流域过程建模与管理措施情景优化方法框架

朱良君

中国科学院地理科学与资源研究所

地理信息科学与技术全国重点实验室

zlj@lreis.ac.cn

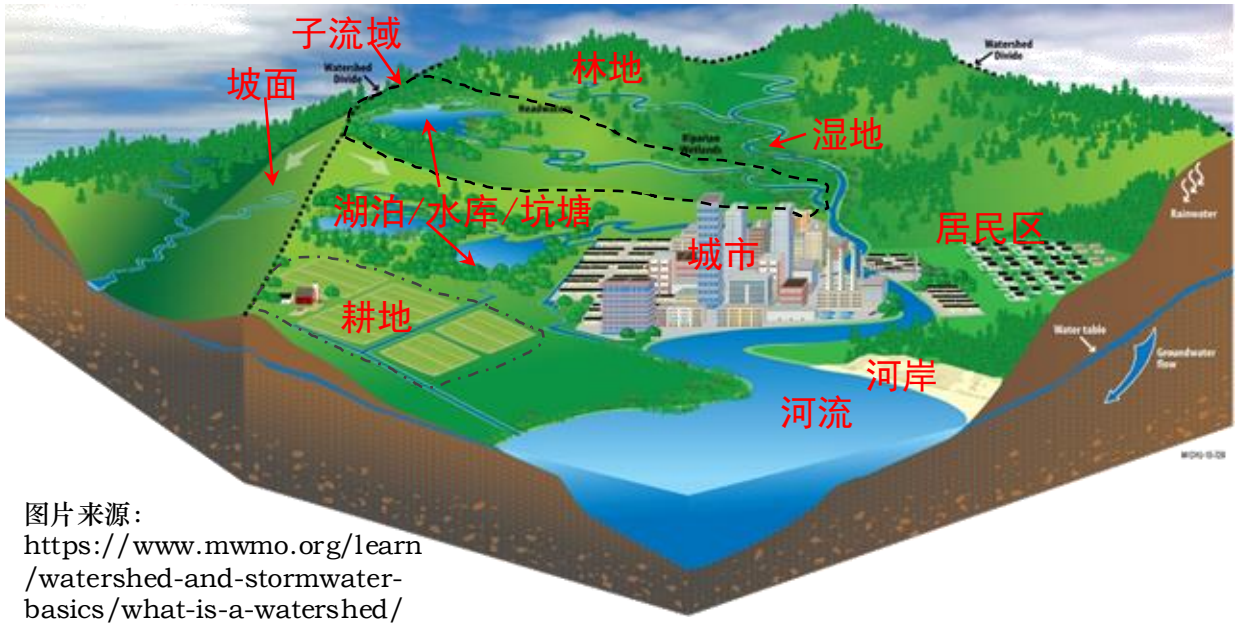
2026年11月14日

提 纲

1. 研究背景：流域精细治理的科学决策需求
2. 流域过程建模与管理措施情景优化方法框架
3. 研究进展
4. 智能化方法研究展望
5. 总结

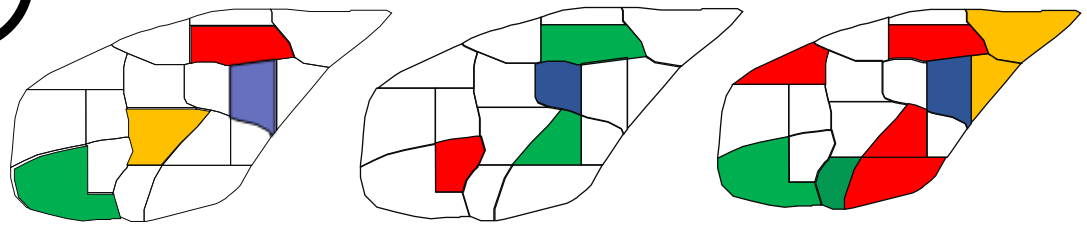
1. 研究背景：流域精细治理的科学决策需求

流域生态保护和高质量发展，迫切需要流域精细治理的科学决策支持，即根据环境和经济等多目标，分析并推荐可行的流域管理措施（BMP）空间布局和实施路线。



图片来源：
https://www.mwmo.org/learn/watershed-and-stormwater-basics/what-is-a-watershed/





多种BMP在流域内的**空间组合**

（BMP情景）

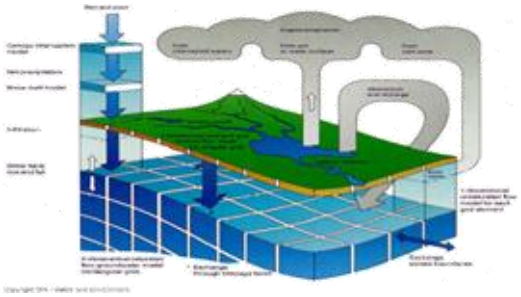
核心科学问题

“何时、何地、实施何种管理措施可实现流域治理多目标最优”？



2. 流域过程建模与管理措施情景优化方法框架

基于流域系统模拟的情景分析方法是解决上述科学问题的有效手段。



构建流域过程模型

设计流域管理措施情景



量化环境、经济等效益

引导情景迭代设计



空间布局、实施路线



辅助决策制定

面向情景分析的流域建模框架 ⟹ 情景优化 ⟹ 参与式情景决策支持

秦承志, **朱良君***, 申申, 等. **2024**. 基于流域系统模拟—情景优化的精细治理决策支持方法. ***地理学报***, 79(1): 58–75.
朱阿兴, **朱良君***, 史亚星, 等. **2019**. 流域系统综合模拟与情景分析——自然地理综合研究的新范式？ ***地理科学进展***, 38(8): 1111-1122.

