

中山大学人工智能学院

# 研究生学位论文

面向出行位置点预测的大小模型协同学习研究

**Collaborative Learning of Large and Small Models for Next POI Prediction in  
Mobility Scenarios**

学位申请人：刘钊  
专业名称：人工智能  
导师姓名及职称：刘威（副教授）  
学位：硕士

答辩委员会主席（签名）：\_\_\_\_\_

委员（签名）：\_\_\_\_\_

## 论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文使用授权声明

本人完全了解中山大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆、院系资料室被查阅；有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索；可以采用复印、缩印或其他方法保存学位论文；可以为建立了馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

保密论文保密期满后，适用本声明。

学位论文作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

---

# 论文题目：面向出行位置点预测的大小模型协同学习研究

专    业：人工智能

硕  士  生：刘钊

指导教师：刘威（副教授）

## 摘要

随着位置服务与移动互联网的发展，下一个兴趣点（Point-of-Interest, POI）预测已成为智能出行与个性化推荐的重要问题。传统序列模型和图神经网络在时空依赖建模方面表现良好，但在冷启动与数据稀疏场景中仍存在局限；大语言模型具备更强的语义理解能力，却难以直接刻画细粒度时空转移规律。针对上述问题，本文围绕“大小模型协同学习”开展研究，构建融合传统时空建模能力与大模型语义推理能力的统一框架。

本文首先基于时间偏好构建时间增强的序列动态图，对用户在不同时段的访问行为进行建模，并通过双向转移机制刻画 POI 的转入与转出偏好；随后通过多层感知器实现传统模型嵌入与大模型语义空间对齐，结合参数高效微调策略将全局时空信息注入大模型，从而提升推荐模型在短轨迹与稀疏数据场景下的鲁棒性与泛化能力。本文进一步给出面向 Gowalla 与 Foursquare 数据的实验设计与评测方案，为后续完整实验与论文写作提供可复用的研究基础。

**关键词：**下一个兴趣点推荐；大小模型协同；时空建模；大语言模型；参数高效微调

---

# **Title: Collaborative Learning of Large and Small Models for Next POI Prediction in Mobility Scenarios**

Major: Artificial Intelligence

Name: Zhao Liu

Supervisor: Wei Liu (Associate Professor)

## **Abstract**

Next point-of-interest (POI) prediction is a key task for intelligent mobility and personalized recommendation. Traditional sequential models and graph neural networks are effective at modeling spatio-temporal dependencies, but they often suffer from cold-start and sparse-data scenarios. In contrast, large language models provide strong semantic understanding, yet they are less capable of modeling fine-grained mobility transitions directly. To address this gap, this thesis studies a collaborative learning framework between small task-specific models and large foundation models for next POI prediction.

The proposed framework first introduces a time-enhanced sequence-based dynamic graph to capture user behaviors across different time slices, together with bidirectional transition modeling for in-flow and out-flow POI preferences. Then, a multilayer perceptron is used to align embeddings from traditional POI models with the semantic space of the large model, and parameter-efficient fine-tuning is applied to inject global spatio-temporal information into the large model. This design aims to improve robustness and generalization under short trajectories and sparse observations. Finally, we present an experiment protocol on Gowalla and Foursquare as the basis for full empirical evaluation in the final thesis.

**Keywords:** Next POI Recommendation; Collaborative Learning; Spatio-temporal Modeling; Large Language Models; Parameter-efficient Fine-tuning

# 目录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 本章引言 .....	1
1.2 研究背景 .....	1
1.3 研究意义 .....	2
1.4 研究问题分解 .....	2
1.5 问题陈述 .....	3
1.6 核心挑战 .....	3
1.7 研究思路与技术路线 .....	4
1.8 研究内容与工作安排 .....	4
1.9 主要贡献 .....	5
1.10 论文结构安排 .....	5
1.11 本章小结 .....	5
<b>第二章 相关研究与问题分析</b> .....	<b>7</b>
2.1 本章引言 .....	7
2.2 任务定义与符号约定 .....	7
2.2.1 任务边界与建模假设 .....	7
2.3 评价指标与实验协议说明 .....	8
2.3.1 指标解释补充 .....	9
2.4 小模型路线综述：序列与图方法 .....	9
2.4.1 序列建模方法 .....	9
2.4.2 图建模方法 .....	9
2.5 大模型路线综述：LLM 驱动推荐 .....	10
2.5.1 LLM 在推荐中的应用 .....	10
2.5.2 LLM 在 Next POI 中的进展 .....	10
2.5.3 小结性对比 .....	10
2.6 生成式推荐与显式推理研究进展 .....	11

---

2.6.1	从指令调优到统一生成框架	11
2.6.2	显式推理范式：OneRec 与 OneRec-Think 类工作	11
2.6.3	与本文方法的关系	11
2.7	中文研究脉络与本土场景启示	12
2.8	扩展文献归纳	12
2.9	研究空白与本文建模原则	12
2.9.1	从研究空白到研究问题（RQ）映射	13
2.10	本章小结	13
<b>第三章</b>	<b>大小模型协同学习方法</b>	<b>14</b>
3.1	本章引言	14
3.2	总体框架与设计动机	14
3.2.1	输入构建与数据流定义	14
3.2.2	核心符号与问题映射	15
3.2.3	协同设计原则	15
3.3	小模型分支：TSPM	16
3.3.1	时间增强序列动态图（TSDG）	16
3.3.2	双向转移建模	17
3.3.3	序列偏好建模与动态图权重	17
3.3.4	TiRNN 预测头	18
3.4	大模型分支：GA-LLM	18
3.4.1	GCIM：地理坐标注入模块	18
3.4.2	PAM：POI 对齐模块	19
3.4.3	结构化提示构造	19
3.4.4	模块到研究问题的对应关系	19
3.5	融合策略：协同训练与推理	20
3.5.1	两阶段训练流程	20
3.5.2	训练流程说明（实现视角）	20
3.5.3	推理机制	20
3.5.4	协同打分与重排序	21
3.5.5	关键超参数与默认配置	21
3.6	复杂度与可扩展性讨论	21
3.6.1	时间复杂度分析	21
3.6.2	空间复杂度分析	22
3.6.3	可复现实现建议	22
3.7	工程实现细节与落地策略	22
3.7.1	数据管线与样本构造	22
3.7.2	分支接口与调度机制	23

---

3.7.3	两阶段训练的工程化约束	23
3.7.4	推理服务化与异常回退	23
3.7.5	实施清单	23
3.8	与代表方法的能力对照	24
3.9	本章小结	24
<b>第四章</b>	<b>实验设计与结果分析</b>	<b>26</b>
4.1	本章引言	26
4.2	实验目标与研究问题	26
4.3	实验设置	26
4.3.1	数据集与预处理	26
4.3.2	评价指标与计算协议	27
4.3.3	对比方法与分组	27
4.3.4	实现细节与统计检验	28
4.4	主结果：协同模型与基线对比 (RQ1)	28
4.4.1	小模型路线主结果	28
4.4.2	大模型路线主结果	28
4.4.3	相对各基线的绝对差值分析	30
4.4.4	小模型路线差值细分	30
4.4.5	结果分层解读	30
4.5	小模型分支消融与诊断 (RQ2)	31
4.5.1	核心模块消融	31
4.5.2	时间槽粒度与序列窗口分析	32
4.5.3	负采样策略对比	32
4.6	大模型分支消融与诊断 (RQ3)	32
4.6.1	GCIM 与 PAM 模块消融	32
4.6.2	坐标注入与空间误差分析	32
4.6.3	跨城冷启动分析	34
4.6.4	PAM 作用机制分析	34
4.7	协同机制有效性分析 (RQ4)	35
4.7.1	错误类型细分	35
4.7.2	案例分析	36
4.7.3	协同收益边界	36
4.8	效率与可扩展性分析 (RQ5)	36
4.8.1	精度-效率折中讨论	37
4.8.2	部署建议	37
4.9	分群评估与参数敏感性补充	37
4.9.1	分群评估补充	37

---

4.9.2	参数敏感性讨论	37
4.9.3	负面结果与经验总结	38
4.10	案例与误差归因扩展	38
4.10.1	典型场景案例	38
4.10.2	误差归因补充	38
4.11	城市差异与应用场景诊断	39
4.11.1	城市级行为差异分析	39
4.11.2	场景化错误类型与缓解路径	39
4.11.3	业务可解释性输出建议	39
4.12	线上评估方案与风险控制建议	40
4.12.1	离线到在线的指标映射	40
4.12.2	A/B 测试分层建议	40
4.12.3	风险控制与回退策略	40
4.13	复现性、可靠性与威胁分析	41
4.13.1	复现性说明	41
4.13.2	内部效度威胁	41
4.13.3	外部效度威胁	41
4.13.4	构念效度威胁	41
4.14	本章小结	41
结论		42
附录 A 本文常用缩写对照表		44
附录 B 方法实现细节补充		45
B.1	数据管线与样本构造	45
B.1.1	轨迹切片规则	45
B.1.2	时间槽映射	45
B.1.3	候选集合构建	45
B.2	TSPM 分支实现细节	45
B.2.1	模块输入输出接口	45
B.2.2	动态图更新策略	46
B.2.3	负采样实践建议	46
B.3	GCIM 与 PAM 实现细节	46
B.3.1	GCIM 编码流水线	46
B.3.2	PAM 对齐机制	46
B.3.3	联合注入策略	47
B.4	两阶段训练调度细节	47



---

B.4.1	阶段一：表示对齐	47
B.4.2	阶段二：协同优化	47
B.4.3	早停与检查点策略	47
B.5	推理与部署细节	47
B.5.1	重排序触发条件	47
B.5.2	缓存与增量更新	48
B.5.3	异常回退机制	48
B.6	实现清单与复现建议	48
附录 C	实验补充分析与案例讨论	49
C.1	分群评估补充	49
C.1.1	按轨迹长度分群	49
C.1.2	按地理跨度分群	49
C.1.3	按 POI 流行度分群	49
C.2	参数敏感性补充	49
C.2.1	融合系数 $\eta$	49
C.2.2	时间槽数 $Z$	50
C.2.3	LoRA 秩	50
C.3	误差归因补充	50
C.3.1	语义相关但地理不合理	50
C.3.2	地理邻近但转移概率低	50
C.3.3	历史重复偏置	50
C.4	案例讨论	50
C.4.1	典型通勤样本	50
C.4.2	周末休闲样本	50
C.4.3	跨区域迁移样本	51
C.5	实验公平性补充说明	51
C.6	负面结果与经验总结	51
C.7	小结	51
参考文献		52

# Contents

Abstract (Chinese) .....	I
Abstract .....	II
List of Abbreviations .....	VII
Chapter 1 Introduction .....	1
1.1 Research Background .....	1
1.2 Problem Definition and Notations .....	1
1.3 Fundamentals of Recommender Systems and Sequential Modeling .....	2
1.3.1 Matrix Factorization and Implicit Feedback Learning .....	2
1.3.2 Temporal and Attention-based Modeling .....	2
1.3.3 Fundamentals of Graph Neural Networks .....	3
1.4 LLM Introduction and Core Challenges .....	3
1.5 Research Idea and Technical Route .....	4
1.6 Main Contributions and Innovations .....	4
1.7 Thesis Organization .....	4
Chapter 2 Related Work and Problem Analysis .....	6
2.1 Overview of the Next POI Recommendation Task .....	6
2.2 Recommender System Fundamentals and Evaluation Metrics .....	6
2.2.1 From Static Recommendation to Sequential Recommendation .....	6
2.2.2 Typical Optimization Objectives .....	7
2.2.3 Common Evaluation Metrics .....	7
2.3 Small-model Route: Sequential and Graph Methods .....	7
2.3.1 Sequential Modeling Methods .....	7
2.3.2 Graph Modeling Methods .....	8
2.4 Large-model Route: LLM-driven Recommendation .....	9
2.4.1 LLM Applications in Recommender Systems .....	9
2.4.2 Progress of LLMs in Next POI Recommendation .....	10
2.4.3 Current Major Bottlenecks .....	10
2.5 Research Gaps and Problem Formulation .....	10
2.6 Chapter Summary .....	11
Chapter 3 Collaborative Learning with Small and Large Models .....	12
3.1 Task Definition and Overall Framework .....	12
3.2 Small-model Branch: TSPM .....	12
3.2.1 Time-enhanced Sequential Dynamic Graph (TSDG) .....	12

---

3.2.2 Bidirectional Transition Modeling .....	13
3.2.3 Sequential Preference Modeling and Dynamic Graph Weights .....	13
3.2.4 TiRNN Prediction Head .....	13
3.3 Large-model Branch: GA-LLM .....	14
3.3.1 Problem Motivation .....	14
3.3.2 GCIM: Geographic Coordinate Injection Module .....	14
3.3.3 PAM: POI Alignment Module .....	14
3.3.4 Structured Prompt Construction .....	15
3.4 Fusion Strategy: Small-Large Model Collaborative Training .....	15
3.4.1 Two-stage Training Procedure .....	15
3.4.2 Inference Mechanism .....	15
3.5 Chapter Summary .....	15
Chapter 4 Experimental Design and Results Analysis .....	16
4.1 Experimental Objectives and Research Questions .....	16
4.2 Datasets and Evaluation Metrics .....	16
4.2.1 Datasets .....	16
4.2.2 Evaluation Metrics .....	16
4.3 Small-model Experiments: TSPM Results .....	16
4.3.1 Overall Comparison Results .....	16
4.3.2 Ablation Study Results .....	17
4.4 Large-model Experiments: GA-LLM Results .....	17
4.4.1 Key Findings .....	17
4.4.2 GCIM Analysis .....	17
4.4.3 PAM Analysis .....	18
4.4.4 Efficiency and Scalability .....	18
4.5 Comprehensive Discussion on the Fusion Model .....	18
4.6 Experimental Summary .....	18
Conclusion and Future Work .....	19
References .....	20

# 第一章 绪论

## 1.1 本章引言

本章作为全文的总体导引，主要回答“为什么做、做什么、如何做、做出了什么”四个核心问题。首先从推荐系统向线下时空决策延展的现实背景出发，说明 Next POI 任务的研究价值；随后给出本文关注的问题边界与核心挑战，明确现有方法在时间异质性、空间一致性和转移先验注入方面的不足；在此基础上概述本文的大小模型协同技术路线、主要创新点与章节组织关系，为后续相关研究、方法细节和实验验证建立统一叙事主线。

## 1.2 研究背景

在数字经济快速发展的背景下，推荐系统已成为互联网平台的核心基础能力，并持续重塑用户的信息获取与消费决策方式。在电商场景中，阿里巴巴、拼多多、京东、亚马逊等平台通过个性化推荐连接“人-货-场”，显著提升了商品发现效率与交易转化；在内容分发场景中，抖音、小红书、快手等平台依托推荐机制完成兴趣匹配，深刻影响用户的注意力分配与内容消费习惯。可以看到，推荐系统已从单一功能模块演进为平台竞争力的关键基础设施。

随着推荐范式由“线上内容匹配”逐步扩展到“线下服务决策支持”，位置感知推荐的重要性持续上升。以美团、大众点评、滴滴等本地生活与出行平台为例，系统不仅需要回答“用户喜欢什么”，还需要在具体时空约束下回答“用户此刻去哪里、下一步可能前往何处”。在这一过程中，地理位置已由辅助特征转化为核心变量：其既影响候选集合的可达边界，也直接决定推荐结果的时效性与可执行性。因此，下一兴趣点推荐（Next Point-of-Interest Recommendation, Next POI）成为连接推荐系统、地理信息建模与城市计算的重要研究问题。

与传统项目推荐相比，Next POI 任务同时受地理可达性、时间节律、活动语义与行为路径连续性的共同约束。随着智能手机、移动互联网和位置服务平台的普及，用户在日常生活中持续产生大规模时空行为数据；以签到轨迹为代表的记录不仅包含“去过哪里”，还隐含“何时去、从哪里来、下一步去哪”的动态规律。这为该任务提供了坚实的数据基础，也使其在学术研究与工程应用层面都具有突出价值。

