

基于模型结构和参数不确定性的渭河典型小流域洪水预报

Flood Forecasting for a Typical Small Watershed in the Wei River Based on Model Structure and Parameter Uncertainty

水利与建筑工程学院

小组成员：刘阳 任娜语 于佳丽 王岩 王洪博

指导老师：康艳

背景介绍

中小流域洪水因其突发性强、汇流时间短及下垫面复杂等特点，其精准预报是水文领域的核心难题。传统水文模型受限于其固定结构与参数化方案，在刻画洪水形成过程中的高度非线性与非平稳性关系时，往往表现不佳。近年来，深度学习技术凭借其强大的非线性映射与时序特征提取能力，为突破此瓶颈提供了新范式。该方法以数据驱动的方式，直接学习从降雨至径流的复杂内在规律，展现出卓越的模拟性能，为发展新一代智能洪水预报系统奠定了坚实基础。

本研究拟解决问题

问题1-模型结构创新：如何构建一个能综合利用多种深度学习模型（Seq2Seq, Transformer, CNN等）优势的洪水预报模型，使其在高效应对模型结构与参数的不确定性的同时，又能显著提升对极端径流事件（洪水与枯水）的精准预测能力。

问题2-不确定性解析：如何将所构建模型整合到一个分层清晰的“输入-参数-结构”的优化框架中，系统性地分离、量化并追溯洪水模拟过程中的各类不确定性的来源与传播路径，最终实现对模拟结果的可靠性的精确评估。

问题3-可解释性突破：如何打开深度学习模型的“黑箱”，解构模型内部的决策过程，量化和解释多元预测因子（如历史径流、降雨等）对输出结果的影响权重，并赋予其明确的水文物理机理解释，从而增强模型可信度与物理机理的透明度。

研究实现路径

处理“结构和参数不确定性”

选择基础队员
(Base Model)

LSTM
(Long Short-Term Memory)

擅长处理时间序列数据，能捕捉长期依赖

优化队员个人能力
(Parameter & Loss Function)

LSTM-CNN

隐含层改进

LSTM-Seq2Seq

输入、输出层改进

LSTM-Seq2Seq

输出层改进

组建冠军团队
(Stacking Ensemble)