研究思路

面向情景分析的流域建模框架 ⟹ 情景优化 ⟹ 参与式情景决策支持

流域过程异质性、BMP模拟方法、…；计算密集

➔如何灵活高效进行流域建模与模拟？

构建技术底座

BMP成本-效益的时空差异、BMP空间配置知识、…

➔如何有效表达流域治理需求进行情景优化？

创新情景分析方法

方法应用的高复杂性、多利益相关者的参与、…

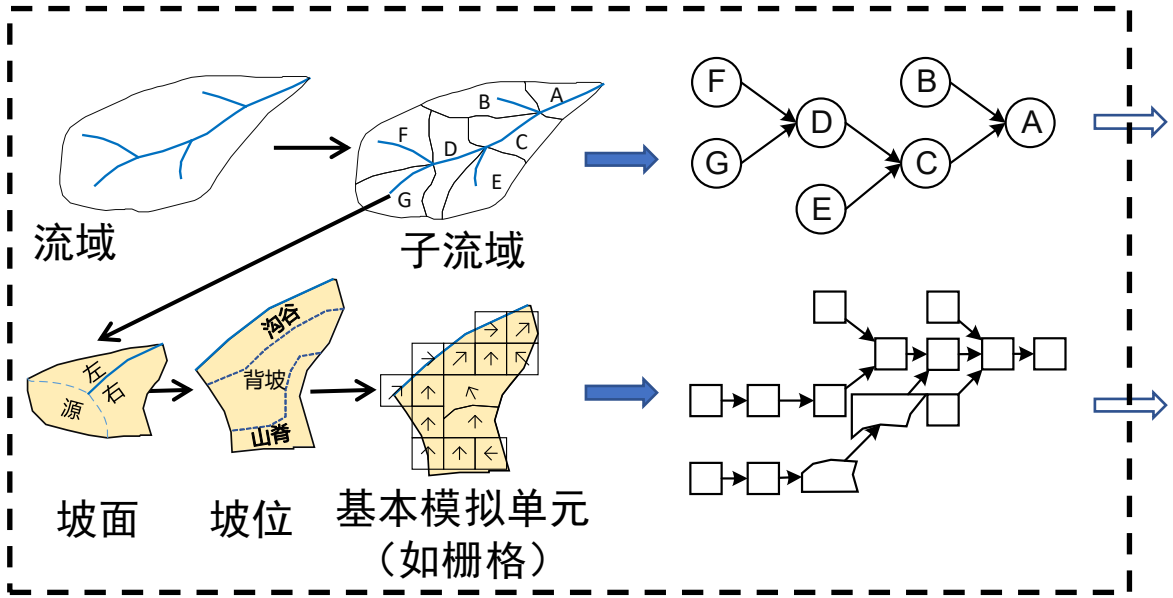
➔如何有效辅助多利益相关者参与并协商决策？

设计实现易用化系统

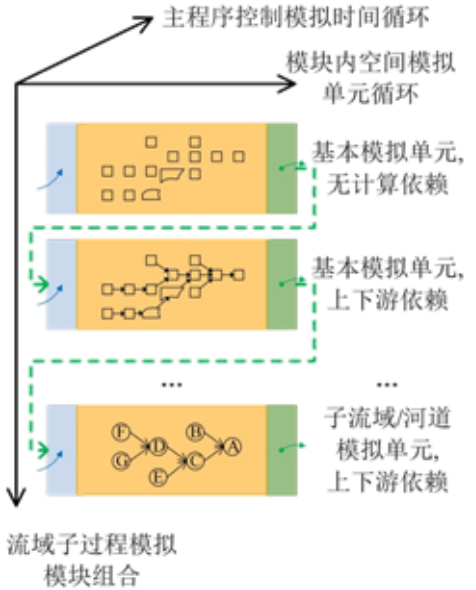
3. 研究进展1a：模拟–优化–决策支持：迭代设计灵活高效的流域建模框架

科学问题：已有流域建模框架难以兼顾模型结构灵活可扩展与计算性能