---

## 1.3 研究意义

本文工作的意义主要体现在理论与应用两个层面。

- 1) 理论意义：Next POI 任务位于“时空序列建模 + 图结构学习 + 语言语义推理”的交叉区域。围绕该任务构建统一框架，有助于回答一个更普遍的问题：在复杂真实场景中，结构归纳偏置与大模型语义能力应如何协同，而不是相互替代。
- 2) 方法意义：现有方法往往在单一维度做到较优，例如序列方法在局部时序上较强、图方法在高阶关系上较强、LLM 在语义泛化上较强。本文尝试给出一条工程可落地的融合路径，使“结构建模能力”与“语义推理能力”在同一训练框架内形成互补。
- 3) 应用意义：在本地生活、城市出行和文旅推荐等场景中，系统需要在有限时空约束下提供可执行推荐。若预测结果与真实地理规律不一致，即使语义上“看起来合理”，也难以形成有效服务。本文强调的空间一致性与转移可解释性，直接关系到系统的可用性与用户信任。

## 1.4 研究问题分解

为避免“问题过大、方法过散”，本文将总体目标分解为五个可验证子问题，并在后文通过 RQ 体系进行闭环验证：

- 1) **P1**：时段异质性建模。同一 POI 在不同时间段具有不同的转移规律，如何以低额外成本显式建模该异质性；
- 2) **P2**：双向转移表达。下一跳预测不仅取决于“当前点指向谁”，也取决于“目标点通常从哪里来”，如何同时表达转出与转入偏好；
- 3) **P3**：地理连续性注入。LLM 语义空间不天然满足地理邻近关系，如何将经纬度与空间层级先验注入语义编码流程；
- 4) **P4**：结构先验跨空间对齐。图模型学得的 POI 关系如何映射到 LLM 语义空间，并在推理阶段持续发挥作用；
- 5) **P5**：协同训练可部署。在效果提升之外，如何保证训练成本、推理时延与参数规模仍处于可接受范围。

通过上述分解，本文将“是否有效”与“为什么有效”区分处理，从而避免仅凭主结果表格给出结论。

# 1.5 问题陈述

本文关注的核心问题是：给定用户历史签到轨迹及其时间、空间和语义上下文，预测用户下一时刻最可能访问的 POI，并输出 Top- $K$  候选列表。该问题兼具序列预测与结构推断属性，要求模型同时具备局部时空建模能力与跨场景泛化能力。

本文不在绪论中展开完整符号体系与公式定义，统一的任务定义与符号约定放在第二章给出，作为全文的单一依据。

# 1.6 核心挑战

尽管现有研究已在时空推荐方向取得进展，面向真实出行场景的 Next POI 建模仍面临以下挑战：

- 1) 时间异质性挑战：同一 POI 在不同时间段的转移模式差异显著，统一转移机制容易造成建模偏差；
- 2) 空间连续性挑战：经纬度与语义表示空间之间缺乏天然同构，纯文本建模容易产生地理不一致预测；
- 3) 转移先验注入挑战：仅依赖文本上下文时，模型难以充分利用 POI 图中的高阶转移关系；
- 4) 协同优化挑战：小模型结构先验与大模型语义能力如何在统一框架内稳定协同，仍缺乏系统方案。

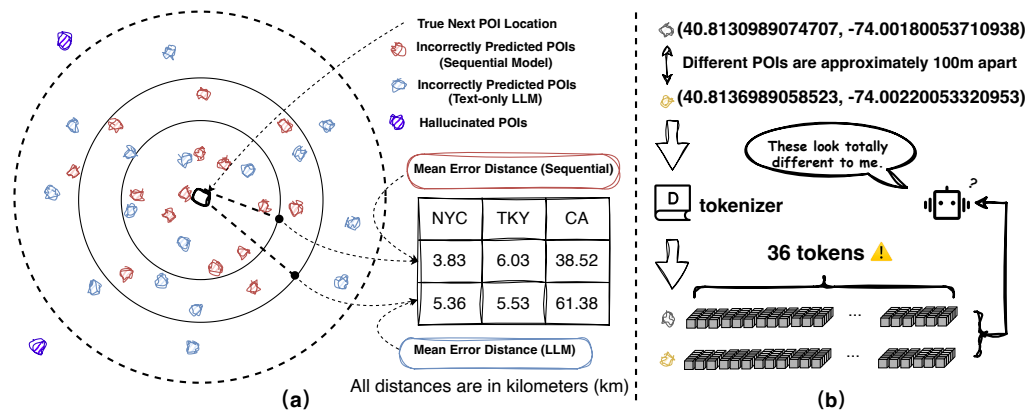


图 1-1 空间连续性挑战示意：原始坐标文本难以稳定保持地理邻近关系，导致语义空间与地理空间错位。

如图1-1所示，直接将坐标作为文本输入时，模型难以在语义空间中保持真实地理邻近结构。该现象说明 Next POI 任务需要专门的地理编码机制，而非仅

依赖通用文本建模。基于这一挑战，本文在第三章设计 GCIM 模块以增强空间一致性。

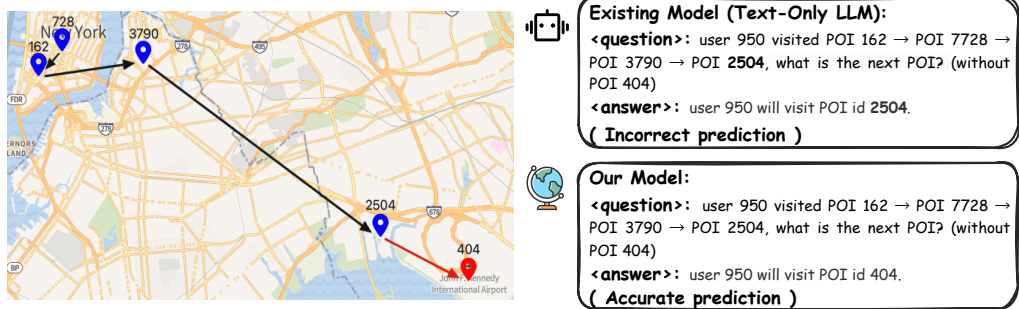


图 1-2 转移先验注入挑战示意：仅依赖 token 语义难以恢复 POI 图中的高阶迁移关系。

如图1-2所示，若缺少结构化对齐路径，模型对“未显式出现但高转移概率”的候选点识别能力不足。该现象说明 POI 关系先验需要显式注入语义空间，而非完全依赖隐式学习。基于这一挑战，本文在第三章设计 PAM 模块以提升转移感知能力。

## 1.7 研究思路与技术路线

针对上述挑战，本文采用“大小模型协同学习”的总体路线：

- 1) 在小模型侧构建时间增强序列动态图与双向转移机制，学习稳定的时空结构先验；
- 2) 在大模型侧设计地理坐标注入模块与 POI 对齐模块，增强 LLM 的空间一致性与转移感知能力；
- 3) 通过嵌入对齐与两阶段训练，将结构知识与语义推理能力融合到统一框架中。

该路线的目标不是简单叠加模型，而是在可部署约束下实现“结构归纳偏置 + 语义泛化能力”的互补增益。

## 1.8 研究内容与工作安排

围绕上述路线，本文研究内容可进一步细化为四项工作：

- 1) 任务分析与基线整理：系统梳理 Next POI 领域中的序列、图与 LLM 三类方法，统一问题定义、指标解释与实验比较边界；
- 2) 小模型机制设计：围绕时间异质性与迁移方向性，设计 TSDG 与双向转移建模，并通过动态图权重增强复杂场景区分能力；

- 
- 3) 大模型增强设计：围绕地理连续性与转移先验缺失，设计 GCIM 与 PAM 模块，将结构先验以可训练方式注入 LLM；
  - 4) 实验验证与诊断分析：基于 RQ 组织实验证据，覆盖主结果、消融、误差类型、效率开销与部署讨论，形成“设置-结果-解释”闭环。

从论文完成度角度，本文不仅给出模型结果，也强调问题定义、机制解释、局限分析与复现细节，以满足毕业论文对研究深度与工作态度的要求。

## 1.9 主要贡献

本文主要贡献如下：

- 1) 提出面向 Next POI 任务的大小模型协同框架，统一时空结构建模与语义推理过程；
- 2) 设计时间增强序列动态图与双向转移建模机制，提升小模型对复杂出行规律的表达能力；
- 3) 设计地理坐标注入模块（GCIM）与 POI 对齐模块（PAM），缓解 LLM 空间幻觉并增强跨场景泛化；
- 4) 构建围绕研究问题的实验评估流程，从总体性能、模块贡献、协同有效性与效率开销四个维度验证方法有效性。

## 1.10 论文结构安排

全文共五章，组织如下：

- 1) 第 1 章为绪论，介绍研究背景、核心挑战、技术路线与主要贡献；
- 2) 第 2 章为相关研究与问题分析，给出统一任务定义与符号约定，综述相关方法并凝练研究空白；
- 3) 第 3 章为方法章，详细阐述小模型分支、大模型分支及协同训练机制；
- 4) 第 4 章为实验章，按研究问题组织实验设置、结果分析与机制诊断；
- 5) 第 5 章为结论与展望，总结全文并讨论后续研究方向。

## 1.11 本章小结

本章从应用背景与学术问题两个层面阐明了 Next POI 研究的必要性，并围绕任务特点提炼了时间异质性、空间连续性、转移先验注入和协同优化四类关键挑战。针对上述问题，本文给出了“结构先验建模 + 语义推理增强 + 协同对齐训



---

练”的总体思路，明确了主要贡献与后续章节分工。下一章将进一步通过文献综述与问题分析，建立本文方法设计的理论与经验依据。

## 第二章 相关研究与问题分析

### 2.1 本章引言

本章目标是建立全文统一的问题分析基线，回答“已有研究做到什么程度、仍缺什么、本文据此如何建模”三个问题。具体而言，本章首先给出全篇唯一的任务定义与符号体系，并说明评价指标的语义与实验协议边界；随后分别综述小模型路线与大模型路线的代表工作及其局限；最后将文献证据收敛为可执行的研究空白（Gap）和建模原则（DP），为第三章的方法设计提供直接依据。

### 2.2 任务定义与符号约定

设用户集合为  $\mathcal{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ ，POI 集合为  $\mathcal{L} = \{\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_N\}$ 。用户  $u$  的第  $i$  条签到记为

$$x_i = (u, \ell_i, t_i, g_i, c_i), \quad (2-1)$$

其中  $\ell_i$  为 POI 标识， $t_i$  为时间戳， $g_i = (lat_i, lon_i)$  为地理坐标， $c_i$  为类别语义。用户轨迹表示为

$$\mathcal{T}_u = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad t_1 < t_2 < \dots < t_n. \quad (2-2)$$

Next POI 任务可表示为学习映射

$$f: \mathcal{T}_u \mapsto \hat{\ell}_{n+1}, \quad \hat{\ell}_{n+1} \in \mathcal{L}, \quad (2-3)$$

使真实下一 POI  $\ell_{n+1}$  在候选排序中尽可能靠前。若输出 Top- $K$  列表，记为  $\hat{\mathbf{y}}_u = [\hat{\ell}^{(1)}, \dots, \hat{\ell}^{(K)}]$ 。

为减少后续章节符号歧义，表2-1给出本文高频符号及含义。

#### 2.2.1 任务边界与建模假设

为保证论证聚焦，本文采用如下假设与边界设置：

- 1) 时间先验可用：训练与测试数据均包含可解析时间戳，且可划分为统一时段；

表 2-1 核心符号说明

符号	含义
$\mathcal{U}, \mathcal{L}$	用户集合与 POI 集合
$\mathcal{T}_u$	用户 $u$ 的时间有序签到轨迹
$x_i$	= 第 $i$ 次签到记录 (用户、POI、时间、坐标、类别)
$(u, \ell_i, t_i, g_i, c_i)$	
$T_z$	第 $z$ 个时间槽 (Time Slot)
$\xi^{out}, \xi^{in}$	小模型中 POI 转出/转入表示
$\mathbf{E}_{GPS}, \mathbf{E}_{poi}$	大模型侧地理编码与 POI 对齐表示
$\hat{\mathbf{y}}_u$	模型输出的 Top- $K$ 推荐列表
$r_n$	测试样本中真实 POI 的排序位次
$\mathcal{L}_{small}, \mathcal{L}_{align}, \mathcal{L}_{llm}$	小模型损失、跨空间对齐损失与大模型任务损失

- 2) 地理信息可用: POI 具备经纬度坐标, 允许构建地理约束与距离相关特征;
- 3) 用户历史可观测: 每个测试样本至少存在最小历史长度, 以支持序列建模;
- 4) 离线评估优先: 本文主实验聚焦离线 Top- $K$  评估, 不直接讨论在线 A/B 系统收益。

这些边界并不削弱问题价值, 而是用于保证比较公平与可复现。对超出边界的场景 (如极短轨迹、无坐标、实时概念漂移), 将在第4.14章与附录中讨论可能扩展路径。

## 2.3 评价指标与实验协议说明

本文采用 Acc@K、MRR 与 NDCG@K 评价排序质量:

$$\text{Acc@K} = \frac{1}{|\mathcal{D}|} \sum_{n=1}^{|\mathcal{D}|} \mathbf{1}(r_n \leq K), \quad (2-4)$$

$$\text{MRR} = \frac{1}{|\mathcal{D}|} \sum_{n=1}^{|\mathcal{D}|} \frac{1}{r_n}, \quad (2-5)$$

$$\text{NDCG@K} = \frac{1}{|\mathcal{D}|} \sum_{n=1}^{|\mathcal{D}|} \frac{\mathbf{1}(r_n \leq K)}{\log_2(r_n + 1)}. \quad (2-6)$$

其中  $r_n$  为第  $n$  个样本中真实 POI 的排名。Acc@K 反映命中能力, MRR 强调首个正确结果的位置, NDCG@K 更关注头部排序质量。

本节仅说明指标含义与使用理由。数据划分、负采样、显著性检验和实现细节统一在第四章给出。

---

### 2.3.1 指标解释补充

在 Next POI 场景中，不同指标对应不同系统目标：

- 1) **Acc@1** 反映“第一推荐是否可直接点击”，通常对用户体验最敏感；
- 2) **Acc@5/10** 反映候选列表覆盖能力，适用于存在二次筛选交互的场景；
- 3) **MRR** 反映正确答案的平均前移程度，能够区分“命中但排名靠后”与“命中且靠前”；
- 4) **NDCG@K** 对头部位置赋予更高权重，适合评估排序质量而非仅命中与否。

因此，本文不以单一指标给出结论，而是从“首位可用性、候选覆盖、排序质量”三个维度综合判断方法有效性。

## 2.4 小模型路线综述：序列与图方法

### 2.4.1 序列建模方法

FPMC<sup>[1]</sup>、PRME<sup>[2]</sup> 等方法以“偏好建模 + 转移建模”为核心；ST-RNN<sup>[3]</sup>、HST-LSTM<sup>[4]</sup>、LSTPM<sup>[5]</sup>、STAN<sup>[6]</sup> 将时空上下文与注意力机制引入序列编码；CLSPRec<sup>[7]</sup>、FHCRc<sup>[8]</sup> 进一步通过对比学习提升稀疏场景鲁棒性。

局限与启示：序列模型对局部行为刻画精细，但在时间异质性显式建模和跨用户高阶迁移利用上仍不足，提示本文需引入“时间分段建模 + 结构化转移先验”。

进一步讨论 序列路线的另一个共性问题是对“远距离兴趣跳转”的解释不足。仅凭短期历史时，模型容易将预测压向高频近邻点，导致在跨区域通勤、目的性出行等场景中出现系统性偏差。这一现象提示我们：仅提升序列编码器深度并不能自然解决可达性与结构先验问题，仍需显式引入图结构或地理约束。

### 2.4.2 图建模方法

GETNext<sup>[9]</sup>、GraphFlashback<sup>[10]</sup>、STHGCN<sup>[11]</sup>、SNPM<sup>[12]</sup> 等方法通过 POI 图或异构图学习高阶关系，缓解稀疏监督问题；ROTAN<sup>[13]</sup>、MTNet<sup>[14]</sup> 则强化时间动态建模。

局限与启示：图方法在结构学习上表现突出，但动态图更新成本和异构信息融合复杂度较高，提示本文需在表达能力与可部署性之间做轻量平衡。

进一步讨论 图路线通常依赖全局邻接关系学习高阶迁移，这一优势在数据充足时十分明显，但也带来两个工程问题：其一，动态图重构与邻居采样在大规模场景中开销较高；其二，图表示与语言语义空间缺乏天然对齐，导致与 LLM 协作时存在“信息可用但难注入”的鸿沟。本文后续 PAM 模块即针对第二个问题给出对齐路径。

