,主要设计医院功能系统规划、功能分区与整合、医疗流程与动线以及医疗工艺参数。在医院大的功能布局确定后,深入到科室,确定科室的设备配置、规模体量以及与搭接科室的联系。

来到放射治疗中心治疗的初诊患者一般需完成抽血、体液检查、彩超、CT或MRI等各类影像类设备检查,需要对肿瘤病理情况进行判定,在实施放疗方案前还需拔除坏齿或假牙,以免影响治疗效果。因此一般情况下,放射治疗中心的支撑科室有采血中心、检验科、病理科、分子诊断科、影像科、超声心电图、牙科等,在竖向或水平方向上最好能够便捷联系。因项目集约式发展的需求和规划条件限制,本项目质子重离子区

域和放疗中心均采用了全埋式地下室布局的模式,质子重离子治疗区位于地下4层,埋深达25 m,直线加速器治疗区位于地下2层。

4.2 医疗工艺二级流程

医疗工艺二级流程主要解决医疗功能单元布局、科室内功能分区、人流物流动线分析及医疗专项工程的配置需求。因此需要对科室内医疗行为充分分析论证,在满足规范要求的情况下,针对科室特点布局。

放疗患者的一般治疗流程分为三个阶段:第一阶段为诊疗评估阶段,主要为确认罹患肿瘤并意向采用放疗手段治疗,初步制定放疗计划;第二阶段为模拟治疗阶段,先通过体位固定参数制作定位模具,利用该模具在X光、CT或MRI设备上模拟治疗,更加精细化肿瘤目标及体位固定参数;第三阶段为放射治疗阶段,医生和物理师根据第二阶段参数和肿瘤情况勾画靶区、制定放疗计划并进行验证,技术员按照放疗计划进行模拟复位(即在正式治疗前患者和技术员均对放疗体位和机器参数调整验证),最终开启设备进入正式治疗。一般情况下,一个治疗周期需放疗20~30次,持续1~2个月,对于患者来说,治疗周期长、频率高,第三阶段的正式治疗部分流线高度重复。质子重离子治疗与直线加速器治疗的最大区别在于放射治疗阶段时长,质子放射疗程缩短为5~8周,重离子放射甚至缩短至1~4周。

以上各阶段既紧密衔接又相对独立,其中治疗实施阶段高度重复,因此对于流线的组织和功能空间的布局需着重考虑,包括相对独立的报到区和等候区,功能房间分布关系详见图2。在当前的质子重离子医院建设案例中,往往是围绕核心重装备来组织整个医院

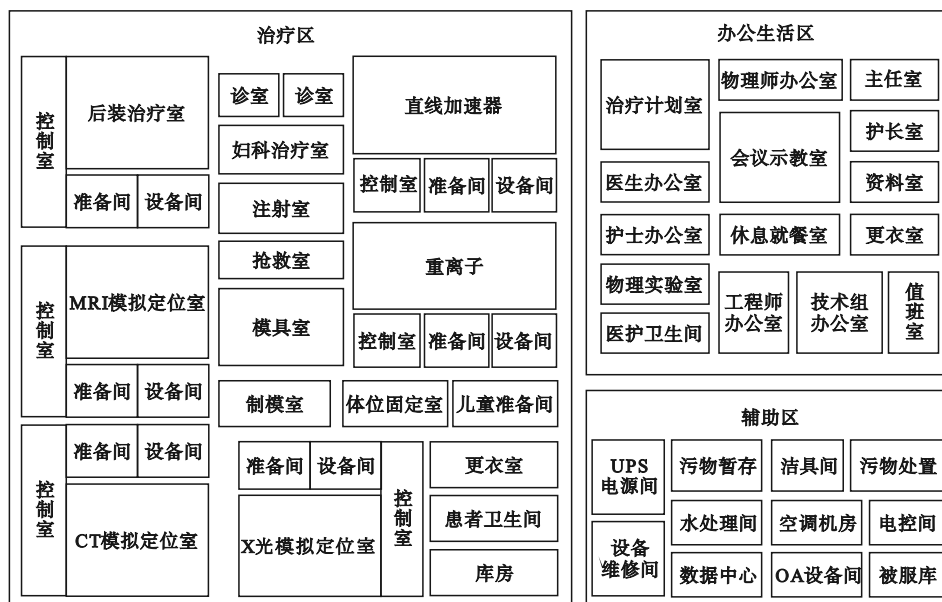


图2 围绕放疗患者流线的功能房间需求

的功能和流线,希望通过引进高端装备吸引更多患者就医,因此辅助功能也都是围绕重装备来布局,甚至是在原有的医院平台外再新建一整套治疗流程相关的诊疗空间和平台科室。

4.3 医疗工艺三级流程

医疗工艺三级流程主要针对房间内医疗行为分析,对房间内设备、家具、设施及门窗等进行平面表达,标记出设备插座、消毒设施、物流、医气、纯水、强弱电、冷热水及空调等点位,并对特殊环境条件作出具体要求。

5 结语

质子重离子设备因其装备配置的特殊性,基本是定制化生产、定制化建设,建设装修一体成型,后期投入运行后很难再拆改,因此对放疗学科的精准规划和适度超前设计是十分必要的。为了最大化发挥高精尖设备的医用价值和运行效益,各方需共同努力在源头上把好设计关。政府作为资源分配和决策者,应根据设备的发展技术和建设瓶颈,对场地条件和建设相关的标准规范及政策要求进行适应性调整。医院作为运营和建设方,需做好顶层设计和学科规划布局,适度预留医院发展空间,前置设备规划和选型,集约利用医院各类平台资源。设计方作为落地转化方应充分了解医疗流线及特殊建设需求,结合医院学科布局和场地建

设条件充分考虑未来发展的兼容性,避免造成“建成即落后”的尴尬局面。

参 考 文 献

[1] 金渊昌.重离子放疗技术应用现状及我国产业发展对策研究[D].兰州:兰州大学,2022.

[2] 田凯,彭正,韩显平.质子重离子医院建设现状及发展趋势[J].中国医院建筑与装备,2022,23(8):20-24.

[3] 杨小龙,陈惠贤,陈继朋,等.医用质子重离子加速器应用现状及发展趋势[J].中国医疗器械杂志,2019,43(1):37-42.

[4] 徐怡,陈国亮.质子重离子放疗中心设计[J].中国医院建筑与装备,2022,23(8):11-19.

[5] 田凯,彭正,韩显平.质子重离子医院建设现状及发展趋势[J].中国医院建筑与装备,2022,23(8):20-24.

[6] 黄铭.重离子医学中心建设工程造价控制的要点分析[J].医院管理论坛,2024,41(6):50-52

[7] 王岚,诸葛立荣,郭小毛,等.上海市质子重离子医院建设管理难点与思考[J].中国医院建筑与装备,2021,22(1):21-24.

[8] 朱乃伟,陈素茵,钟泽彩.质子重离子治疗中心核心区布置模式对比研究[J].南方建筑,2022(12):44-54.

[9] 申太华.我国质子重离子治疗中心建造模式分析探讨[J].中国医院建筑与装备,2021,22(1):44-46.

[10] 王岚.质子重离子医院的环境设计[J].中国医院建筑与装备,2016(1):32-35.

通信作者:唐鑫磊(1992-),女,硕士研究生,初级工程师;研究方向:医院管理、建筑工程管理、设计管理。

收稿日期:2024-10-07

修回日期:2024-12-01

(编辑 徐佳)