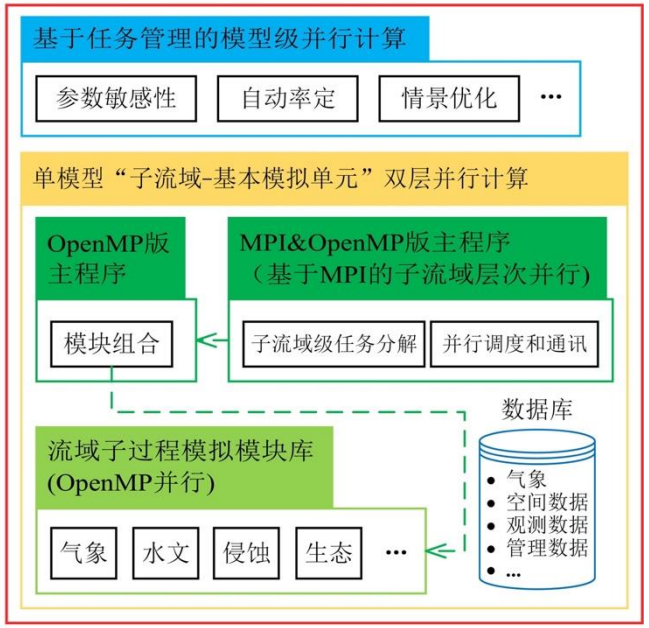
新方法：基于流域层次化离散方法和分治思想，提出二者兼顾的建模方法。



流域层次化离散方法



空间角度的模块化结构



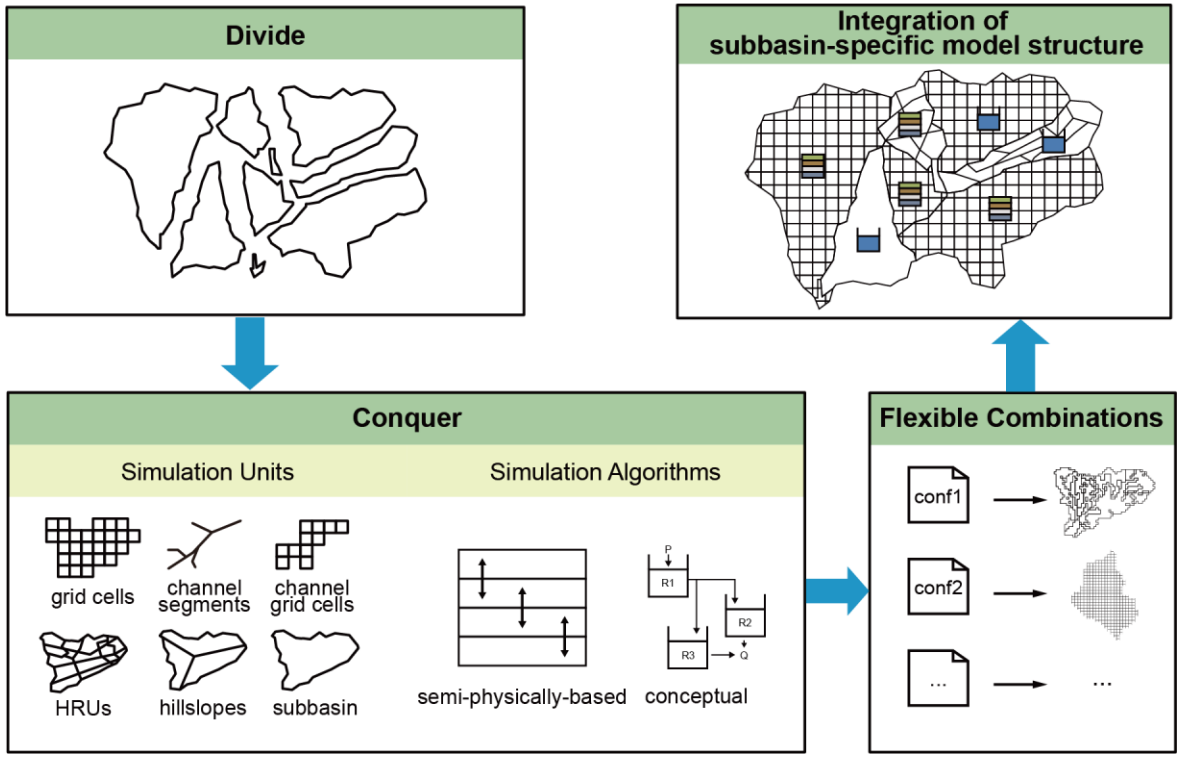
多层次并行计算能力

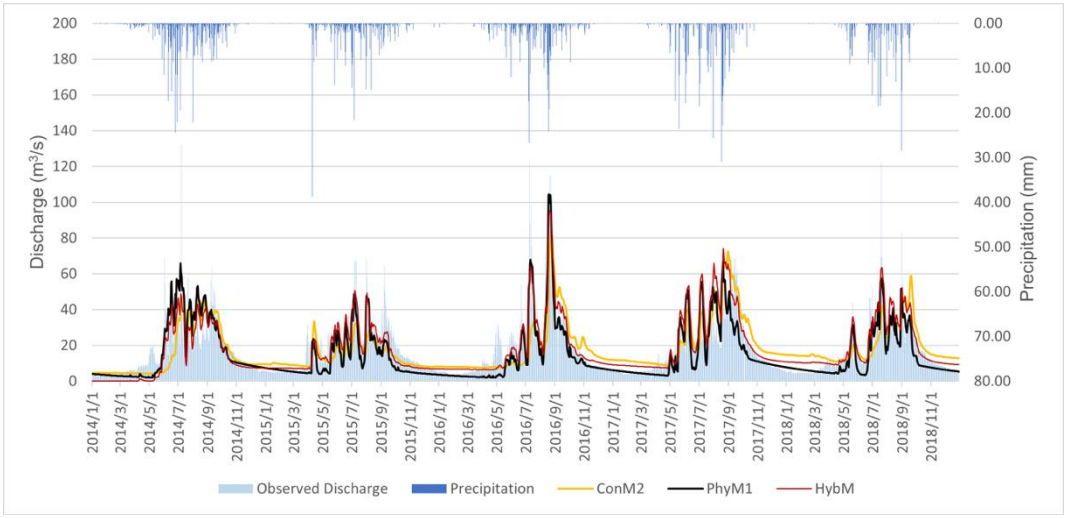
Zhu, L.J., Liu, J.*, Qin, C.Z.*, Zhu, A.X. **2019**. A modular and parallelized watershed modeling framework. ***Environmental Modelling & Software***, 122, 104526. (https://github.com/lreis2415/SEIMS)