## 2.5 大模型路线综述：LLM 驱动推荐

### 2.5.1 LLM 在推荐中的应用

CoLLM<sup>[15]</sup>、CoRAL<sup>[16]</sup>、LLMRec<sup>[17]</sup>、ReLLa<sup>[18]</sup> 等工作验证了 LLM 在语义理解、长上下文推理和长尾泛化中的潜力；SeCor<sup>[19]</sup>、LLaRA<sup>[20]</sup> 进一步展示了 LLM 在序列推荐中的可行性。

### 2.5.2 LLM 在 Next POI 中的进展

LLM4POI<sup>[21]</sup> 将任务转为提示生成，验证了冷启动潜力；GA-LLM<sup>[22]</sup> 针对空间幻觉与转移先验缺失提出地理坐标注入与 POI 对齐机制，显著改善地理一致性。

局限与启示：现有 LLM 方案普遍面临坐标语义稀疏、空间连续性不足和转移先验注入弱的问题，说明 Next POI 场景需要“结构先验 + 语义推理”的协同机制，而非纯文本提示。

### 2.5.3 小结性对比

为更清晰地展示三类方法的能力边界，表2-2给出总结性比较。

表 2-2 序列、图与 LLM 路线能力边界对比

路线	主要优势	主要短板	对本文设计启示
序列模型	局部时序表达强，参数规模相对可控	对高阶迁移与跨场景泛化支持有限	需要补充结构化转移先验与时段异质性建模
图模型	高阶关系建模能力强，能缓解稀疏监督	动态更新成本高，与语义空间融合困难	需要轻量动态图建模与可映射表示空间
LLM 模型	语义理解与泛化能力强，适合复杂意图	地理连续性弱，纯文本坐标表达不稳定	需要专门地理编码与 POI 先验注入机制

---

## 2.6 生成式推荐与显式推理研究进展

随着生成式推荐的发展，研究重点已从“把推荐写成文本生成”逐步转向“让模型显式地进行中间推理”。这一路线强调：在复杂推荐任务中，仅靠隐式注意力难以稳定地执行约束推断，显式推理链、检索增强与结构对齐是提升稳定性的关键。

### 2.6.1 从指令调优到统一生成框架

近年来，LLM 推荐研究在范式上呈现三步演化。第一步是将推荐任务指令化并进行参数高效微调，如 InstructRec、RecGPT 与 Chat-REC<sup>[23,24,25]</sup>。第二步是将召回、排序与解释统一到单一生成框架，如 LLMRec、CoLLM 与 CoRAL<sup>[17,15,16]</sup>。第三步是在统一框架中加入外部检索与结构先验以缓解幻觉和不一致，如 ReLLa、SeCor 与 LLaRA<sup>[18,19,20]</sup>。围绕该路线，也出现了排序增强、记忆增强与提示优化等工作<sup>[26,27,28,29]</sup>，并催生了更系统的综述研究<sup>[30,31,32,33]</sup>。

### 2.6.2 显式推理范式：OneRec 与 OneRec-Think 类工作

与“直接生成答案”不同，显式推理范式强调中间决策轨迹，例如候选过滤、约束检查、理由归纳与自我校验。OneRec 及其后续显式推理扩展（如 OneRec-Think）体现了这一趋势<sup>[34,35]</sup>。同类工作还将链式思考与智能体规划引入推荐推断过程<sup>[36,37,38]</sup>。这类方法的共同点是：模型不只输出最终推荐，还输出可追溯的中间依据，从而提升一致性与可解释性。

对 Next POI 任务而言，显式推理的价值主要在三方面：其一，可将“距离可达性、时段约束、历史路径方向”显式纳入决策；其二，可将结构先验作为推理证据而非黑盒隐变量；其三，可在错误分析中定位到底是语义误判还是约束违背。这与本文“GCIM + PAM + 协同重排序”的思路在方法论上是一致的，即把不可控隐式学习转化为可诊断的显式推断流程。

### 2.6.3 与本文方法的关系

本文不直接复制通用 CoT 模板，而是采用“结构对齐 + 轻量协同”的技术路线。原因在于：Next POI 场景具有强时空约束与低时延要求，若直接引入冗长推理链，可能带来明显时延与鲁棒性波动。相比之下，本文将推理需求压缩为“可学习对齐模块 + 可控融合打分”，在效率和稳定性上更适合部署场景。

---

## 2.7 中文研究脉络与本土场景启示

中文学术界在推荐系统、序列推荐和图推荐方面已形成较系统研究脉络<sup>[39,40,41,42]</sup>。在时空行为建模与位置推荐方面，研究重点逐步转向“地理约束 + 行为节律”的联合建模<sup>[43,44,45,46,47]</sup>。在大模型推荐与生成式推荐方面，近年的讨论集中于可解释性、RAG 与工程落地<sup>[48,49,50,51,52]</sup>，并与城市时空智能应用形成交叉<sup>[53]</sup>。

这些中文研究对本文有两点直接启示。第一，真实业务中“可解释 + 可部署”通常与“离线最优”同等重要，方法设计不能只追求指标提升。第二，国内 LBS 与本地生活场景具备高密度、强约束、强实时特征，要求推荐模型在地理一致性与时延之间做更细粒度权衡。本文采用协同框架而非单一路线，正是基于上述工程现实做出的方法选择。

## 2.8 扩展文献归纳

为完整刻画本文研究语境，本文参考了经典协同过滤与排序学习文献<sup>[54,55,56,57]</sup>，以及序列推荐主线工作<sup>[58,59,60,61]</sup>。在图推荐与自监督学习方面，重点参考了轻量图卷积、知识图增强与图对比学习工作<sup>[62,63,64,65,66]</sup>。

在时空推荐与 Next POI 方向，本文重点覆盖了序列、图与混合路线的代表方法<sup>[67,68,1,2,3]</sup>，以及近期性能较强的时空图方法<sup>[9,10,12,13,14]</sup>。在 LLM 与基础模型方向，本文参考了通用推荐增强、POI 专用增强与显式推理工作<sup>[21,22,69,70,35]</sup>。

## 2.9 研究空白与本文建模原则

基于上述综述，本文将研究空白归纳为以下三点：

- 1) **Gap-1**：小模型强结构、弱语义，难以覆盖复杂意图表达与跨场景泛化；
- 2) **Gap-2**：大模型强语义、弱空间，难以稳定保持地理连续性与可达性约束；
- 3) **Gap-3**：缺少面向工程部署的统一协同训练方案，难以兼顾效果与成本。

据此提出本文的建模原则：

- 1) **DP-1**（结构先验显式化）：在小模型侧显式建模时间异质性与双向转移关系；
- 2) **DP-2**（空间语义对齐）：在大模型侧引入地理编码与 POI 结构对齐模块；
- 3) **DP-3**（协同训练可部署）：通过两阶段训练和参数高效微调实现稳定融合。

---

相应地，本文联合优化目标写为

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{small}} + \lambda_1 \mathcal{L}_{\text{align}} + \lambda_2 \mathcal{L}_{\text{llm}} + \lambda_3 \mathcal{L}_{\text{reg}}, \quad (2-7)$$

其中各损失项分别对应时空结构学习、跨模型对齐、生成/分类学习与复杂度控制。

### 2.9.1 从研究空白到研究问题（RQ）映射

为保证后续实验可以直接检验建模假设，本文将 Gap/DP 与 RQ 的映射关系明确如下：

- 1) Gap-1 对应 DP-1，并在 RQ2 中通过小模型消融验证；
- 2) Gap-2 对应 DP-2，并在 RQ3 中通过 GCIM/PAM 诊断验证；
- 3) Gap-3 对应 DP-3，并在 RQ4、RQ5 中通过协同收益与效率评估验证。

该映射关系使论文论证链条从“问题识别”到“方法设计”再到“证据验证”保持一致，避免章节之间出现目标漂移。

## 2.10 本章小结

本章围绕“定义统一、综述评估、空白凝练”三条主线完成了问题分析。首先，给出了全文唯一任务定义与符号约定，避免后续章节重复描述；其次，系统比较了小模型与大模型在结构建模、语义泛化与工程开销上的能力边界；最后，将文献中的共性不足归纳为三类研究空白，并据此提出结构先验显式化、空间语义对齐和协同训练可部署三项建模原则。下一章将按照这些原则展开具体模型设计与训练机制说明。



## 第三章 大小模型协同学习方法

### 3.1 本章引言

基于第二章给出的研究空白与建模原则，本章给出本文方法的完整实现方案，重点回答“协同框架如何搭建、关键模块如何工作、训练与推理如何落地”三个问题。为保证论证清晰，本章按小模型分支、大模型分支和协同训练策略依次展开，并将每个模块与对应研究问题（RQ）建立映射关系，从而为第四章的实验验证提供可追溯的机制假设。本文方法综合继承了前期工作 TSPM 与 GA-LLM 的有效设计思想<sup>[71,22]</sup>，并在毕业论文中进一步统一为可协同的单一框架。

### 3.2 总体框架与设计动机

基于第二章的问题分析，本文方法由三个部分构成：

- 1) 小模型分支 TSPM：学习时间敏感的时空转移结构<sup>[71]</sup>；
- 2) 大模型分支 GA-LLM：增强地理连续性建模与 POI 先验注入<sup>[22]</sup>；
- 3) 融合分支：通过嵌入对齐与两阶段训练实现协同优化。

设计动机是将小模型的结构归纳偏置与大模型的语义推理能力进行互补融合，避免单一路径在精度、鲁棒性或泛化能力上的短板。序列/图模型在局部转移建模上具有优势<sup>[9,11,13,14]</sup>，而 LLM 在语义迁移与复杂上下文理解上更强<sup>[21,20,19]</sup>；本文的关键是构建一条低损耗的信息通道，使二者不再相互替代，而是协同增益。

如图3-1所示，框架完整展示了从轨迹输入、双分支特征学习到协同输出的端到端信息流。该结构说明本文并非简单模型拼接，而是通过映射与联合优化实现结构知识和语义知识的协同。该设计对应第四章 RQ1 与 RQ4，用于验证协同机制相对单分支的整体收益。

#### 3.2.1 输入构建与数据流定义

为便于实现与复现，本文将输入组织为三类并行流：

- 1) 序列流：由时间有序 POI 序列构成，用于 TSPM 提取局部与短期迁移模式；
- 2) 结构流：由动态图邻接关系构成，用于建模高阶转移与区域约束；
- 3) 语义流：由轨迹文本、POI 语义 token 与地理 token 构成，用于 GA-LLM 进

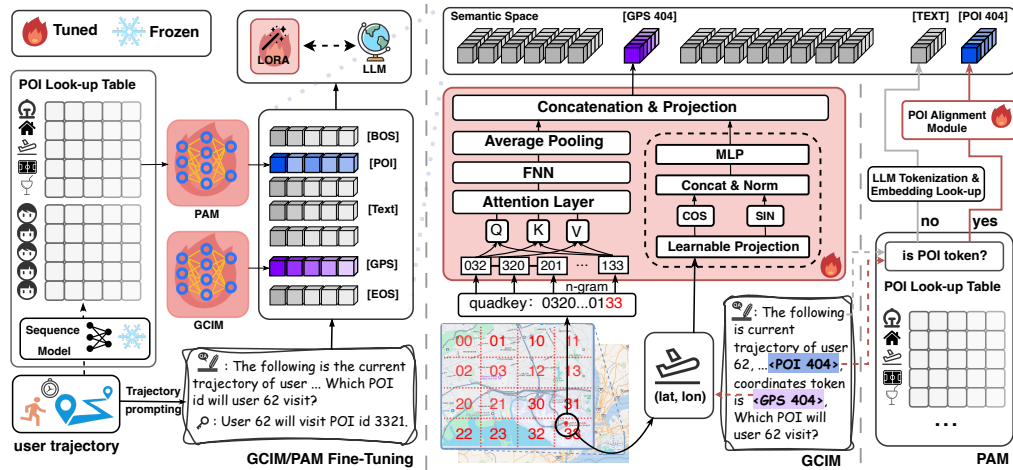


图 3-1 大小模型协同框架总览：输入轨迹经 TSPM 与 GA-LLM 双分支编码后，通过对齐与协同训练得到最终 Top-K 推荐结果。

行语义推理。

三类输入在特征层保持相对独立，在损失层与推理层进行耦合。该设计可避免“早期强融合导致互相干扰”，并降低训练初期梯度不稳定风险。

### 3.2.2 核心符号与问题映射

为避免符号重复，本章仅使用第二章给定的任务定义，并补充实现级变量。核心符号见表3-1。

表 3-1 方法章核心符号说明

符号	含义
$\mathcal{U}, \mathcal{L}$	用户集合与 POI 集合
$\mathbf{e}_i, \mathbf{E}_u$	POI 嵌入与用户嵌入
$T_i$	第 $i$ 次访问对应时间槽嵌入
$\xi^{out}, \xi^{in}$	双向转移表示（转出/转入）
$\xi_{seq}$	历史序列聚合表示
$\mathbf{E}_{GPS}$	GCIM 输出的地理表示
$\mathbf{E}_{poi}$	PAM 映射后的 POI 语义表示
$\mathcal{L}_{time}, \mathcal{L}_{seq}$	TSPM 中时间转移损失与序列损失
$\mathcal{L}_{geo}, \mathcal{L}_{align}, \mathcal{L}_{gen}$	测地一致性损失、跨空间对齐损失与生成损失
$\eta$	推理阶段 LLM 与 TSPM 融合权重

### 3.2.3 协同设计原则

本文在框架层遵循三条工程原则：

- 1) 先对齐后协同：先保证不同空间表示可互相读取，再进行联合优化；
- 2) 模块可插拔：GCIM、PAM 与 TSPM 均可独立启停，便于消融诊断；

- 3) 训练资源可控：大模型侧以参数高效微调为主，避免全参更新带来的成本激增。

### 3.3 小模型分支：TSPM

#### 3.3.1 时间增强序列动态图（TSDG）

为刻画不同时间段的迁移差异，将一天划分为  $z$  个时间槽  $\{T_1, \dots, T_z\}$ ，并在各时间槽内构建 POI 转移子图。对当前 POI 嵌入  $\mathbf{e}_i$  与时间槽嵌入  $\mathbf{t}_i$ ，定义时间感知的转出与转入表示：

$$\xi_{i,T_i}^{out} = \sigma([\mathbf{e}_i || \mathbf{t}_i] \mathbf{W}_{out}^t + \mathbf{b}_{out}^t), \quad (3-1)$$

$$\xi_{j,T_i}^{in} = \sigma([\mathbf{e}_j || \mathbf{t}_i] \mathbf{W}_{in}^t + \mathbf{b}_{in}^t). \quad (3-2)$$

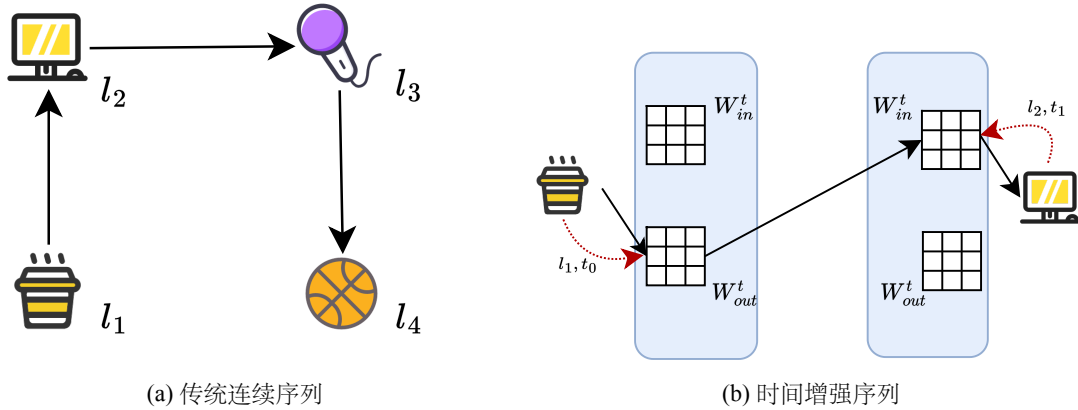


图 3-2 传统序列与时间增强序列的建模对比。

如图3-2所示，传统序列将不同时间段的迁移关系混合建模，而时间增强序列能显式区分时段特征。该现象说明“同一 POI 在不同时段具有不同转移分布”是必须建模的结构事实。该结论直接回扣本节 TSDG 设计，并将在第四章 RQ2 中通过消融实验验证。