Critic-熵权法确定最佳DL模型

结合HEC-HMS（分布式物理水文模型）
构建物理-DL冠军模型

打开“黑箱”——SHAP可解释性分析

锁定候选因子

历史径流数据

确定影响洪水模拟的主要因素，验证合理性

气象数据

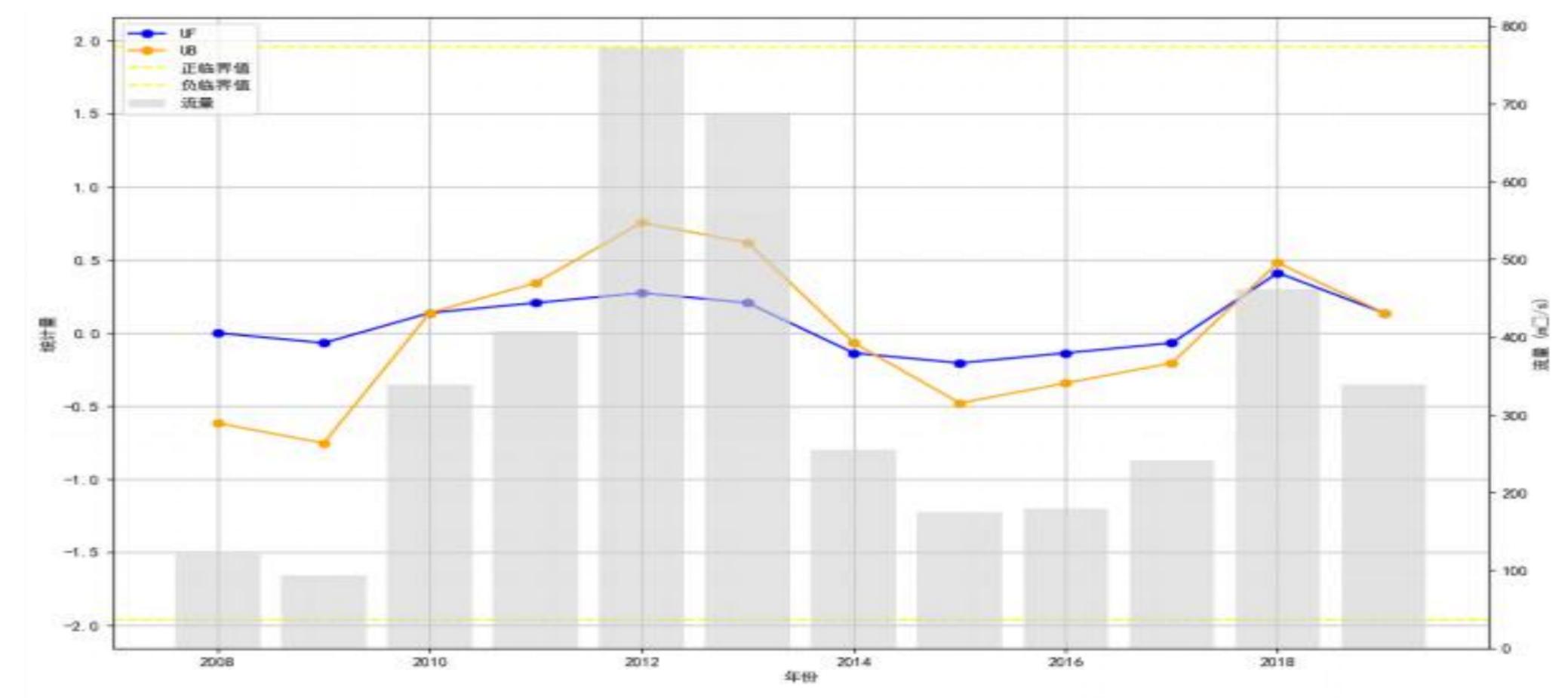
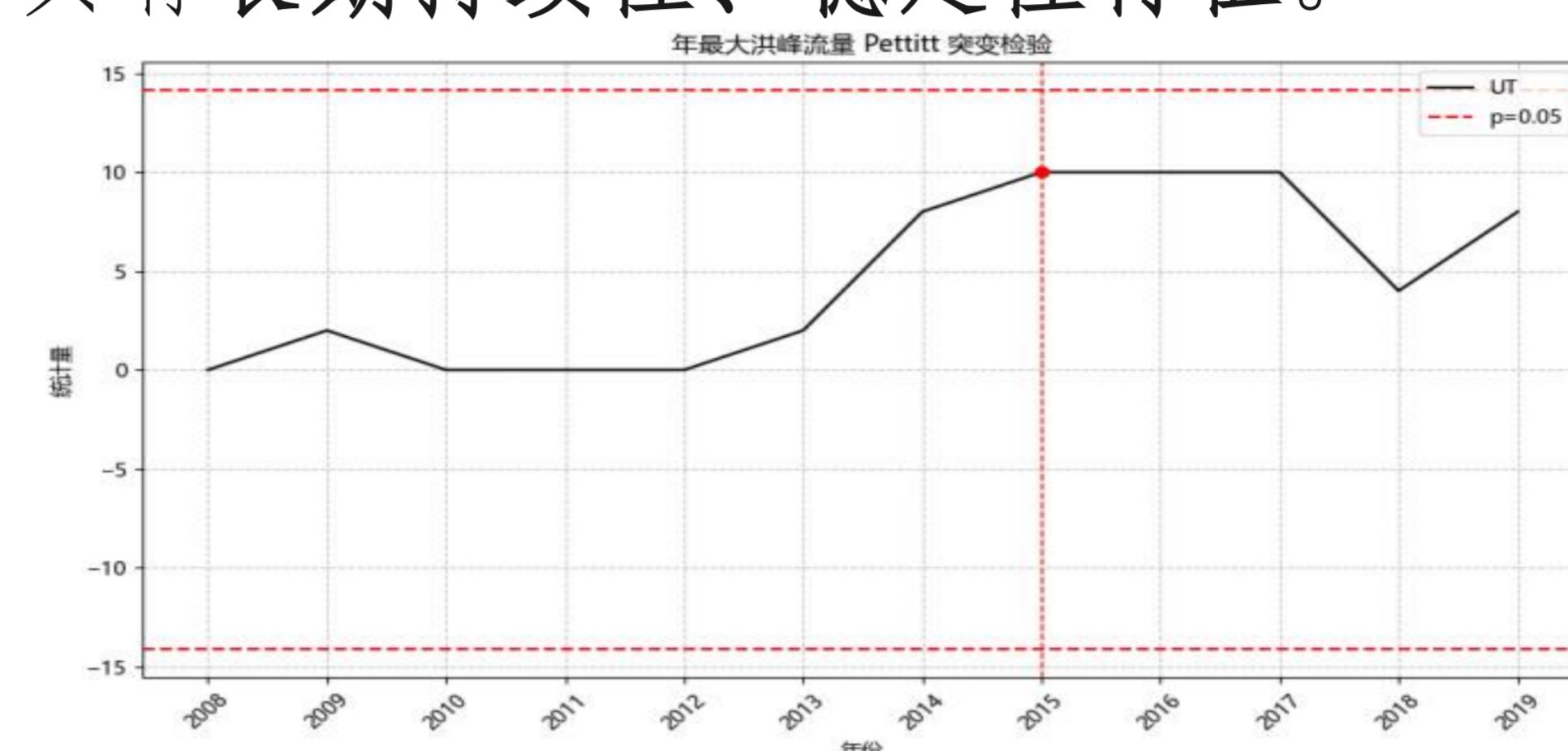
地形条件