3. 研究进展1b：模拟–优化–决策支持：迭代设计灵活高效的流域建模框架

科学问题：空间分区混合模型结构仅以概念式模型来表征流域过程异质性。

新方法：空间模拟单元与过程描述算法灵活组合的空间分区混合模型结构。

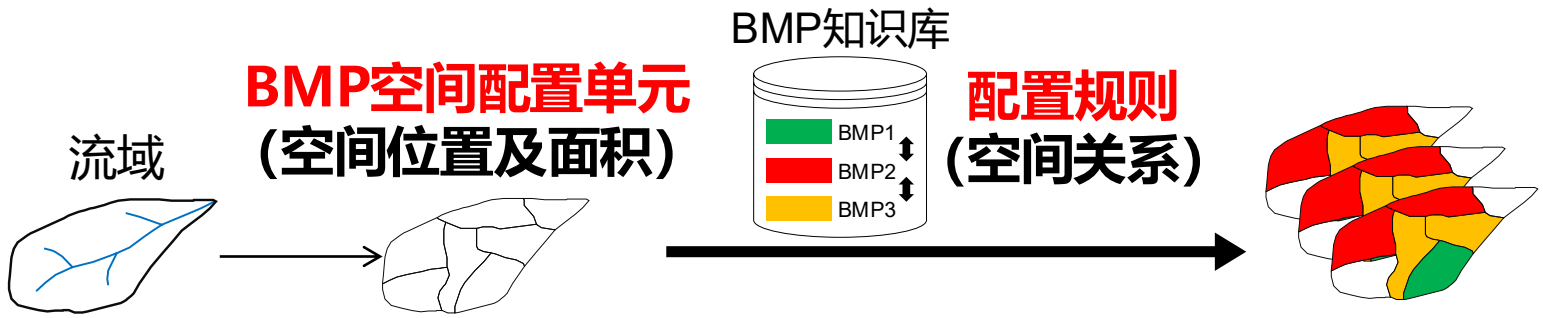




混合模型结构继承了各模型结构的优势、同时缩小各自局限性的影响范围，实现了建模灵活性和均衡的模拟性能提升。

Wang, Y.J., **Zhu, L.J.***, Qin, C.Z., and Zhu, A.X., **2026**. A spatially hybrid hydrological modeling approach using subbasin-specific model structures. ***Environmental Modelling & Software***, 200: 106944.