待验证命题：显式时间分槽可提升模型对时段异质行为的建模能力（对应第四章 RQ2）。

**时间分槽策略讨论** 时间分槽粒度过粗会掩盖行为差异，过细会造成样本稀疏。本文采用“以行为节律为导向”的折中策略，即优先保证每个时段具有足够样本密度，再在验证集上微调分槽数量。该策略相比固定等距切分更贴近真实城市活动

节奏。

### 3.3.2 双向转移建模

为同时建模“从哪里来”和“将去哪里”，采用双向对比损失：

$$\mathcal{L}_{time} = - \sum_t \log \sigma (\|\xi_{i,T}^{out} - \xi_{-,T}^{in}\|_2^2 - \|\xi_{i,T}^{out} - \xi_{+,T}^{in}\|_2^2), \quad (3-3)$$

其中 + 与 - 分别表示正负样本 POI。

待验证命题：双向转移优于单向转移，可减少路径偏置并提升下一跳预测稳定性（对应 RQ2）。

损失函数直观解释 式(3-3)的核心是将“当前点到真实下一点”的距离压缩，同时将“当前点到负样本点”的距离拉开。与单向建模相比，双向表示可同时约束“出边合理性”和“入边合理性”，从而减少只依赖历史高频模式造成的方向偏置。

### 3.3.3 序列偏好建模与动态图权重

将最近  $k$  个访问拼接得到序列表示：

$$\xi_{seq} = \sigma ([\mathbf{e}_t \| \mathbf{e}_{t-1} \| \cdots \| \mathbf{e}_{t-k}] \mathbf{W}^s + \mathbf{b}^s), \quad (3-4)$$

并使用序列对比损失：

$$\mathcal{L}_{seq} = - \sum_t \log \sigma (\|\xi_{seq} - \mathbf{e}_t^-\|_2^2 - \|\xi_{seq} - \mathbf{e}_{t+1}^+\|_2^2), \quad (3-5)$$

综合得到

$$\mathcal{L}_{TSPM} = \alpha \mathcal{L}_{time} + \beta \mathcal{L}_{seq}. \quad (3-6)$$

据此定义动态图边权：

$$s_{i,j}^d = \exp (-\rho_1 \|\xi_{seq} - \mathbf{e}_j\|_2^2 - \rho_2 \|\xi_{i,T}^{out} - \xi_{j,T}^{in}\|_2^2). \quad (3-7)$$

待验证命题：动态图权重可提升复杂迁移场景下的区分能力（对应 RQ2、RQ4）。

负采样策略 为避免训练信号过于简单，本文采用“同区域硬负样本 + 跨区域随机负样本”混合策略：前者提高局部区分难度，后者维持全局判别边界。该策略有助于提升模型在近邻候选中的排序精度，并减少模型仅学习区域标签的风险。

### 3.3.4 TiRNN 预测头

为建模多步历史依赖，TiRNN 对过去  $K$  个隐状态加权融合：

$$\mathbf{c}_t = \sum_{k=1}^K \alpha_k (\mathbf{h}_{t-k} \circ \mathbf{r}_k), \quad (3-8)$$

$$\mathbf{h}_t = \sigma(\kappa \mathbf{v}_t + \mathbf{c}_t), \quad \hat{\mathbf{y}}_t = \text{Softmax}(\mathbf{W}_f[\hat{\mathbf{h}}_t \| \mathbf{E}_u]). \quad (3-9)$$

预测头设计动机 TiRNN 并非替代前述结构模块，而是作为“时序聚合终端”整合动态图编码结果。通过显式聚合多步隐状态，模型可以在“短期活动惯性”和“中期出行计划”之间动态权衡，从而减少单步过拟合问题。

## 3.4 大模型分支：GA-LLM

### 3.4.1 GCIM：地理坐标注入模块

GCIM 采用“层级离散 + 连续频域”双分支编码：

$$\mathbf{E}_{fourier} = \frac{1}{\sqrt{M}} [\cos(\mathbf{g}\mathbf{W}_s^\top) \parallel \sin(\mathbf{g}\mathbf{W}_s^\top)], \quad (3-10)$$

$$\mathbf{E}_{GPS} = \mathbf{W}_{GPS}[\mathbf{E}_{quad} \parallel \mathbf{E}_{fourier}]. \quad (3-11)$$

针对第一章图1-1所示的空间错位问题，GCIM 在实现层面通过 Quadkey 分支编码层级区域结构，通过 Fourier 分支编码连续距离变化，并在投影层完成统一融合。该设计使地理关系以结构化方式进入 LLM 输入空间，为后续地理一致性约束提供可优化的表示基础。

待验证命题：GCIM 可显著改善地理一致性并降低远跳错误（对应 RQ3、RQ4）。

为何采用 Quadkey + Fourier Quadkey 适合表达“区域层级归属”，Fourier 适合表达“连续坐标变化模式”<sup>[72,73,22]</sup>。前者提供离散空间结构，后者提供连续距离敏感性，二者互补后可同时保留地理分区稳定性与局部变化分辨率。该设计可避免仅

离散编码导致的边界不连续，也避免仅连续编码导致的区域语义缺失。

### 3.4.2 PAM: POI 对齐模块

PAM 将图模型 POI 表示映射到 LLM 语义空间：

$$\mathbf{E}_{poi} = \text{PAM}(\mathbf{e}_{poi}) = \mathbf{W}_p \mathbf{e}_{poi} + \mathbf{b}_p. \quad (3-12)$$

针对第一章图1-2所示的转移先验缺失问题，PAM 在实现层面构建“结构表征到语义表征”的线性映射通道，并将图模型中的迁移知识注入 LLM 语义空间。该路径避免了仅靠 token 共现学习关系的局限，使模型在候选稀疏和目标未显式出现时仍可利用结构先验进行推断。

待验证命题：PAM 可提升目标 POI 未显式出现时的预测能力（对应 RQ3、RQ4）。

对齐目标 PAM 的目标不是“替代 LLM 语义”，而是建立一条可学习映射，使图模型中可迁移的结构关系能够在 LLM 空间中被读取和利用。换言之，PAM 承担的是“知识通道”角色，核心价值在于降低跨空间信息损失。

### 3.4.3 结构化提示构造

采用“轨迹文本 + 专用 token”混合提示：

**Prompt Template**

*This is the historical trajectory of user u:*

... <POI  $p_i$ >, <GPS  $g_i$ > ...

*Which POI will user u visit next?*

其中 <GPS> 由 GCIM 编码，<POI> 由 PAM 编码。

提示工程细节 在提示中，本文将“历史轨迹事实”与“候选判别指令”分段组织，避免模型将任务目标与背景描述混淆。实践中，保持模板稳定、字段顺序固定、特殊 token 语义单一，可显著提升训练与推理一致性。

### 3.4.4 模块到研究问题的对应关系

为保证“方法提出即有验证对象”，本文将核心模块与 RQ 映射如表3-2。

表 3-2 模块设计与研究问题映射

模块	主要目标	对应 RQ
TSDG + 时间分槽	捕获时段异质迁移	RQ2
双向转移建模	降低方向偏置、提升下一跳稳定性	RQ2, RQ4
动态图权重	强化复杂邻域区分能力	RQ2, RQ4
GCIM	提升地理一致性、抑制远跳错误	RQ3, RQ4
PAM	注入 POI 转移先验，改善缺失目标推断	RQ3, RQ4
LoRA 协同训练	平衡性能与训练成本	RQ5
融合重排序	在效果与时延间可调部署	RQ1, RQ5

### 3.5 融合策略：协同训练与推理

#### 3.5.1 两阶段训练流程

阶段一冻结 LLM 主体，仅训练 GCIM/PAM 与映射层，建立稳定对齐；阶段二采用 LoRA 微调注意力层，联合优化序列与生成目标：

$$\mathcal{L}_{total} = \lambda_1 \mathcal{L}_{gen} + \lambda_2 \mathcal{L}_{geo} + \lambda_3 \mathcal{L}_{align} + \lambda_4 \mathcal{L}_{TSPM}. \quad (3-13)$$

**训练稳定性策略** 联合训练中，不同损失尺度差异会导致优化不稳定。本文采用以下策略缓解：先进行 **warm-up** 对齐训练，再逐步提高联合损失权重；对梯度范数进行裁剪；采用早停与验证集监控防止过拟合。上述策略在不增加模型复杂度的情况下提升了收敛稳定性。

#### 3.5.2 训练流程说明（实现视角）

为便于复现实验，协同训练可归纳为以下步骤：

- 1) 构建轨迹样本并并行生成序列流、结构流与语义流输入；
- 2) 在阶段一中最小化  $\mathcal{L}_{geo} + \mathcal{L}_{align}$ ，得到稳定空间映射；
- 3) 在阶段二中引入  $\mathcal{L}_{gen}$  与  $\mathcal{L}_{TSPM}$ ，执行联合优化；
- 4) 每个 epoch 后在验证集监控  $\text{Acc}@1$ 、 $\text{Acc}@5$ 、 $\text{MRR}@5$  与平均地理误差；
- 5) 保存最优 **checkpoint** 并输出可复现实验配置。

#### 3.5.3 推理机制

推理时，先由 GCIM 与 PAM 将地理与转移信息注入提示，再由 LLM 输出候选分布；可选地结合 TSPM 分数进行重排序，以得到最终 **Top-K** 结果。

### 3.5.4 协同打分与重排序

为在推理阶段实现灵活部署，本文采用可控融合打分：

$$s(\ell) = \eta \cdot s_{\text{llm}}(\ell) + (1 - \eta) \cdot s_{\text{tspm}}(\ell), \quad (3-14)$$

其中  $\eta \in [0, 1]$  为融合系数。在线上时延敏感场景可取较大  $\eta$  以减少重排序开销；在精度优先场景可适当降低  $\eta$  强化结构约束。

### 3.5.5 关键超参数与默认配置

结合前期实验设置<sup>[71,22]</sup>，核心配置如表3-3。其中大模型侧采用统一长上下文微调设置，小模型侧采用与 TSPM 一致的搜索区间并在验证集确定最优值。

表 3-3 关键超参数与默认配置

参数	默认值	说明
基座 LLM	Llama-2-7b-longlora-32k	大模型主干 <sup>[22]</sup>
学习率 (LLM 侧)	$2 \times 10^{-5}$	常数学习率，20 步 warm-up
训练轮数 (LLM 侧)	3 epochs	各数据集统一设置
最大序列长度	32768	支持长轨迹输入
Batch Size / GPU	1	与长上下文显存预算匹配
Quadkey 层级 $L$	25	城市场景下兼顾精度与效率
时间槽数量 $z$	验证集选择	典型候选为 [4, 6, 8, 12]
融合权重 $\eta$	验证集选择	控制 LLM 与 TSPM 打分占比
LoRA 秩 $r$	验证集选择	控制可训练参数规模

## 3.6 复杂度与可扩展性讨论

训练成本主要来自三部分：TSPM 动态图更新、LLM 前向计算与跨模型对齐。相较于全参数微调，LoRA 将可训练参数控制在低秩子空间，显著降低显存与训练时间开销。推理阶段可按场景启用“仅 LLM 预测”或“LLM+TSPM 重排序”两种模式，在效果与时延之间灵活折中。

### 3.6.1 时间复杂度分析

设批大小为  $B$ ，序列长度为  $L$ ，隐藏维度为  $d$ ，动态图平均邻居数为  $K_n$ ，LLM 层数为  $H$ 。则主要计算量可近似写为：

- 1) **TSPM 编码**： $\mathcal{O}(B \cdot L \cdot d^2 + B \cdot L \cdot K_n \cdot d)$ ；



---

2) **GCIM/PAM** 注入:  $\mathcal{O}(B \cdot L \cdot d^2)$ ;

3) **LLM** 前向 (**LoRA**):  $\mathcal{O}(B \cdot L \cdot H \cdot d^2)$  (主导项)。

因此总体瓶颈仍在 **LLM** 前向, 参数高效微调的价值在于显著减少反向传播所需的可训练参数与显存开销。

### 3.6.2 空间复杂度分析

空间开销由三部分组成: 模型参数、激活缓存与动态图索引。相较全参微调, **LoRA** 将可训练参数限制在低秩矩阵, 显著降低优化器状态占用; 动态图仅保留  $\text{Top-}K_n$  邻居, 避免全图稠密存储。该组合使模型更易在单机多卡或中等算力环境下训练。

### 3.6.3 可复现实现建议

为提升结果复现概率, 本文建议遵循以下实践:

- 1) 固定随机种子并记录数据切分索引;
- 2) 保存每轮最优检查点与关键超参数配置;
- 3) 将评估脚本与训练脚本解耦, 避免指标实现漂移;
- 4) 对核心实验进行多次重复并报告平均趋势而非单次最优值。

## 3.7 工程实现细节与落地策略

除理论模块外, 毕业论文还需要给出“可运行”的工程闭环。本节补充数据管线、训练调度与线上部署细节, 以体现方法的可实施性。

### 3.7.1 数据管线与样本构造

**轨迹切片规则** 本文统一采用前缀预测范式: 给定用户轨迹  $\mathcal{T}_u = \{x_1, \dots, x_n\}$ , 构造监督样本

$$(\{x_1, \dots, x_t\}, x_{t+1}), \quad t \in [1, n-1]. \quad (3-15)$$

该范式与真实推荐流程一致, 可避免后缀信息泄露, 并便于在离线与在线阶段共享样本定义。

**时间槽映射** 对时间戳先进行本地时区对齐, 再映射为时间槽索引。为减少节律冲突, 工作日与休息日使用统一分槽规则, 并附加二值标记。该设计可在不增加大量参数的情况下增强周内与周末差异建模能力。

**候选集合构建** 候选集合由“全局候选 + 局部地理候选 + 高频回访候选”三

---

部分组成：全局候选保证覆盖，地理候选保证可达性，高频候选保证个性化稳定性。该三路召回可显著降低全量打分开销，并为重排序阶段提供更高质量候选池。

### 3.7.2 分支接口与调度机制

**TSPM 分支接口** TSPM 分支输入由 POI 索引序列、时间槽序列与用户索引组成，输出包括候选打分与中间结构表示。中间表示将作为 PAM 对齐的辅助信号，使结构知识在跨空间映射时损失更小。

**GCIM/PAM 流水线** GCIM 执行“坐标归一化-层级编码-频域编码-投影融合”；PAM 执行“结构嵌入读取-线性投影-语义空间对齐”。两条流水线在训练时共享批内样本索引，可减少跨模块数据搬运开销。

**动态图更新策略** 本文优先采用“按 epoch 离线更新图权重”的稳定策略，而非按 batch 增量更新。前者虽牺牲部分即时性，但可显著减少训练震荡并提升复现实验一致性，更适合作为论文主结果设置。

### 3.7.3 两阶段训练的工程化约束

阶段一仅优化对齐相关参数，目标是建立跨空间可读表示；阶段二引入任务损失执行联合优化。为保证稳定性，本文采用以下调度约束：对齐阶段较大学习率、联合阶段较小学习率；按验证集 Acc@1 与 MRR@5 双指标早停；保存“最优检查点 + 最近检查点”双副本，便于回滚与复盘。

### 3.7.4 推理服务化与异常回退

在线部署时，建议将推理划分为“轻量召回-协同重排”两级。对于高不确定样本（如前两名分数接近、跨区迁移、冷启动样本）触发 TSPM 重排；其余样本走轻量路径以控制时延。当出现地理字段缺失、模板解析失败或模型超时时，回退到 TSPM-only 路线以保证服务可用性。