SHAP

计算每个特征因子对最终结果的“贡献值”

研究阶段性进展

本研究通过收集陕西省渭河一级支流石头河流域2007年-2022年的降水、径流数据，对流域洪水特性进行分析：首先对历史径流数据进行Pettitt检验，确保洪水时间序列数据在一定时间内并无显著变化；其次通过Mann-Kendall检验，再次确定流域径流在一定时期内无显著变化；最后计算流域Hurst指数值进一步确保流域数据具有长期持续性、稳定性特征。

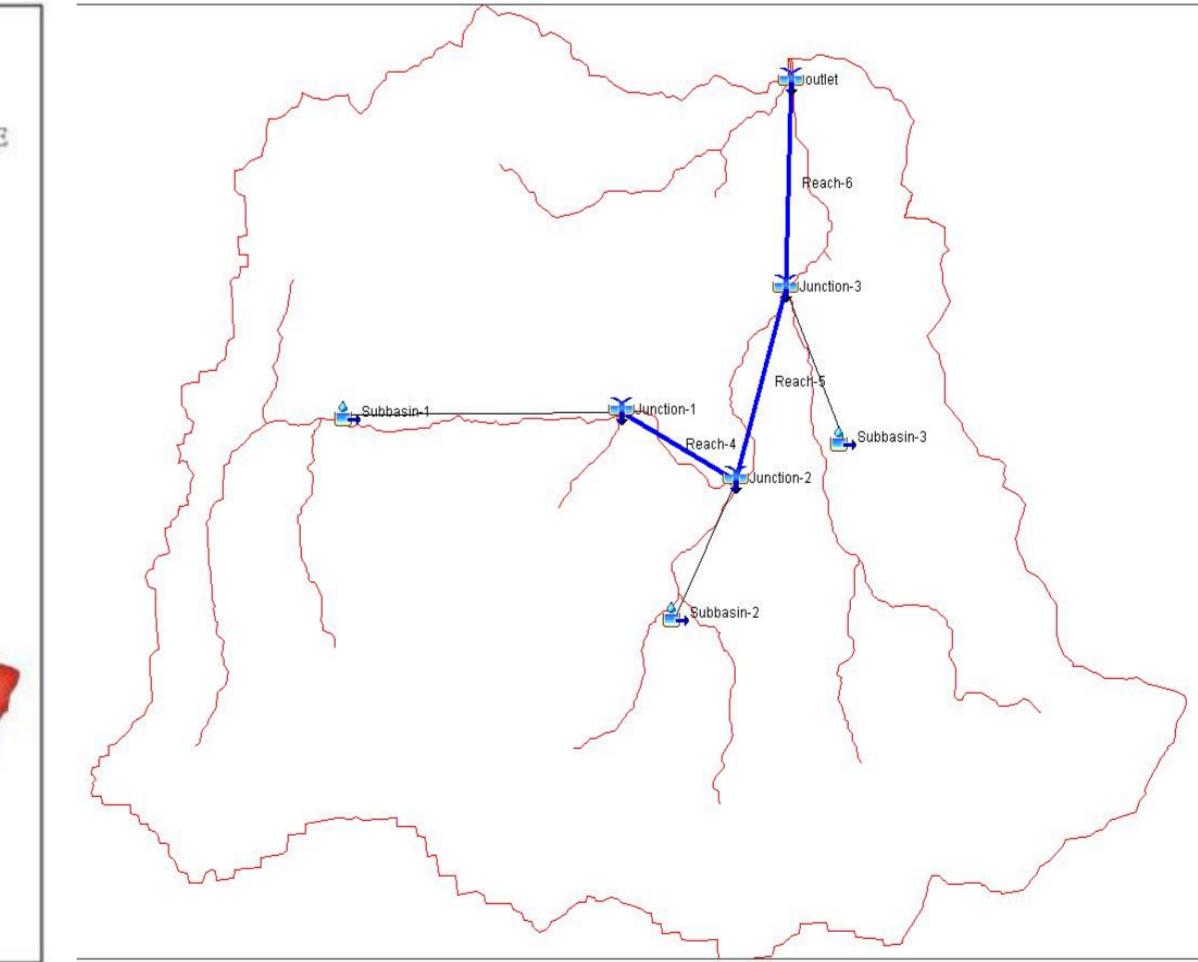
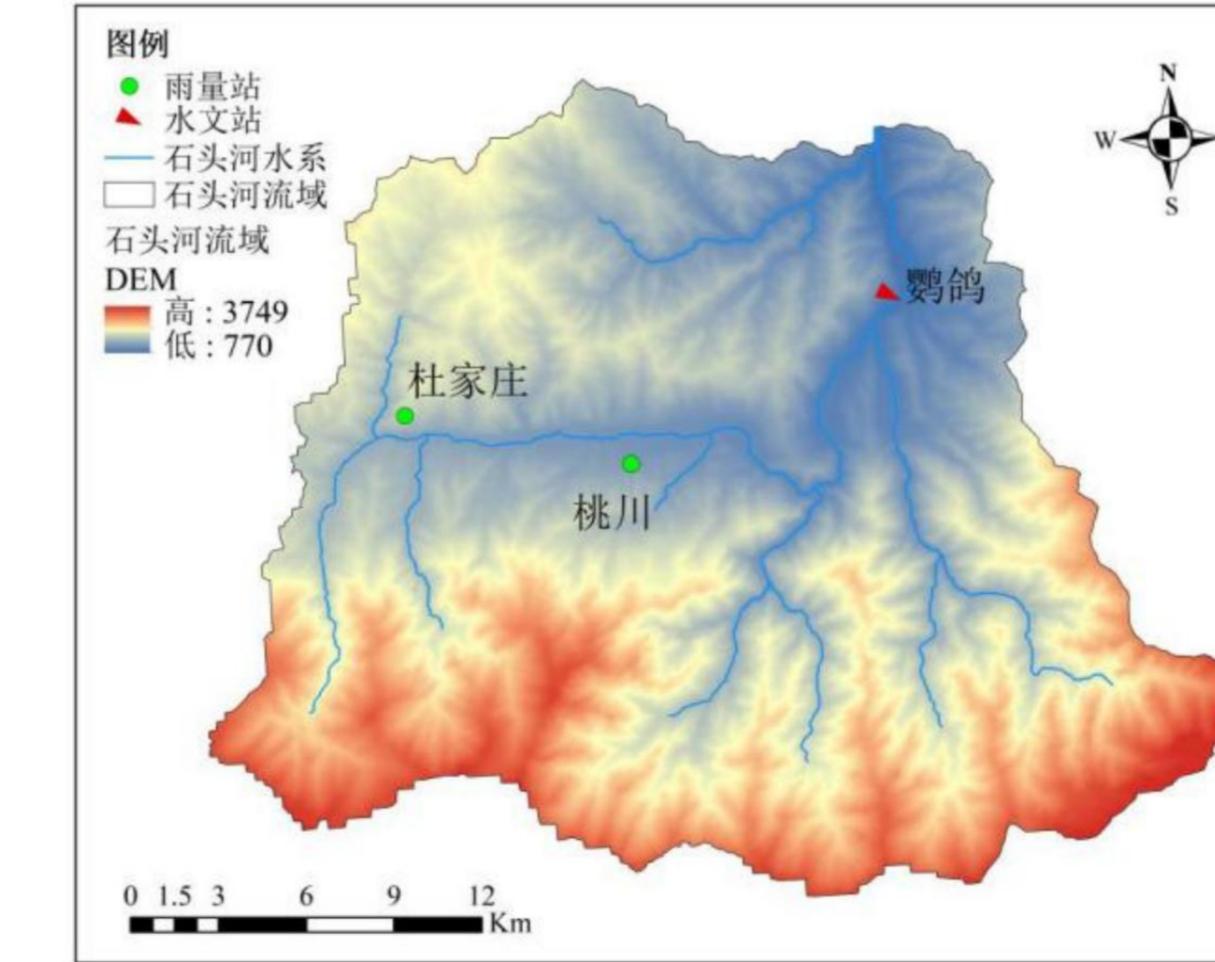
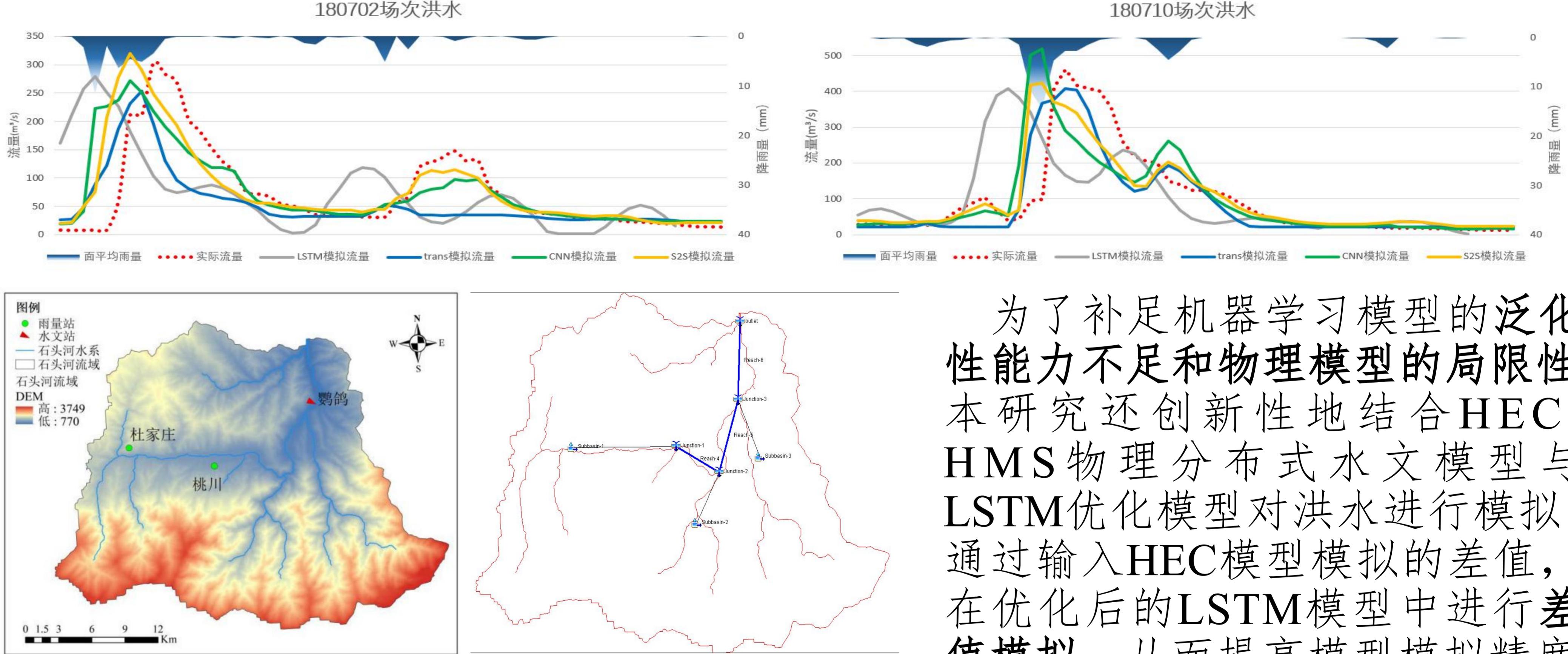