3. 研究进展2：模拟–优化–决策支持：有效表达流域实际治理需求的BMP情景优化方法



科学合理的BMP情景要求能够有效表达流域实际治理需求，例如表达小流域综合治理模式。

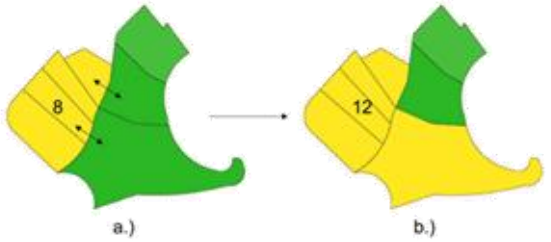
单元类型



子流域　水文响应单元　地块

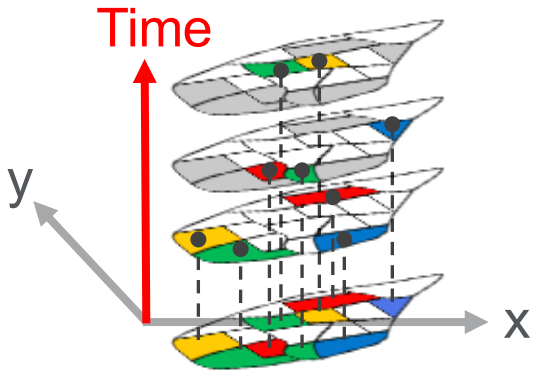
新空间配置单元类型

空间维度



考虑空间单元特征

时间维度

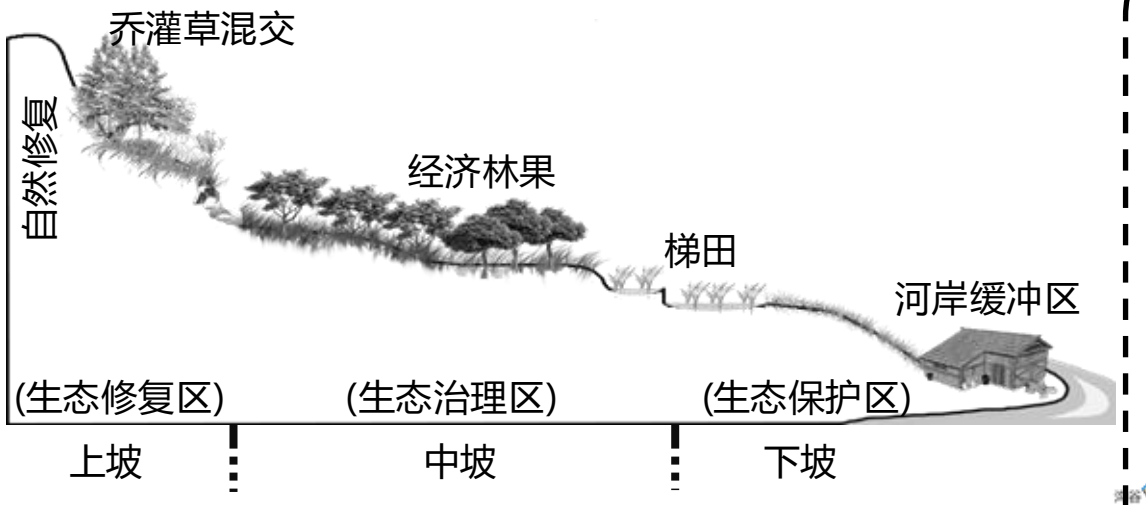


考虑BMP实施时间

3. 研究进展2a：模拟–优化–决策支持：提出新的BMP空间配置单元

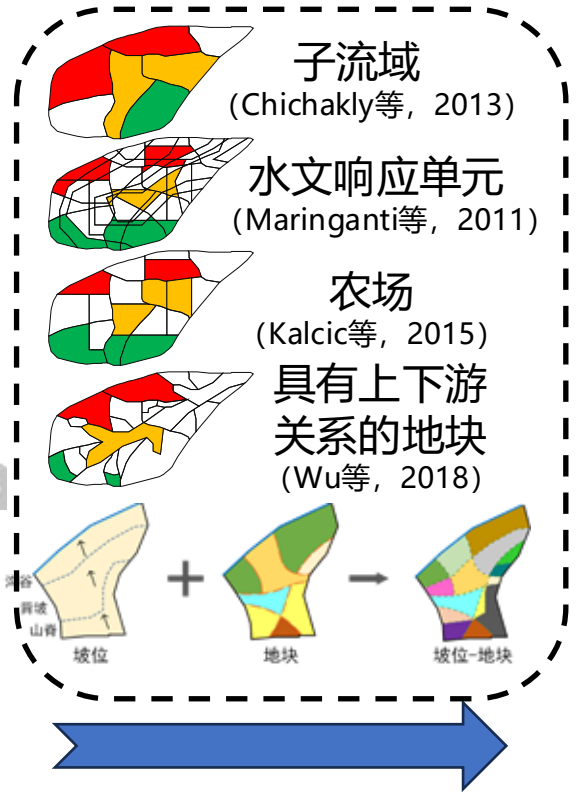
科学问题：已有空间配置单元与地形单元不符，不能体现坡面过程上下游特征

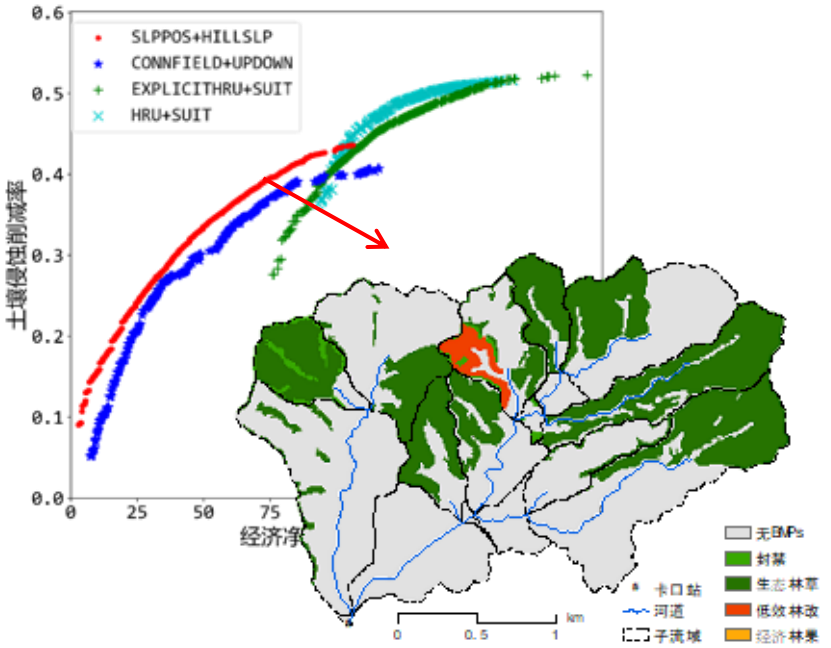
新方法：提出利用坡位、坡位-地块等单元表达坡面BMP空间关系的优化方法。



南方红壤侵蚀区流域水土保持综合治理模式示意图

(蔡强国 等，2012)



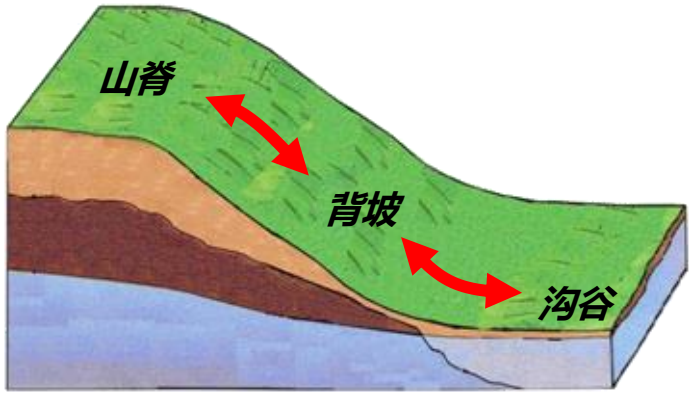


Qin, Gao, **Zhu***, et al., *JSWC*, **2018**; **Zhu** et al., *Water*, **2019** ; 史亚星, **朱良君***, 等, *地球信息科学学报*, **2021**; Wu, **Zhu***, et al., *JoH*, **2023**