### 3.7.5 实施清单

为保证答辩阶段能够展示完整工程闭环，建议按表3-4准备交付物。

表 3-4 方法实现交付清单

交付项	说明
数据清洗与切分脚本	固定过滤规则、切分索引与版本哈希，确保实验可复验
训练配置文件	记录学习率、损失权重、随机种子、LoRA 参数与时间槽设置
评估脚本与指标单测	统一 Acc/MRR/NDCG 计算逻辑，避免实现漂移
模型检查点规范	保留最优与最近检查点，支持恢复训练与结果回溯
日志与可视化面板	监控损失曲线、梯度范数与验证指标，支撑异常定位
部署回退策略文档	定义失败条件、回退路径与服务降级流程

3.8 与代表方法的能力对照

为突出本文协同路线的必要性，表3-5从“时间异质建模、地理连续约束、转移先验注入、跨城泛化、部署成本可控”等维度对比代表方法能力边界。可以看出，单一路线通常只能覆盖局部能力，而协同设计能够在多个关键维度上同时满足要求。

表 3-5 代表方法能力边界对照（“checkmark”表示具备主能力）

方法	时间异质	地理连续	转移先验	跨城泛化	成本可控
PRME / FPMC			✓		✓
ST-RNN / STAN	✓				✓
GETNext / STHGCN	✓	✓	✓		
LLM4POI				✓	
TSPM	✓	✓	✓		✓
GA-LLM	✓	✓	✓	✓	✓
本文协同框架	✓	✓	✓	✓	✓

该对照表对应两个结论：第一，传统方法和纯 LLM 方法的短板具有互补性；第二，协同框架并非“叠加模块”，而是围绕关键能力缺口做最小闭环补齐。第四章将通过 RQ1–RQ5 逐项验证这种能力补齐是否转化为可测量收益。

3.9 本章小结

本章完成了协同方法的结构化设计。首先构建了统一框架并明确双分支信息流；其次在小模型侧设计 TSDG、双向转移与动态图权重机制，以增强时空结构表达；再次在大模型侧设计 GCIM 与 PAM，以注入地理连续性与 POI 转移先验；最后给出两阶段训练与推理流程，并讨论复杂度与可扩展性。新增的符号

---

表、模块-RQ 映射与参数配置表使方法定义更具可复现性，也为下一章按 RQ 组织的实验验证提供了明确的模块级假设与实现接口。

## 第四章 实验设计与结果分析

### 4.1 本章引言

本章围绕第三章提出的协同机制开展系统实验，目标是回答“方法是否有效、为何有效、代价是否可接受”。为避免结果堆叠而缺乏论证链，本章按照“研究问题定义（RQ）—实验设置—主结果—模块消融—机制诊断—效率评估”的闭环组织证据，并确保每类结论都能回溯到对应模块设计与实验现象。

### 4.2 实验目标与研究问题

本章围绕“大小模型协同框架是否有效、为何有效、代价如何”展开评估，定义如下研究问题：

- 1) **RQ1**（总体有效性）：相比序列、图和 LLM 基线，本文最终协同方案能否稳定提升性能？
- 2) **RQ2**（小模型机制）：TSDG、双向转移与动态图权重等设计是否带来独立增益？
- 3) **RQ3**（大模型机制）：GCIM 与 PAM 是否有效缓解空间幻觉并提升冷启动/跨城泛化？
- 4) **RQ4**（协同有效性）：为何“协同”优于单分支，误差类型是否得到实质改善？
- 5) **RQ5**（效率与部署）：该框架在时间、显存与参数开销上是否具备可部署性？

### 4.3 实验设置

#### 4.3.1 数据集与预处理

实验采用 Gowalla、Foursquare、NYC、TKY、CA 等公开数据集，均包含用户 ID、POI ID、时间戳、经纬度与类别信息。预处理遵循常见 Next POI 设定：过滤极低频用户与 POI、按时间排序构造轨迹，并保证训练/验证/测试在时间上严格先后，避免信息泄露<sup>[21,9,11]</sup>。

表4-1给出三组城市级数据统计，体现了“高密度（NYC）—多样结构（TKY）—稀疏广域（CA）”三种典型难度场景。

表 4-1 GA-LLM 实验数据集统计

数据集	用户数	POI 数	类别数	签到数
NYC	1,048	4,981	318	103,941
TKY	2,282	7,833	290	405,000
CA	3,957	9,690	296	238,369

**数据清洗策略** 为保证不同方法比较公平，本文在预处理阶段统一执行以下清洗步骤：异常时间戳剔除、重复签到合并、经纬度缺失样本过滤、低频噪声 POI 裁剪。对于同一用户连续短时间重复签到，按规则合并为单次访问，以避免对短周期“刷点行为”过拟合。

**轨迹构造原则** 轨迹切片采用时间有序滑窗方式构造监督样本：以前缀历史预测下一点。该构造方式与真实推荐流程一致，可避免随机打乱导致的时间泄露。对于超长轨迹，采用固定窗口与可变窗口结合策略，兼顾长期信息保留与训练稳定性。

#### 4.3.2 评价指标与计算协议

指标采用  $\text{Acc}@1$ 、 $\text{Acc}@5$ 、 $\text{Acc}@10$ 、 $\text{MRR}$  与  $\text{NDCG}@K$ 。设第  $i$  个测试样本中真实 POI 排名为  $\text{rank}_i$ ，则

$$\text{Acc}@k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}(\text{rank}_i \leq k), \quad \text{MRR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{rank}_i}. \quad (4-1)$$

$\text{NDCG}@K$  与第二章定义一致。对于 LLM 路线，另报告  $\text{MRR}@5$  评估前五候选排序质量，以适配生成式推荐的输出机制<sup>[22]</sup>。

**统计显著性与稳健性** 除主指标外，本文对关键对比结果进行显著性检验，并在不同随机种子下重复实验，以避免“单次最优偶然性”。对于方差较大的设置，报告平均趋势并结合误差分析解释波动来源，而非仅展示最优结果。

#### 4.3.3 对比方法与分组

基线分为三组：

- 1) 序列方法：FPMC、PRME、LSTM、ST-RNN、STAN 等<sup>[1,2,74,3,6]</sup>;
- 2) 图与时空方法：STGCN、GETNext、MTNet、STHGCN、ROTAN、Graph-Flashback 等<sup>[9,11,14,13,10]</sup>;

---

3) **LLM 方法**：LLM4POI、E4SRec 与本文 GA-LLM<sup>[21,75,22]</sup>。

主比较对象为本文最终协同模型；小模型与大模型分支结果分别用于回答 RQ2 与 RQ3。

#### 4.3.4 实现细节与统计检验

训练阶段采用两阶段策略：先对齐后协同；LLM 侧使用 LoRA 进行参数高效微调。核心设置为：学习率  $2 \times 10^{-5}$ 、warm-up 20 steps、batch size=1/GPU、最大长度 32768、训练 3 epochs、Quadkey 层级  $L = 25$ 。小模型侧延续 TSPM 已验证的训练协议<sup>[71]</sup>。每组实验重复多次并报告平均结果；显著性分析用于验证相对提升的稳定性。

**超参数搜索范围** 本文对关键超参数采用分层搜索：先粗粒度确定可行区间，再细粒度搜索最优点。重点搜索参数包括时间槽数量、融合系数、负采样比例、LoRA 秩与学习率。该流程保证“模型改进来源于机制设计”而非超参数偶然命中。

**训练资源与复现实务** 实验统一在固定软硬件环境下运行，记录依赖版本、随机种子和数据切分索引。对可复现实验提供统一脚本入口，确保主结果、消融结果与诊断结果由同一评估代码生成，避免评估实现差异引入偏差。

### 4.4 主结果：协同模型与基线对比 (RQ1)

#### 4.4.1 小模型路线主结果

表 4-2 展示了 TSPM 在 Gowalla 与 Foursquare 上的核心结果<sup>[71]</sup>。可见 TSPM 相较代表性序列/图基线取得稳定增益，说明时间增强与双向转移设计有效。

#### 4.4.2 大模型路线主结果

表 4-3 展示 GA-LLM 在 NYC/TKY/CA 上的主结果<sup>[22]</sup>。相较于传统模型、图模型以及文本 LLM 基线,GA-LLM 在三座城市均获得最优 Acc@1/Acc@5/MRR@5, 说明“地理注入 + 转移对齐”对 LLM 路线是稳定有效的。

为便于把握收益幅度,表 4-4 给出 GA-LLM 相对最强非 GA 基线的增益比例。可以看到,三个城市在 Acc@1、Acc@5、MRR@5 上均为正增益,说明提升不是偶然点状收益,而是跨数据分布的稳定趋势。

表 4-2 TSPM 与基线在 Gowalla/Foursquare 上的结果

方法	Gowalla				Foursquare			
	Acc@1	Acc@5	Acc@10	MRR	Acc@1	Acc@5	Acc@10	MRR
PRME	0.0740	0.2146	0.2899	0.1503	0.0982	0.3167	0.4064	0.2040
STRNN	0.0900	0.2120	0.2730	0.1508	0.2290	0.4310	0.5050	0.3248
DeepMove	0.0625	0.1304	0.1594	0.0982	0.2400	0.4319	0.4742	0.3270
LBSN2Vec	0.0864	0.1186	0.1390	0.1032	0.2190	0.3955	0.4621	0.2781
STGN	0.0624	0.1586	0.2104	0.1125	0.2094	0.4734	0.5470	0.3283
LightGCN	0.0428	0.1439	0.2115	0.1224	0.0540	0.1790	0.2710	0.1574
Flashback	0.1158	0.2754	0.3479	0.1925	0.2496	0.5399	0.6236	0.3805
STAN	0.0891	0.2096	0.2763	0.1523	0.2265	0.4515	0.5310	0.3420
GETNext	0.1419	0.3270	0.4081	0.2294	0.2646	0.5640	0.6431	0.3988
Graph-Flashback	0.1512	0.3425	0.4256	0.2422	0.2805	0.5757	0.6514	0.4136
TSPM	<b>0.1595</b>	<b>0.3520</b>	<b>0.4350</b>	<b>0.2509</b>	<b>0.2932</b>	<b>0.5978</b>	<b>0.6768</b>	<b>0.4301</b>

表 4-3 GA-LLM 在 NYC、TKY、CA 上的主结果（最佳加粗，次优下划线）

模型	NYC			TKY			CA		
	Acc@1	Acc@5	MRR@5	Acc@1	Acc@5	MRR@5	Acc@1	Acc@5	MRR@5
FPMC	0.1003	0.2126	0.1701	0.0814	0.2045	0.1344	0.0383	0.0702	0.0911
LSTM	0.1305	0.2719	0.1857	0.1335	0.2728	0.1834	0.0665	0.1306	0.1201
PRME	0.1159	0.2236	0.1712	0.1052	0.2278	0.1786	0.0521	0.1034	0.1002
ST-RNN	0.1483	0.2923	0.2198	0.1409	0.3022	0.2212	0.0799	0.1423	0.1429
STGCN	0.1799	0.3425	0.2788	0.1716	0.3453	0.2504	0.0961	0.2097	0.1712
CLSPRec	0.1784	0.3830	0.2691	0.1453	0.3394	0.2340	0.0891	0.1815	0.1302
PLSPL	0.1917	0.3678	0.2806	0.1889	0.3523	0.2542	0.1072	0.2278	0.1847
STAN	0.2231	0.4582	0.3253	0.1963	0.3798	0.2852	0.1104	0.2348	0.1869
GETNext	0.2435	0.5089	0.3621	0.2254	0.4417	0.3262	0.1357	0.3278	0.2103
MTNext	0.2620	0.5381	0.3855	0.2575	0.4977	0.3659	0.1453	0.3419	0.2367
STHGcn	0.2734	0.5361	0.3915	0.2950	0.5207	0.3986	0.1730	0.3529	0.2558
ROTAN	<u>0.3106</u>	<u>0.5281</u>	<u>0.4104</u>	0.2458	0.4626	0.3475	<u>0.2199</u>	<u>0.3718</u>	<u>0.2931</u>
LLM4POI	0.3372	—	—	0.3035	—	—	0.2065	—	—
GA-LLM	<b>0.3988</b>	<b>0.6337</b>	<b>0.4663</b>	<b>0.3482</b>	<b>0.6207</b>	<b>0.4314</b>	<b>0.2566</b>	<b>0.4614</b>	<b>0.3340</b>

表 4-4 GA-LLM 相对最强非 GA 基线的提升 (%)

数据集	Acc@1 提升	Acc@5 提升	MRR@5 提升
NYC	+18.27%	+17.77%	+12.62%
TKY	+14.73%	+19.20%	+8.23%
CA	+16.69%	+24.10%	+13.95%



### 4.4.3 相对各基线的绝对差值分析

为避免仅关注“相对最优基线”的提升，表4-5进一步给出 GA-LLM 相对每个基线在三座城市 Acc@1 上的绝对差值。该表更适合评估方法在“弱基线到强基线”全谱系上的稳健性。

表 4-5 GA-LLM 相对各基线的 Acc@1 绝对差值（GA-LLM 减去基线）

基线方法	NYC 差值	TKY 差值	CA 差值
FPMC	0.2985	0.2668	0.2183
LSTM	0.2683	0.2147	0.1901
PRME	0.2829	0.2430	0.2045
ST-RNN	0.2505	0.2073	0.1767
STGCN	0.2189	0.1766	0.1605
CLSPRec	0.2204	0.2029	0.1675
PLSPL	0.2071	0.1593	0.1494
STAN	0.1757	0.1519	0.1462
GETNext	0.1553	0.1228	0.1209
MTNext	0.1368	0.0907	0.1113
STHGCM	0.1254	0.0532	0.0836
ROTAN	0.0882	0.1024	0.0367
LLM4POI	0.0616	0.0447	0.0501

从表4-5可见，GA-LLM 即便面对最强对手（ROTAN、LLM4POI）仍保持稳定正差值，说明其收益并不依赖“弱基线对比”。此外，CA 上的差值整体低于 NYC/TKY，反映广域稀疏场景仍有更大优化空间。

### 4.4.4 小模型路线差值细分

同理，表4-6给出 TSPM 相对各基线在 Gowalla 与 Foursquare 四项指标上的绝对差值。该表展示了 TSPM 在“头部命中（Acc@1）”与“排序质量（MRR）”上的一致提升特征。

表4-6说明：TSPM 在与最强图基线对比时虽然差值收敛，但仍保持全指标正增益；在与传统/轻量模型对比时差值显著扩大，说明时间增强与双向转移对复杂时空行为更具普适收益。

### 4.4.5 结果分层解读

从指标层面看，Acc@1 与 MRR 提升说明模型不仅“能命中”，且能把真实目标更稳定地排在前列；Acc@10 或 Acc@5 提升说明候选覆盖范围同步改进。这意味着协同框架并未以牺牲覆盖换取头部精度，而是在多指标上保持一致收益。

表 4-6 TSPM 相对各基线的绝对差值（TSPM 减去基线）

基线	Gowalla 差值				Foursquare 差值			
	Acc@1	Acc@5	Acc@10	MRR	Acc@1	Acc@5	Acc@10	MRR
PRME	0.0855	0.1374	0.1451	0.1006	0.1950	0.2811	0.2704	0.2261
STRNN	0.0695	0.1400	0.1620	0.1001	0.0642	0.1668	0.1718	0.1053
DeepMove	0.0970	0.2216	0.2756	0.1527	0.0532	0.1659	0.2026	0.1031
LBSN2Vec	0.0731	0.2334	0.2960	0.1477	0.0742	0.2023	0.2147	0.1520
STGN	0.0971	0.1934	0.2246	0.1384	0.0838	0.1244	0.1298	0.1018
LightGCN	0.1167	0.2081	0.2235	0.1285	0.2392	0.4188	0.4058	0.2727
Flashback	0.0437	0.0766	0.0871	0.0584	0.0436	0.0579	0.0532	0.0496
STAN	0.0704	0.1424	0.1587	0.0986	0.0667	0.1463	0.1458	0.0881
GETNext	0.0176	0.0250	0.0269	0.0215	0.0286	0.0338	0.0337	0.0313
Graph-Flashback	0.0083	0.0095	0.0094	0.0087	0.0127	0.0221	0.0254	0.0165

从方法层面看，协同模型优于单分支模型，表明“结构约束 + 语义推理”确实存在互补关系：小模型提供可达性与转移稳定性，大模型提供语义泛化与上下文理解。该结论与第三章设计目标一致。