本研究以LSTM模型为基础，分别结合CNN、Seq2Seq和Transformer对LSTM模型进行多层改进。本研究首先筛选出流域的43场洪水数据，并对场次洪水进行划分，分为率定期和验证期，再将筛选出的场次洪水依次输入模型中，对所构建模型进行了实验与比较，实验结果如下图表所示：

率定期	NSE	R	KGE	PBIAS	RMSE	MAE	NMSE
LSTM	0.715	0.848	-12.361	8.853	58.436	34.842	0.285
LSTM-CNN	0.904	0.976	0.859	2.397	26.213	13.817	0.0001
LSTM-Transformer	0.692	0.851	0.678	-14.586	65.265	37.808	0.001
LSTM-Seq2Seq	0.961	0.988	0.908	1.113	23.400	13.301	0.00009

验证期	NSE	R	KGE	PBIAS	RMSE	MAE	NMSE
LSTM	0.887	0.945	-8.430	5.699	41.513	29.920	0.113
LSTM-CNN	0.905	0.952	0.930	-1.686	34.162	22.413	0.001
LSTM-Transformer	0.875	0.955	0.762	5.384	29.375	27.991	0.002
LSTM-Seq2Seq	0.916	0.962	0.868	3.234	24.624	23.115	0.0001

模拟结果显示，四个机器学习模型在验证期的洪水模拟中，仅考虑NSE系数，除180702的LSTM-Transformer模型只达到乙级精度，其余模型均达到行业要求甲级精度。研究也发现，LSTM-S2S模型在新型评价体系下的得分较LSTM基础模型提高了42.2%。



为了补足机器学习模型的泛化能力不足和物理模型的局限性，本研究还创新性地结合HEC-HMS物理分布式水文模型与LSTM优化模型对洪水进行模拟，通过输入HEC模型模拟的差值，在优化后的LSTM模型中进行差值模拟，从而提高模型模拟精度。

所获成果

本小组基于研究所获成果截至目前已申请软件著作权2项；参与全国大学生统计建模大赛获得陕西省赛区一等奖；转化研究成果参与学科竞赛3项。此外，基于本科创项目，小组有1项实用新型专利《一种用于山洪预警的便携式可部署水文监测桩》在申；1项软件著作权《基于LSTM的水文模拟残差补偿系统》在申；1篇英文学术论文已基本完稿。

所获成果离不开国家大学生创新创业训练项目的资助；感谢西农水建学院康艳副教授团队的辛勤指导；感谢西农水建学院和陕西省水利厅共同搭建的项目平台。