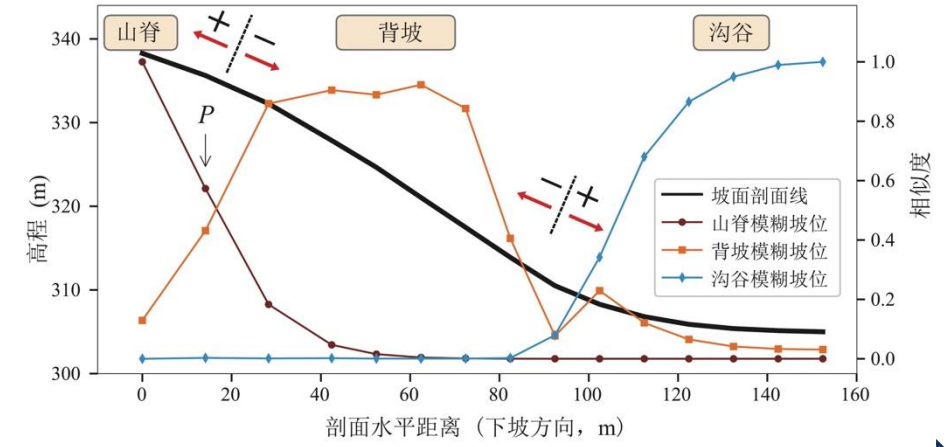
3. 研究进展2b：模拟–优化–决策支持： 考虑单元边界动态调整的新优化维度

科学问题：优化中空间配置单元固定不变，不能体现措施边界模糊的现实情况

新方法：提出利用模糊坡位动态优化空间配置单元边界的方法。

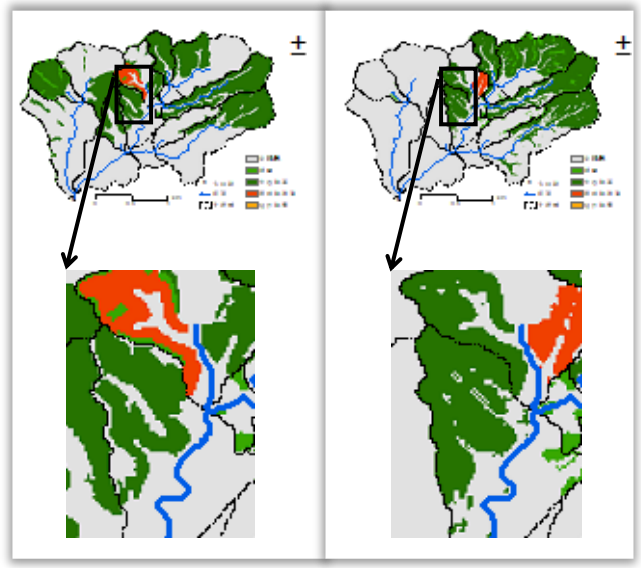


自然坡面中坡位的模糊渐变特征



定性、模糊的
地理知识

定量、显式的
地理算法



边界固定　　边界动态优化

Zhu, L.-J., Qin, C.-Z.*, Zhu, A.-X., **2021**. Spatial optimization of watershed best management practice scenarios based on boundary-adaptive configuration units. ***Progress in Physical Geography: Earth and Environment***, 45(2): 207–227.

Zhu, L.-J., Zhu, A.-X., Qin, C.-Z.*, Liu, J.-Z., **2018**. Automatic approach for deriving fuzzy slope positions. ***Geomorphology***, 304: 173–183.