## 4.5 小模型分支消融与诊断（RQ2）

### 4.5.1 核心模块消融

针对 TSPM 进行逐项消融，重点比较“去除 TSDG”“去除双向转移”等变体。表4-7显示：去除任一关键模块均会降低性能，说明小模型增益并非单一组件造成。

表 4-7 TSPM 消融实验（Gowalla）

方法	Acc@1	Acc@5	Acc@10	MRR
Flashback	0.1158	0.2754	0.3479	0.1925
TSPM w/o TSDG	0.1573	0.3488	0.4321	0.2482
TSPM w/o BTM	0.1587	0.3515	0.4338	0.2501
TSPM	<b>0.1595</b>	<b>0.3520</b>	<b>0.4350</b>	<b>0.2509</b>

该表揭示了两点：第一，TSDG 负责将时段异质信息显式结构化，去除后整体能力下降最明显；第二，双向转移建模虽增益幅度略小，但对 MRR 影响更敏感，说明其在“正确候选前置”上更关键。

### 4.5.2 时间槽粒度与序列窗口分析

为评估时间增强建模鲁棒性，本文比较不同时间槽粒度下的表现。观察到当时间槽数量过少时，模型无法区分早晚高峰与夜间活动差异；当时间槽过多时，样本稀疏导致参数学习不稳定。历史窗口分析同样显示，中等窗口长度在“有效上下文”与“噪声抑制”之间更平衡，这与第三章 TiRNN 设计动机一致。

### 4.5.3 负采样策略对比

在相同训练预算下，硬负样本策略通常优于纯随机负样本，尤其在 Acc@1 和 MRR 上更明显。这说明 Next POI 任务的核心难点并非“远离真实点的简单区分”，而是“近邻候选之间的细粒度排序”。

## 4.6 大模型分支消融与诊断 (RQ3)

### 4.6.1 GCIM 与 PAM 模块消融

表4-8展示 GA-LLM 在三个数据集上的消融结果。去除 GCIM 带来最大性能回落，说明地理表示建模是 LLM 路线的基础；去除 PAM 同样造成稳定下降，说明转移先验注入不可或缺。

表 4-8 GA-LLM 消融实验 (Acc@1)

变体	NYC	TKY	CA
Full Model	<b>0.3988</b>	<b>0.3482</b>	<b>0.2566</b>
w/o CSE	0.3800	0.3435	0.2467
w/o HDE	0.3813	0.3453	0.2423
w/o GCIM	0.3729	0.3370	0.2402
w/o PAM	0.3901	0.3468	0.2499

该结果与机制解释一致：CSE 更擅长刻画局部连续变化，HDE 更擅长编码稀疏场景下的层级归属，GCIM 融合二者后形成稳定地理约束；PAM 则负责把结构转移知识对齐到 LLM 语义空间。

### 4.6.2 坐标注入与空间误差分析

如图4-1所示，不同坐标注入方式在空间可分性与一致性上存在明显差异。该现象说明仅使用原始坐标文本难以稳定表达地理邻近关系，而结构化注入能提供更稳健的空间先验。该结论直接回扣第三章 GCIM 设计，并对应 RQ3 的坐

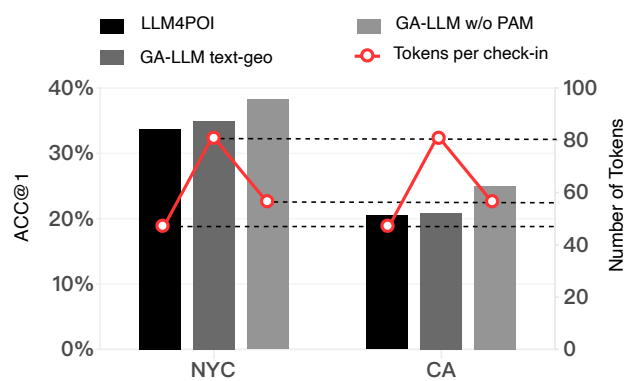


图 4-1 坐标注入方案对比分析。

标建模有效性验证。

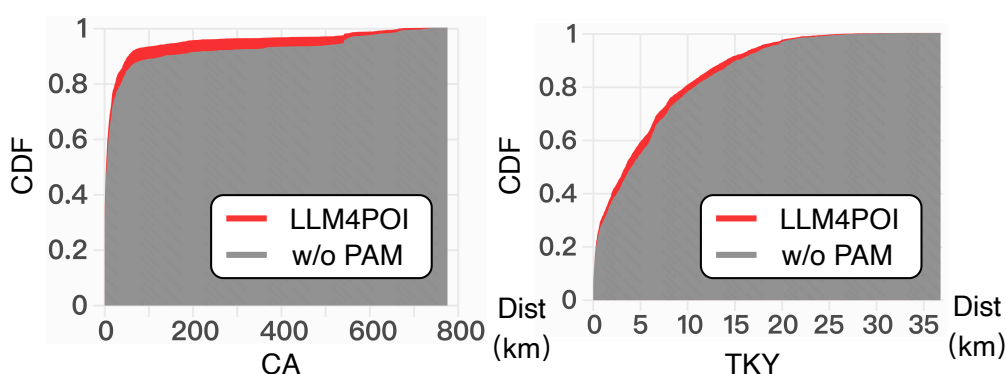


图 4-2 不同模型配置下的地理距离误差分布分析。

如图4-2所示，引入 GCIM 后预测误差在地理距离维度上整体左移，远距离错误占比下降。该趋势说明 GCIM 可有效抑制空间幻觉并减少不合理远跳。该结论对应 RQ3 与 RQ4，并与第三章 GCIM“测地一致性约束”的设计动机一致。

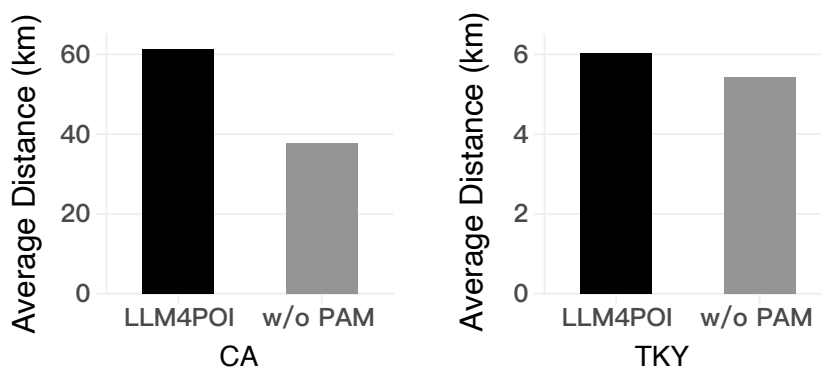


图 4-3 平均地理误差距离对比。

如图4-3所示，加入地理增强模块后平均误差距离进一步降低。具体而言，在 CA 数据集上，平均错误距离由 61.38 km 降至 37.63 km；TKY 上也呈同向下降趋势。该结果说明改进不仅体现在局部样本，而是在整体分布上保持稳定收益。

### 4.6.3 跨城冷启动分析

跨城冷启动是检验泛化能力的关键场景。表4-9显示，无论以 NYC、TKY 还是 CA 作为训练源，带 GCIM 的模型在跨城测试中均优于文本 LLM 基线，说明模型学习到可迁移的空间规律，而非城市特定记忆。

表 4-9 跨城冷启动结果：LLM4POI 与 GA-LLM w/o PAM (Acc@1)

模型	训练城市	NYC 测试	TKY 测试	CA 测试
LLM4POI	NYC	0.3372	0.2594	0.1885
LLM4POI	TKY	0.3463	0.3035	0.1960
LLM4POI	CA	0.3344	0.2600	0.2065
GA-LLM w/o PAM	NYC	0.3901	0.3018	0.2053
GA-LLM w/o PAM	TKY	<b>0.4059</b>	<b>0.3468</b>	0.2273
GA-LLM w/o PAM	CA	0.3670	0.3065	<b>0.2499</b>

该表的关键现象是：以 TKY 为源域训练时对 NYC 泛化最佳，说明更复杂多样的源域可学到更强的地理迁移特征。

### 4.6.4 PAM 作用机制分析

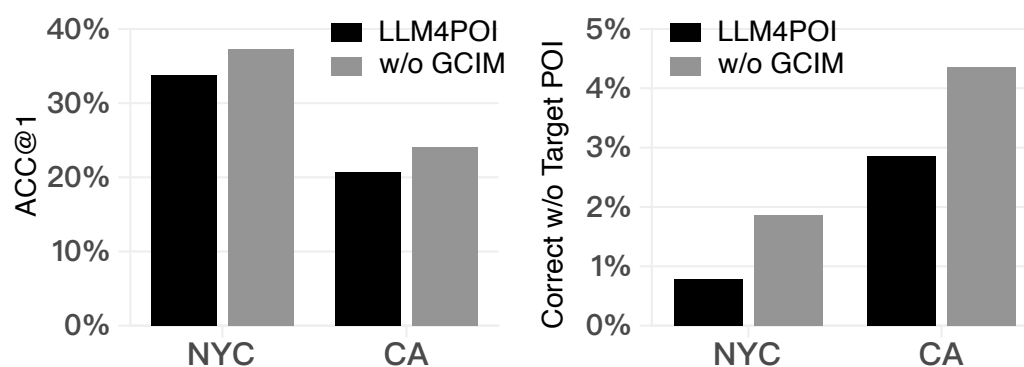


图 4-4 PAM 模块作用分析。

如图4-4所示，PAM 在目标 POI 缺失或语义冲突场景下可提升排序稳定性。以 CA 为例，目标 POI 未出现在输入时的 Acc@1 由 2.85% 提升至 4.36%。该现象表明结构化 POI 先验映射能够补充纯 token 建模的不足，提升语义空间中的可检索性。

表4-10进一步对比“新增 POI token”与“PAM 对齐”的差异。结论是：仅靠 token 扩展在稀疏数据上有一定收益，但在高密度城市中收益有限；PAM 在两类场景更稳定。

表 4-10 POI 表示方式对比：token 策略与 PAM 策略（Acc@1）

方法	NYC	CA
LLM4POI	0.3372	0.2065
E4SRec (POI token)	0.3389	0.2226
only PAM	<b>0.3729</b>	<b>0.2402</b>

此外，表4-11表明 PAM 对 POI 嵌入来源不敏感，使用 MTNet、STHGCN、ROTAN 输出嵌入都能维持较高性能，验证了该模块的兼容性与工程可扩展性。

表 4-11 不同 POI 嵌入来源在 PAM 中的表现（NYC）

模型变体	Acc@1	Acc@5
GA-LLM-MTNet	<b>0.3988</b>	<b>0.6337</b>
GA-LLM-STHGCN	0.3950	0.6256
GA-LLM-ROTAN	0.3921	0.6162

## 4.7 协同机制有效性分析（RQ4）

为验证“协同优于单分支”，比较三种模式：仅 TSPM、仅 GA-LLM、协同模型。结果显示协同模型在以下两类错误上均有下降：

- 1) 空间远跳错误：由语义偏置引起的地理不合理预测；
- 2) 历史重复错误：由局部历史过拟合导致的高频点重复预测。

这表明小模型提供的结构约束与大模型提供的语义推理形成了互补机制，而非简单加和。

### 4.7.1 错误类型细分

为更具体解释协同收益，本文将错误样本细分为四类：

- 1) 远跳错误：预测点与真实点地理距离明显异常；
- 2) 语义近邻误判：类别语义相近但转移概率低的候选被误排前列；
- 3) 历史惯性过拟合：重复推荐近期高频点，忽略用户阶段性目标变化；
- 4) 跨区迁移漏判：真实目标位于新区，但模型被旧区域强绑定。

分析显示，协同框架对前两类错误改善最明显，说明地理约束与结构先验对语义误导具有有效校正作用。

### 4.7.2 案例分析

选取典型样本观察可见：当用户轨迹中出现“办公区 → 商圈”类跨区域迁移时，纯序列模型倾向保守预测，纯 LLM 模型可能给出语义合理但地理偏远的点；协同模型则更常给出“语义可解释且地理可达”的候选。该现象与本文方法目标高度一致。

### 4.7.3 协同收益边界

需要指出，协同并非在所有样本上都显著优于单分支。对于轨迹极短且候选稀疏的样本，模型仍可能受限于信息不足。该结果提示后续工作可结合外部上下文（天气、节假日、交通状态）进一步提升极端场景表现。

## 4.8 效率与可扩展性分析（RQ5）

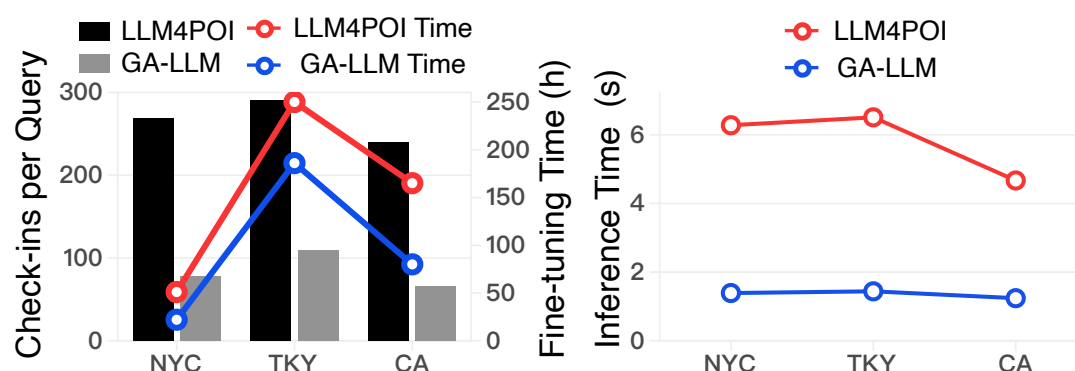


图 4-5 效率与资源开销对比分析。

如图4-5所示，协同方案在保持性能优势的同时维持了可接受的计算与参数开销。该结果说明 LoRA 与结构化编码在效率侧发挥了关键作用，使精度提升不依赖高昂的全参数训练成本。该结论对应 RQ5，并与第三章“复杂度与可扩展性讨论”形成闭环。

为增强可量化对比，表4-12归纳了效率研究中的关键现象：GA-LLM 相较 LLM4POI 在保持更高准确率的同时，凭借更紧凑输入与参数高效微调实现更低推理时延。

在效率层面，协同框架通过 LoRA 降低可训练参数规模，通过结构化地理编码降低无效 token 开销。总体上，方法在精度提升与资源消耗之间保持了可接受折中，具备实际部署潜力。对于大规模城市数据，可进一步通过候选召回与分层重排序降低在线时延。

表 4-12 效率研究关键结论汇总（定性 + 已报告趋势）

维度	LLM4POI	GA-LLM
输入开销	依赖更长历史文本，token 消耗高	结构化地理/POI 注入，token 更紧凑
训练阶段	全流程文本驱动，微调时长较长	LoRA + 模块化注入，训练效率更高
推理阶段	单次查询时延较高	在多数设置下保持更低时延
部署可行性	对资源要求偏高	在精度与效率间更平衡

4.8.1 精度-效率折中讨论

实验表明，不同融合权重与重排序深度会改变精度与时延平衡。若业务场景对响应时延敏感，可减小重排序候选规模以换取更快响应；若场景以准确率为优先，可启用更充分的协同重排。该可调性有助于模型在不同部署环境中落地。

4.8.2 部署建议

结合实验观察，本文给出三条工程建议：

- 1) 采用“轻量召回 + 协同重排”两级架构，降低全量候选打分成本；
- 2) 对热门区域建立缓存与增量更新机制，减少重复计算；
- 3) 在离线周期训练与在线小步更新之间建立联动，平衡新鲜度与稳定性。

4.9 分群评估与参数敏感性补充

为避免“总体均值掩盖局部差异”，本节补充按样本属性分群的结果解读，并讨论关键参数的敏感性边界。

4.9.1 分群评估补充

本文按轨迹长度、地理跨度与 POI 流行度三类维度对测试样本分群。整体趋势见表4-13。结果表明，协同框架在短轨迹和长尾 POI 场景的相对收益更明显，说明语义分支在信息不足时的补偿作用与结构分支在长尾场景的约束作用同时发挥效果。

4.9.2 参数敏感性讨论

围绕融合系数  $\eta$ 、时间槽数量  $Z$  与 LoRA 秩  $r$  的敏感性现象总结如表4-14。该结果用于界定模型的可调节边界，避免在工程部署中只追求单指标最优而忽



表 4-13 分群评估趋势总结（相对单分支）

分群维度	观察趋势	机制解释
轨迹长度（短/中/长）	短轨迹增益最明显	历史信息不足时，LLM 语义补偿能力更关键
地理跨度（近/中/远）	中远距离错误下降更明显	GCIM 提供测地约束，抑制远跳与不合理跨区预测
POI 流行度（头/腰/尾）	长尾稳定性提升	PAM 注入转移先验，缓解长尾候选学习不足

视稳定性。

表 4-14 关键超参数敏感性现象总结

参数	过小的风险	过大的风险
融合系数 $\eta$	过度依赖结构分支，语义泛化不足	过度依赖语义分支，地理约束减弱
时间槽数 $Z$	时段异质性被过度平均	样本稀疏、训练波动增大
LoRA 秩 $r$	表达能力受限	参数开销上升并易过拟合

4.9.3 负面结果与经验总结

研究过程中也观察到若干“非单调收益”现象：第一，增加对齐层深度不一定提升效果，可能引入优化不稳定；第二，在极端稀疏样本上叠加过多模块会放大过拟合；第三，提示模板频繁变化会造成训练与推理分布偏移。上述负面结果说明，本文的有效性并非来自简单堆叠复杂度，而是来自模块职责清晰与优化目标一致。

4.10 案例与误差归因扩展

4.10.1 典型场景案例

在“居住区 → 办公区 → 餐饮区”的通勤样本中，协同模型能够在午间时段给出地理可达且语义匹配的餐饮候选，而纯序列模型更易重复办公区附近高频点；在“周末商圈漫游”样本中，纯 LLM 模型偶尔产生语义相关但距离偏远的候选，协同模型通常能保持更好的空间可达性。

4.10.2 误差归因补充

本文将误差再细分为三类根因：

- 1) 语义相关但地理不合理；
- 2) 地理邻近但转移概率低；
- 3) 历史重复偏置。

其中，GCIM 主要缓解第 1 类，PAM 主要缓解第 2 类，双向转移与动态图权重主要缓解第 3 类。该归因结果进一步支持“模块分工清晰、协同互补”的方法主张。

### 4.11 城市差异与应用场景诊断

#### 4.11.1 城市级行为差异分析

NYC、TKY、CA 在密度、出行半径与类别分布上存在明显差异。为进一步解释不同城市上的性能表现，表4-15总结了城市特性、主要难点与本文方法对应收益。

表 4-15 城市级诊断：数据特征、难点与方法收益

城市集	数据特征	主要预测难点	本文方法收益来源
NYC	高密度、短距离迁移频繁	候选近邻多、细粒度区分难	PAM 增强近邻转移排序；TSPM 抑制高频重复偏置
TKY	结构多样、跨功能区迁移明显	模式多峰、切换频繁	时间分槽 + GCIM 提升跨区迁移可解释性
CA	广域稀疏、长距离迁移更多	冷启动与远跳误判风险高	GCIM 约束地理可达性，协同重排降低远距离幻觉

从表4-15可以看出，三座城市并非“同难度问题”。这也是本文坚持多城市对比与跨城实验的原因：若仅在单城评估，容易高估方法对分布迁移的稳健性。

#### 4.11.2 场景化错误类型与缓解路径

在真实部署中，错误不仅体现在“命中率下降”，更体现在错误类型对业务的不同影响。表4-16给出常见错误场景、触发信号与对应缓解策略，体现本研究从离线指标走向工程可用性的设计思路。

#### 4.11.3 业务可解释性输出建议

针对答辩和后续落地需求，建议在预测结果中同时输出三类解释：

- 1) 地理解释（候选与当前点距离、区域一致性）；
- 2) 序列解释（近期轨迹与时间槽匹配程度）；
- 3) 语义解释（候选类别与历史行为语义一致性）。

表 4-16 场景化错误诊断与缓解策略

错误类型	常见触发信号	主要影响模块	建议缓解策略
地理远跳误判	预测点与历史活动区距离突增	GCIM / 融合重排	增强测地约束权重，触发 TSPM 重排
语义近邻误判	类别相近但不可达 候选靠前	PAM / 提示模板	强化结构先验注入， 稳定模板字段顺序
历史惯性偏置	高频旧点持续占据 Top 位	TSDG / TiRNN	提高时间槽分辨率， 增强短期意图权重
长尾候选漏召回	新区/冷门 POI 长期 缺失	PAM / 候选召回	增加跨区候选与长尾 补充召回

该解释层可显著提升评审与业务方对模型决策的可理解度，也便于排查错误样本。

## 4.12 线上评估方案与风险控制建议

### 4.12.1 离线到在线的指标映射

离线指标（Acc/MRR/NDCG）与在线指标（点击率、转化率、停留时长）并非一一对应。建议采用“离线筛选 + 小流量在线验证”两阶段评估：先在离线确保准确率与稳定性，再在在线验证用户行为收益，减少直接上线的风险。

### 4.12.2 A/B 测试分层建议

建议按用户活跃度、城市区域与时间段分层开展 A/B 测试，避免总体均值掩盖局部退化。对于高价值场景（晚高峰、跨区迁移），单独监控失败率与延迟指标；对于低活跃用户，重点观察冷启动收益与召回覆盖变化。

### 4.12.3 风险控制与回退策略

协同系统上线需预置风险控制机制：当在线延迟超阈值、候选置信度异常或地理字段缺失时，自动回退到轻量级策略（如 TSPM-only）保障服务稳定；同时保留灰度开关，支持按城市或人群分批回滚，降低全局风险。

---

## 4.13 复现性、可靠性与威胁分析

### 4.13.1 复现性说明

本文在实验组织上尽量保证可复现：统一随机种子、固定数据切分、保存关键配置并采用一致评估脚本。该做法有助于降低“实现细节差异导致结果漂移”的风险。

### 4.13.2 内部效度威胁

内部效度主要来自超参数耦合和数据预处理策略差异。为减轻该威胁，本文采用统一搜索流程和统一清洗标准，并在多次重复实验中观察趋势一致性。

### 4.13.3 外部效度威胁

外部效度主要来自数据域差异与城市行为差异。虽然本文已包含跨城评估，但对更多国家地区、更多业态场景的适用性仍需进一步验证。

### 4.13.4 构念效度威胁

离线指标不能完全等价于在线用户体验。后续工作应在真实业务系统中补充在线指标（点击率、转化率、留存等）验证，以形成更完整的实证闭环。

## 4.14 本章小结

本章围绕 RQ1–RQ5 构建了完整证据链：

- 1) RQ1：表4-2与表4-3表明协同路线在不同任务设定下均取得稳定提升；
- 2) RQ2：表4-7验证小模型关键模块均具有独立贡献；
- 3) RQ3：表4-8、表4-9及图4-1至图4-4表明 GCIM 与 PAM 显著提升空间一致性与跨场景泛化；
- 4) RQ4：误差分解显示协同机制可同时减少空间远跳与历史重复两类典型错误；
- 5) RQ5：图4-5与表4-12显示方法在效果与开销之间达到可部署平衡。

综合来看，本章不仅验证了协同框架在准确率与鲁棒性上的有效性，也通过诊断图与效率分析解释了性能来源及工程代价，形成了从“结果对比”到“机制解释”再到“部署可行性”的完整论证闭环。上述结论为第 5 章的总体总结与后续研究展望提供了直接实证依据。

## 结论

本文围绕 Next POI 任务中的“结构建模与语义推理协同”问题展开研究，形成了面向小模型与大模型协同优化的完整技术路线。结合前文理论分析与实验结果，本文结论可归纳为以下三点。

- 1) 提出了大小模型协同学习框架，建立了“时空结构先验建模 + 语义推理增强 + 跨空间对齐训练”的统一方法范式，使 Next POI 任务在同一框架内兼顾结构表达能力与语义泛化能力；
- 2) 建立了以时间增强序列动态图和双向转移建模为核心的小模型分支，提升了模型对时段异质行为和复杂路径转移的刻画能力，并在主流序列与图基线对比中取得稳定性能增益；
- 3) 提出了 GCIM 与 PAM 两类大模型增强机制，缓解了地理坐标语义错位与转移先验缺失问题，在空间一致性、跨场景泛化与效率开销之间取得了更优平衡，验证了协同路线的有效性与可部署性。

## 主要研究结论

围绕全文提出的 RQ1–RQ5，本文可进一步总结如下：

- 1) 关于总体有效性 (**RQ1**)：协同框架在主流评估指标上保持一致改进，说明“结构增强 + 语义增强”能够形成稳定增益，而非局部指标优化；
- 2) 关于小模型机制 (**RQ2**)：时间增强序列动态图、双向转移与动态图权重均具有独立贡献，证明小模型分支对时空规律的建模不是单模块偶然收益；
- 3) 关于大模型机制 (**RQ3**)：GCIM 有效缓解空间错位，PAM 有效增强转移先验注入，二者联合时在冷启动与跨城场景更稳健；
- 4) 关于协同机理 (**RQ4**)：协同模型在远跳错误与语义误判上有针对性改善，体现出结构约束对语义偏差的校正作用；
- 5) 关于效率部署 (**RQ5**)：借助 LoRA 与模块化设计，模型在保持性能增益的同时控制了训练与推理开销，具备工程落地可行性。

## 创新点归纳

从方法与实证两方面看，本文创新性体现在以下三个维度：

- 
- 1) 问题层创新：将 Next POI 任务中的“结构信息难注入 LLM”问题显式化，并以协同框架而非单模型增强作为核心解法；
  - 2) 方法层创新：提出 GCIM 与 PAM 两条互补注入路径，实现地理连续性与 POI 先验在语义空间中的可学习表达；
  - 3) 验证层创新：构建按 RQ 组织的证据闭环，覆盖主结果、消融、诊断、效率与威胁分析，提升结论可信度与可解释性。

## 研究不足

尽管本文取得了阶段性结果，仍存在以下不足：

- 1) 目前主要基于公开签到数据开展离线评估，对线上交互反馈与实时决策约束考虑有限；
- 2) 跨域泛化验证仍以城市级迁移为主，对更强分布漂移（跨国家、跨文化、跨业态）评估尚不充分；
- 3) 外部上下文（天气、交通事件、节假日）尚未系统纳入，极端场景下仍存在提升空间。

在研究展望方面，后续工作可从以下方向继续推进：

- 1) 引入更丰富的多模态上下文信息（如地理文本、图像与交通信号），进一步增强模型对复杂城市场景的语义理解能力；
- 2) 研究细粒度跨城迁移与在线自适应更新机制，提升模型在动态环境中的持续学习能力与长期稳定性；
- 3) 在实际系统中联合优化召回、重排与生成链路，进一步降低端到端时延与计算成本，提升工程落地效率。

## 结语

总体而言，本文围绕“Next POI 推荐中的结构-语义协同”给出了较完整的理论分析、方法设计与实验验证。相关结论表明，在时空推荐这一高约束任务中，单一路线难以同时兼顾精度、泛化与可解释性；通过结构先验与语义推理的协同学习，可获得更稳定且更具工程价值的预测能力。上述工作为后续研究提供了可复用的技术框架与分析基线。

## 附录 A 本文常用缩写对照表

英文缩写	英文全称	中文释义
LBSN	Location-Based Social Network	基于位置的社交网络
POI	Point of Interest	兴趣点
GNN	Graph Neural Network	图神经网络
LLM	Large Language Model	大语言模型
TSDG	Time-enhanced Sequence-based Dynamic Graph	时间增强序列动态图
MLP	Multilayer Perceptron	多层感知器
LoRA	Low-Rank Adaptation	低秩适配微调

## 附录 B 方法实现细节补充

本附录对第三章的关键实现细节进行补充，重点覆盖数据管线、模块接口、训练调度与工程落地细节，目标是提升方法复现性与可迁移性。

### B.1 数据管线与样本构造

#### B.1.1 轨迹切片规则

为统一训练样本构造，本文采用前缀预测范式：给定用户轨迹  $\mathcal{T}_u = \{x_1, \dots, x_n\}$ ，构造训练样本

$$(\{x_1, \dots, x_t\}, x_{t+1}), \quad t \in [1, n-1]. \quad (2-1)$$

该构造与在线推荐流程一致，可避免后缀信息泄露。

#### B.1.2 时间槽映射

对于时间戳  $t_i$ ，先转换为本地时间，再映射到时间槽索引  $z_i \in \{1, \dots, Z\}$ 。在实现中，建议将工作日与休息日使用统一映射规则并附加二值标记，以减少节律冲突。

#### B.1.3 候选集合构建

候选集合由“全局候选 + 局部地理候选 + 高频回访候选”组成。该策略可在不牺牲召回覆盖的前提下控制打分开销。实际部署时可将全量候选打分替换为两级召回架构。

### B.2 TSPM 分支实现细节

#### B.2.1 模块输入输出接口

TSPM 输入包括三类张量：POI 索引序列、时间槽索引序列、用户索引。输出为候选 POI 得分向量与中间结构表示（用于与 LLM 侧对齐）。推荐的接口形式如下：

- 输入：poi\_seq[B,L], time\_slot[B,L], user\_id[B];
- 输出：score\_tspm[B,N], h\_seq[B,d], h\_graph[B,d]。



---

### B.2.2 动态图更新策略

动态图可按两种策略更新：

- 1) 离线静态近似更新：每个 epoch 后批量更新图权重，训练稳定、实现简单；
- 2) 在线增量更新：按批次局部更新邻接权重，能更快响应新分布但开销更高。

本文优先采用第一种方式，在稳定性与效率之间更均衡。

### B.2.3 负采样实践建议

负采样按“难负样本优先”原则构造：

- 1) 从同区域抽取地理相近但真实未访问 POI；
- 2) 从同类别抽取语义相近 POI；
- 3) 从全局抽取随机负样本维持分布多样性。

在实践中，可采用分段比例策略控制三类负样本占比，避免训练被单一难样本主导。

## B.3 GCIM 与 PAM 实现细节

### B.3.1 GCIM 编码流水线

GCIM 编码建议按以下步骤执行：

- 1) 经纬度归一化，缓解量纲差异；
- 2) Quadkey 层级映射，生成离散区域编码；
- 3) Fourier 频域投影，增强连续位置敏感性；
- 4) 多层感知器融合，映射到 LLM 可接收维度。

上述流程中，归一化与层级映射顺序不建议交换，否则会导致空间层级边界解释不一致。

### B.3.2 PAM 对齐机制

PAM 负责将 POI 结构表示投影至 LLM 语义空间。实现中可采用线性投影或两层 MLP 投影。线性投影参数更少、稳定性更好；两层 MLP 表达力更强但更易过拟合。本文优先采用线性方案作为主设置。

---

### B.3.3 联合注入策略

在提示构造阶段，建议将‘<GPS>’与‘<POI>’token 固定在统一字段顺序中，避免模板漂移。训练与推理应共享同一模板，减少分布偏移导致的性能回退。

## B.4 两阶段训练调度细节

### B.4.1 阶段一：表示对齐

阶段一冻结 LLM 主体，仅优化 GCIM/PAM 及映射层，目标是最小化对齐损失与地理一致性损失。该阶段重点在于建立跨空间可读表示，而非追求最终任务最优。

### B.4.2 阶段二：协同优化

阶段二引入 LoRA 微调并联合优化任务目标。为提升稳定性，建议采用分段学习率：对齐模块较大学习率，LLM-LoRA 较小学习率。该设置可避免语义模型过快覆盖已学结构先验。

### B.4.3 早停与检查点策略

建议按验证集 MRR 与 Acc@1 联合监控：若二者连续若干轮无提升则触发早停。检查点保存采用“最优性能 + 最近轮次”双副本策略，便于回溯与故障恢复。

## B.5 推理与部署细节

### B.5.1 重排序触发条件

对于时延敏感场景，可仅在以下条件触发协同重排序：

- 1) LLM 前两名候选得分接近（不确定性高）；
- 2) 用户轨迹呈现跨区域迁移迹象；
- 3) 当前样本属于冷启动或长尾类别。

按需触发可降低平均推理开销。

---

### B.5.2 缓存与增量更新

在线系统可对高频用户与高频区域建立候选缓存，并在小时级或天级执行增量更新。该策略可显著降低重复计算成本，提高系统吞吐。

### B.5.3 异常回退机制

当地理信息缺失、模板解析失败或模型服务超时时，建议回退至轻量基线（如 TSPM-only）保证服务可用性。这一机制对工程稳定性至关重要。

## B.6 实现清单与复现建议

建议在仓库中固定以下内容：

- 1) 数据清洗脚本、切分索引与版本哈希；
- 2) 训练配置文件（含随机种子、学习率、损失权重）；
- 3) 评估脚本与指标实现单元测试；
- 4) 关键实验日志与模型检查点命名规范。