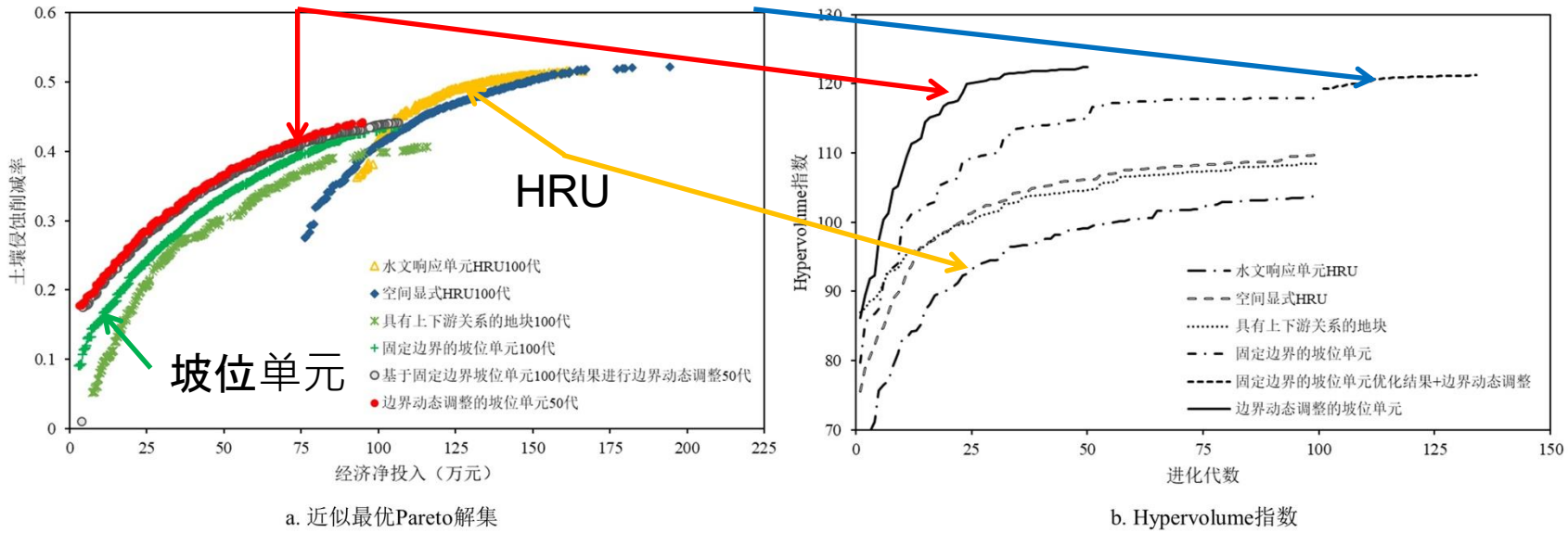
3. 研究进展2b：模拟–优化–决策支持： 考虑单元边界动态调整的新优化维度

科学问题：优化中空间配置单元固定不变，不能表达措施边界模糊的实施需求

新方法：提出利用模糊坡位动态优化空间配置单元边界的方法。

坡位单元&直接采用
边界动态调整策略

坡位单元&以固定边界的
解集为基础，优化边界



a. 近似最优Pareto解集　　b. Hypervolume指数

✓ **坡位单元边界动态调整能显著扩大情景优化的搜索解空间，得到综合成本-效益更优的BMP情景集**

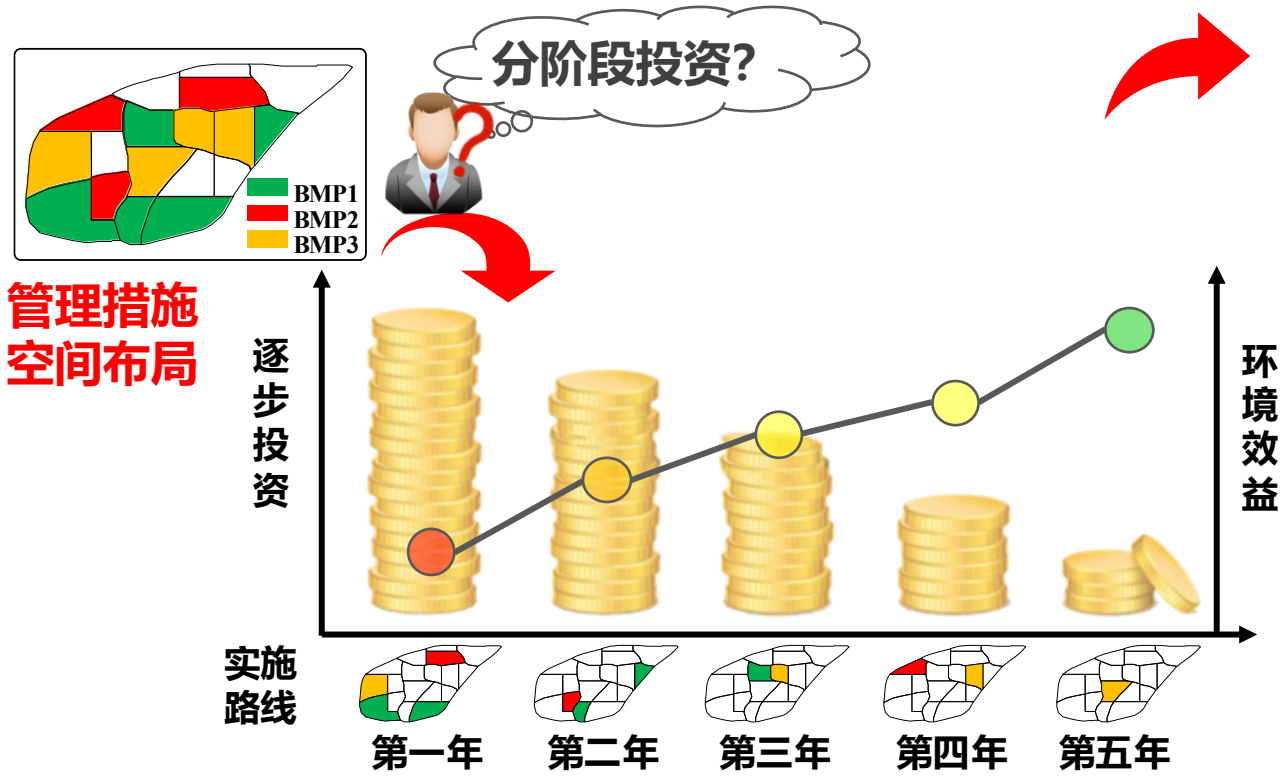
Zhu, L.-J., Qin, C.-Z.*, Zhu, A.-X., **2021**. Spatial optimization of watershed best management practice scenarios based on boundary-adaptive configuration units. ***Progress in Physical Geography: Earth and Environment***, 45(2): 207–227.

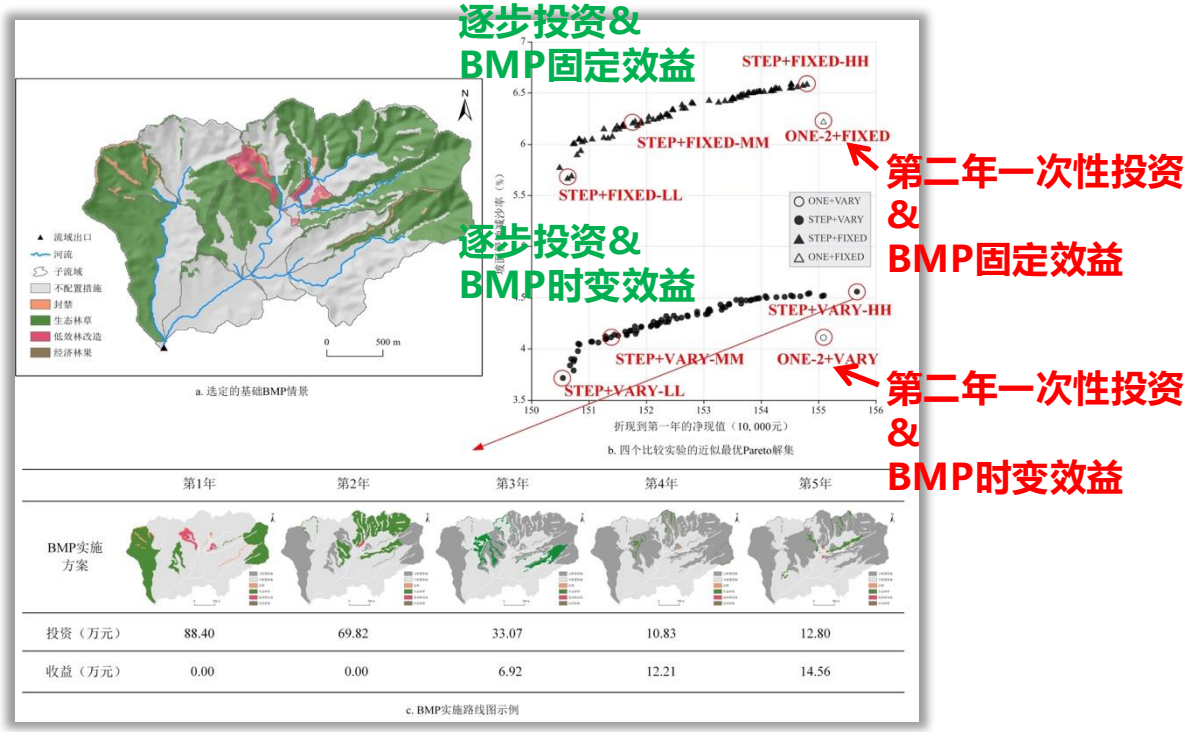
Zhu, L.-J., Qin, C.-Z.*, Zhu, A.-X., Liu, J., Wu, H., **2019**. Effects of different spatial configuration units for the spatial optimization of watershed best management practice scenarios. ***Water***, 11(2): 262.