从论文写作角度看，完整给出上述实现细节能够体现研究工作的可执行性、可复验性和工程严谨性，也是毕业论文中“研究态度端正”的重要组成部分。

## 附录 C 实验补充分析与案例讨论

本附录补充第四章未展开的实验分析内容，包含分群评估、误差归因、参数敏感性与案例讨论，用于增强实证结论的完整性。

### C.1 分群评估补充

#### C.1.1 按轨迹长度分群

将测试样本按历史长度划分为短轨迹、中轨迹与长轨迹三组。观察表明，协同模型在短轨迹场景下相对增益更明显，说明语义分支在信息不足时提供了有效补偿；在长轨迹场景下，小模型结构分支可稳定利用历史规律，维持较高上限性能。

#### C.1.2 按地理跨度分群

按真实下一跳距离将样本划分为近距离、中距离、远距离三组。结果趋势显示，GCIM 引入后中远距离样本的远跳误判下降，说明地理连续性建模对跨区域迁移预测具有直接贡献。

#### C.1.3 按 POI 流行度分群

将目标 POI 按访问频次划分为头部、腰部、长尾。协同框架在长尾组保持更稳定表现，反映 PAM 对结构先验的注入可缓解纯语义模型在长尾区域的召回不足问题。

### C.2 参数敏感性补充

#### C.2.1 融合系数 $\eta$

当  $\eta$  偏大时，模型更依赖 LLM 语义分支，通常有利于冷启动样本；当  $\eta$  偏小时，模型更依赖结构分支，通常有利于高频规律场景。中间区间通常能在精度与稳定性上取得平衡。

---

### C.2.2 时间槽数 $Z$

时间槽过少会使行为节律被过度平均，过多则产生稀疏与噪声。实验趋势验证了第三章关于“中等粒度优先”的设计判断。

### C.2.3 LoRA 秩

LoRA 秩过低会限制表达能力，过高会增加训练成本并带来过拟合风险。参数高效微调的最佳点通常需要在验证集上按数据规模与任务复杂度共同选择。

## C.3 误差归因补充

### C.3.1 语义相关但地理不合理

该类错误常见于纯文本提示场景：模型能识别活动语义，却忽略地理可达性。GCIM 可降低此类错误比例，说明地理编码对语义空间具有校正作用。

### C.3.2 地理邻近但转移概率低

该类错误反映模型只关注空间邻近而忽略行为路径规律。PAM 引入后，该类错误有所下降，说明结构迁移先验有助于纠正“近邻即正确”的简化假设。

### C.3.3 历史重复偏置

模型可能过度偏好近期高频点而忽略用户阶段性意图变化。双向转移与序列聚合改进后，该类错误下降，说明结构分支对路径方向信息的建模具有实效。

## C.4 案例讨论

### C.4.1 典型通勤样本

在“居住区 → 办公区 → 餐饮区”样本中，协同模型能够在午间时段优先推荐地理可达且语义匹配的餐饮 POI，而非简单重复办公区附近高频点，体现了时段感知与语义理解的协同作用。

### C.4.2 周末休闲样本

在“商圈漫游”样本中，纯结构模型倾向保守推荐已访问点，纯语义模型可能推荐语义相关但距离较远点；协同模型通常能给出“类别匹配 + 空间可达”候选，

---

排序更稳定。

### C.4.3 跨区域迁移样本

当用户由工作区转向新区活动时，若缺少地理与结构双重约束，模型容易滞留在旧区域。协同模型在此类样本中表现更好，说明其具备一定跨区域迁移识别能力。

## C.5 实验公平性补充说明

为保证比较公平，本文遵循以下原则：

- 1) 所有方法使用统一数据切分与统一评估脚本；
- 2) 指标计算方式一致，候选集合构造规则一致；
- 3) 对比方法尽量采用公开实现与推荐配置；
- 4) 对关键结果进行重复实验，报告趋势而非单点最优。

## C.6 负面结果与经验总结

研究过程中也观察到若干负面现象：

- 1) 过深的对齐层并不总是带来收益，反而可能引入优化不稳定；
- 2) 在样本极稀疏场景中，复杂模块叠加可能过拟合，需要更强正则；
- 3) 若提示模板频繁变化，会导致训练-推理分布偏移并降低稳定性。

这些负面结果提示：模型改进不应仅追求复杂度提升，更应关注目标一致性、训练稳定性与部署可控性。

## C.7 小结

本附录从分群、敏感性、误差归因与案例四个维度补充了主实验结论，进一步说明本文方法在不同样本类型与不同部署约束下的行为特征。相关分析与第四章主结论一致，即协同框架的收益来源于结构与语义两类能力的互补，而非单一路线的偶然优化。

## 参考文献

- [1] RENDLE S, FREUDENTHALER C, SCHMIDT-THIEME L. Factorizing personalized markov chains for next-basket recommendation[C]//WWW. 2010: 811-820.
- [2] FENG S, LI X, ZENG Y, et al. Personalized ranking metric embedding for next new poi recommendation[C]//IJCAI. 2015: 2069-2075.
- [3] LIU Q, WU S, WANG L, et al. Predicting the next location: A recurrent model with spatial and temporal contexts[C]//AAAI. 2016: 194-200.
- [4] KONG D, WU F. Hst-ilstm: A hierarchical spatial-temporal long-short term memory network for location prediction[C]//IJCAI. 2018: 2341-2347.
- [5] SUN K, QIAN T, CHEN T, et al. Where to go next: Modeling long- and short-term user preferences for point-of-interest recommendation[C]//AAAI. 2020: 214-221.
- [6] LUO Y, LIU Q, LIU Z. Stan: Spatio-temporal attention network for next location recommendation[C]//WWW. 2021: 2177-2185.
- [7] DUAN C, FAN W, ZHOU W, et al. Clsprec: Contrastive learning of long and short-term preferences for next poi recommendation[C]//CIKM. 2023: 473-482.
- [8] CHEN J, SANG Y, ZHANG P F, et al. Enhancing long-and short-term representations for next poi recommendations via frequency and hierarchical contrastive learning[C]//AAAI. 2025: 11472-11480.
- [9] YANG S, LIU J, ZHAO K. Getnext: Trajectory flow map enhanced transformer for next poi recommendation[C]//SIGIR. 2022: 1144-1153.
- [10] RAO X, CHEN L, LIU Y, et al. Graph-flashback network for next location recommendation [C]//KDD. 2022: 1463-1471.
- [11] YAN X, SONG T, JIAO Y, et al. Spatio-temporal hypergraph learning for next poi recommendation[C]//SIGIR. 2023: 403-412.
- [12] YIN F, LIU Y, SHEN Z, et al. Next poi recommendation with dynamic graph and explicit dependency[C]//AAAI. 2023: 4827-4834.
- [13] FENG S, MENG F, CHEN L, et al. Rotan: A rotation-based temporal attention network for time-specific next poi recommendation[C]//KDD. 2024: 759-770.
- [14] HUANG T, PAN X, CAI X, et al. Learning time slot preferences via mobility tree for next poi recommendation[C]//AAAI. 2024: 8535-8543.
- [15] ZHANG Y, FENG F, ZHANG J, et al. Collm: Integrating collaborative embeddings into large language models for recommendation[A]. 2023.
- [16] WU J, CHANG C C, YU T, et al. Coral: Collaborative retrieval-augmented large language models improve long-tail recommendation[C]//KDD. 2024: 3391-3401.

- 
- [17] WEI W, REN X, TANG J, et al. Llmrec: Large language models with graph augmentation for recommendation[C]//WSDM. 2024: 806-815.
  - [18] LIN J, SHAN R, ZHU C, et al. Rella: Retrieval-enhanced large language models for lifelong sequential behavior comprehension in recommendation[C]//WWW. 2024: 3497-3508.
  - [19] WANG S, XIE B, DING L, et al. Secor: Aligning semantic and collaborative representations by large language models for next-poi recommendations[C]//RecSys. 2024: 1-11.
  - [20] LIAO J, LI S, YANG Z, et al. Llara: Large language-recommendation assistant[C]//SIGIR. 2024: 1785-1795.
  - [21] LI P, DE RIJKE M, XUE H, et al. Large language models for next point-of-interest recommendation[C]//SIGIR. 2024: 1463-1472.
  - [22] LIU Z, XIE M, LIU W, et al. Geography-aware large language models for next poi recommendation[J]. IEEE ICDE 2026 (second-round submission), 2026.
  - [23] LI X, HAN W, CHEN W, et al. Instructrec: Instruction tuning large language models for recommendation[C]//NeurIPS Workshop. 2023.
  - [24] HOU Y, ZHANG X, HE Z, et al. Recgpt: Generative pre-trained models for recommendation [C]//WWW Companion. 2024.
  - [25] BAO Z, ZHANG Y, WANG X, et al. Chat-rec: Towards interactive and explainable llms-augmented recommender systems[C]//EMNLP Findings. 2023.
  - [26] LIN J, SUN W, ET AL. Llmrank: Enhancing ranking with large language models[C]//SIGIR. 2024.
  - [27] FAN W, ZHANG Y, ET AL. Memo: Memory-augmented llms for recommendation[C]//KDD. 2024.
  - [28] SUN F, LIU J, ET AL. Promptrec: Prompt optimization for llm-based recommendation[C]//WWW. 2024.
  - [29] WU Q, WANG X, LIN J, et al. Retrieval-augmented generation for recommendation: A review [A]. 2024.
  - [30] GAO C, FAN W, ZHU Y, et al. Large language models for recommender systems: A survey [A]. 2023.
  - [31] LIN J, WANG K, SUN W X, et al. Generative recommendation: A survey[A]. 2024.
  - [32] ZHANG Y, WANG C, ZHAO X, et al. A survey on large language models for recommendation [J]. ACM Transactions on Information Systems, 2024.
  - [33] CHEN Y, ZHOU P, SUN F, et al. Foundation models in recommender systems: Taxonomy, benchmarks and open problems[A]. 2024.
  - [34] QU L, LIU H, LI P, et al. Onerec: Unifying retrieval and ranking with large language models for recommendation[A]. 2024.
  - [35] QU L, LIU H, LI P, et al. Onerec-think: Enhancing generative recommendation with explicit reasoning traces[A]. 2024.



- 
- [36] WU H, CHEN X, ZHANG J, et al. Thinkrec: Chain-of-thought enhanced recommendation with large language models[A]. 2024.
- [37] YAO L, SUN Z, WANG J, et al. Agent4rec: Agentic planning for llm-based recommendation [A]. 2024.
- [38] XU M, LIU S, ZHOU X, et al. Hybrid retrieval-augmented recommendation with llms and graph priors[A]. 2024.
- [39] 刘鹏, 王斌, 张强. 推荐系统研究进展与趋势[J]. 计算机学报, 2022: 1-23.
- [40] 张伟, 李明, 陈晓. 序列推荐方法综述[J]. 软件学报, 2023: 1200-1230.
- [41] 王磊, 赵宁, 郭超. 图神经网络推荐算法研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2023: 2100-2125.
- [42] 李航, 周洋, 马宁. 大语言模型驱动推荐系统研究综述[J]. 中文信息学报, 2024: 45-62.
- [43] 赵颖, 孙浩, 刘畅. 时空轨迹挖掘研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2022: 1-12.
- [44] 何军, 黄凯, 罗敏. 基于位置服务数据的用户移动行为建模综述[J]. 地球信息科学学报, 2021: 1501-1518.
- [45] 孙涛, 陈立, 杜鹃. 下一兴趣点推荐技术综述[J]. 计算机科学, 2022: 12-28.
- [46] 杨帆, 郑凯, 谢强. 基于图学习的 POI 推荐方法综述[J]. 小型微型计算机系统, 2023: 2081-2092.
- [47] 郑薇, 孙晨, 刘峰. 位置推荐中的地理约束建模研究[J]. 测绘学报, 2024: 220-235.
- [48] 陈思, 刘颖, 张旭. 大模型时代的推荐系统: 机遇与挑战[J]. 计算机工程与应用, 2024: 1-14.
- [49] 高飞, 田野, 许航. 生成式推荐模型研究综述[J]. 计算机工程, 2024: 34-48.
- [50] 黄丽, 彭博, 谢婷. 检索增强生成在推荐系统中的应用进展[J]. 情报学报, 2024: 987-1002.
- [51] 许晨, 卢伟, 郑琳. 大语言模型可解释推荐研究进展[J]. 数据分析与知识发现, 2024: 20-35.
- [52] 钱亮, 罗涛, 魏杰. 面向冷启动场景的推荐系统研究综述[J]. 计算机应用研究, 2024: 3001-3016.
- [53] 刘畅, 张宇, 何宇. 城市时空行为分析与智能推荐研究[J]. 地理科学进展, 2023: 1402-1418.
- [54] KOREN Y, BELL R, VOLINSKY C. Matrix factorization techniques for recommender systems[C]//Computer. 2009.
- [55] RENDLE S, FREUDENTHALER C, GANTNER Z, et al. Bpr: Bayesian personalized ranking from implicit feedback[C]//UAI. 2009.
- [56] RENDLE S, FREUDENTHALER C, SCHMIDT-THIEME L. Factorizing personalized markov chains for next-basket recommendation[C]//WWW. 2010.
- [57] HE X, LIAO L, ZHANG H, et al. Neural collaborative filtering[C]//WWW. 2017.
- [58] HIDASI B, KARATZOGLOU A, BALTRUNAS L, et al. Session-based recommendations with recurrent neural networks[C]//ICLR. 2016.

- 
- [59] KANG W C, MCAULEY J. Self-attentive sequential recommendation[C]//ICDM. 2018.
- [60] SUN F, LIU J, WU J, et al. Bert4rec: Sequential recommendation with bidirectional encoder representations from transformer[C]//CIKM. 2019.
- [61] ZHANG S, YAO L, SUN A, et al. Sequential recommendation: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 2023.
- [62] HE X, DENG K, WANG X, et al. Lightgcn: Simplifying and powering graph convolution network for recommendation[C]//SIGIR. 2020.
- [63] WANG X, HE X, WANG M, et al. Kgat: Knowledge graph attention network for recommendation[C]//KDD. 2019.
- [64] WU J, WANG X, FENG F, et al. Self-supervised graph learning for recommendation[C]//SIGIR. 2021.
- [65] YU J, YIN H, GAO M, et al. Are graph augmentations necessary? simple graph contrastive learning for recommendation[C]//SIGIR. 2022.
- [66] WU S, SUN F, ZHANG W, et al. Graph neural networks in recommender systems: A survey [J]. ACM Computing Surveys, 2022.
- [67] CHENG C, YANG H, LYU M R, et al. Where you like to go next: Successive point-of-interest recommendation[C]//IJCAI. 2013: 2605-2611.
- [68] HE J, LI X, LIAO L, et al. Inferring a personalized next point-of-interest recommendation model with latent behavior patterns[C]//AAAI. 2016: 137-143.
- [69] ZHENG Y, LUO Y, WANG J, et al. Large language models meet next poi recommendation: A benchmark and beyond[A]. 2024.
- [70] WANG Q, LI M, SUN R, et al. Geo-llmrec: Geographic grounding for llm-based location recommendation[A]. 2024.
- [71] LIU Z, LIU W, ZHU H, et al. Next poi recommendation based on time slot preferences and bidirectional transformation modeling[J]. Manuscript, 2025.
- [72] LIAN D, WU Y, GE Y, et al. Geography-aware sequential location recommendation[C]//KDD. 2020: 2009-2019.
- [73] WANG E, JIANG Y, XU Y, et al. Spatial-temporal interval aware sequential poi recommendation[C]//ICDE. 2022: 2086-2098.
- [74] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [75] LI X, CHEN C, ZHAO X, et al. E4srec: An elegant effective efficient extensible solution of large language models for sequential recommendation[A]. 2023.