3. 研究进展2c：模拟–优化–决策支持： 考虑BMP实施时间，从空间优化扩展到时空优化

科学问题：情景优化方法无法得到符合实际需求的分阶段实施路线图

新方法：提出逐步投资约束下的管理措施实施次序优化，从空间维扩展到时间维



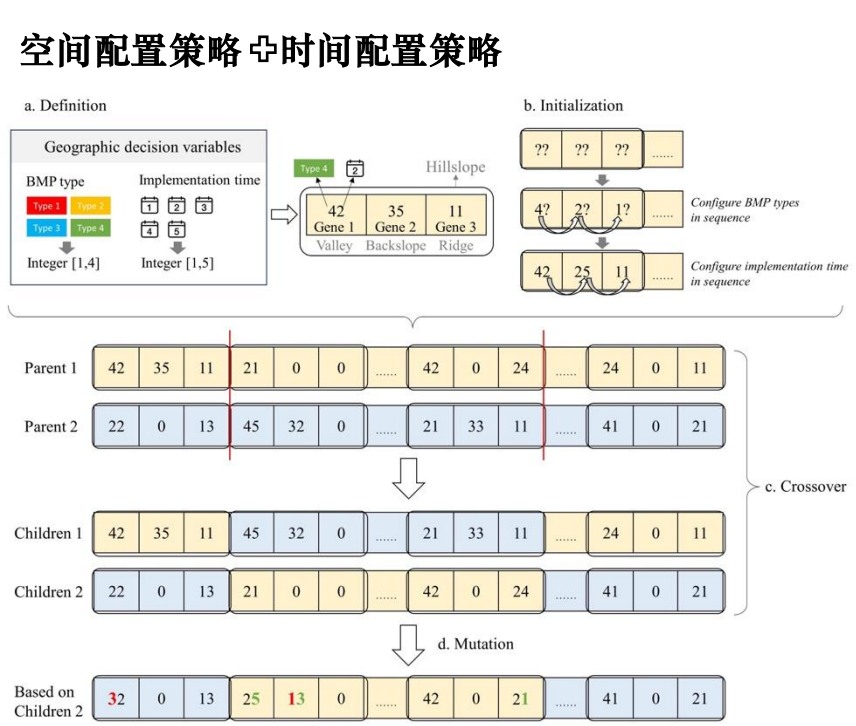


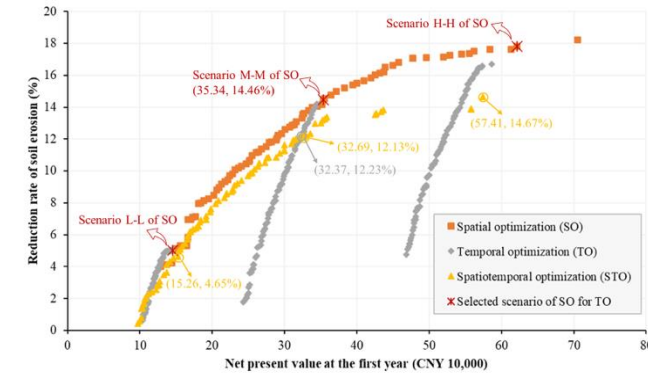
Shen, S., Qin, C. Z., **Zhu, L. J.***, Zhu, A. X. **2023**. Optimizing the implementation plan of watershed best management practices with time-varying effectiveness under stepwise investment. ***Water Resources Research***, 59(6): e2022WR032986.

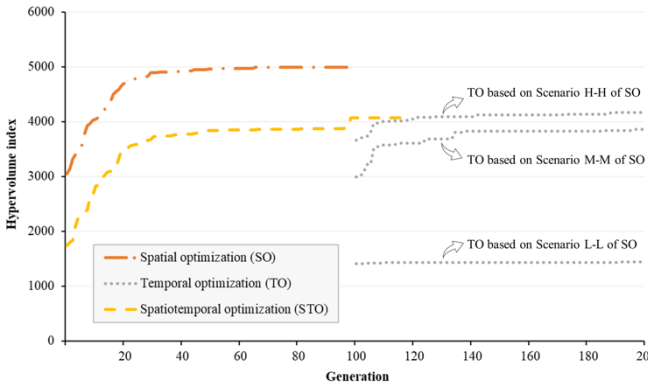
3. 研究进展2c：模拟–优化–决策支持： 考虑BMP实施时间，从空间优化扩展到时空优化

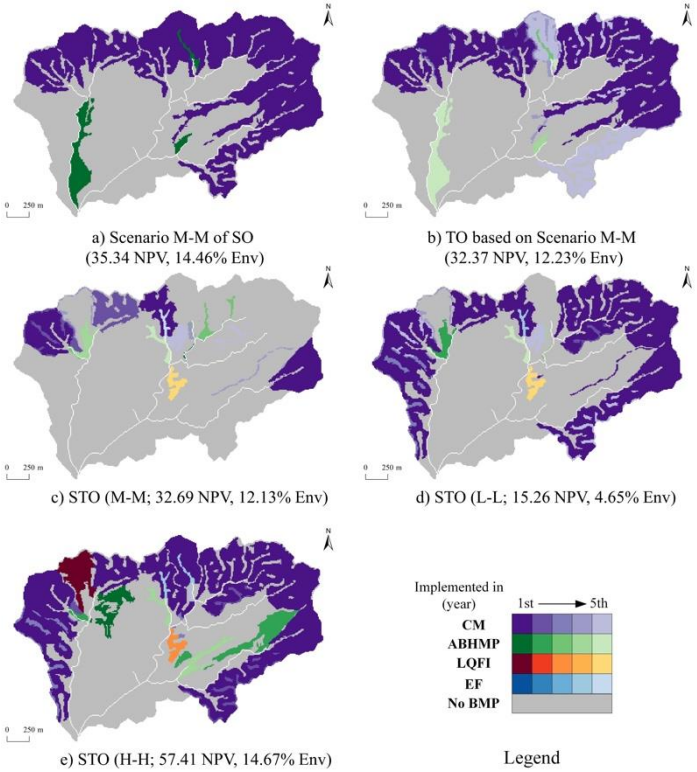
科学问题：情景优化方法无法得到符合实际需求的分阶段实施路线图

新方法：提出逐步投资约束下的管理措施实施次序优化，从空间维扩展到时空维









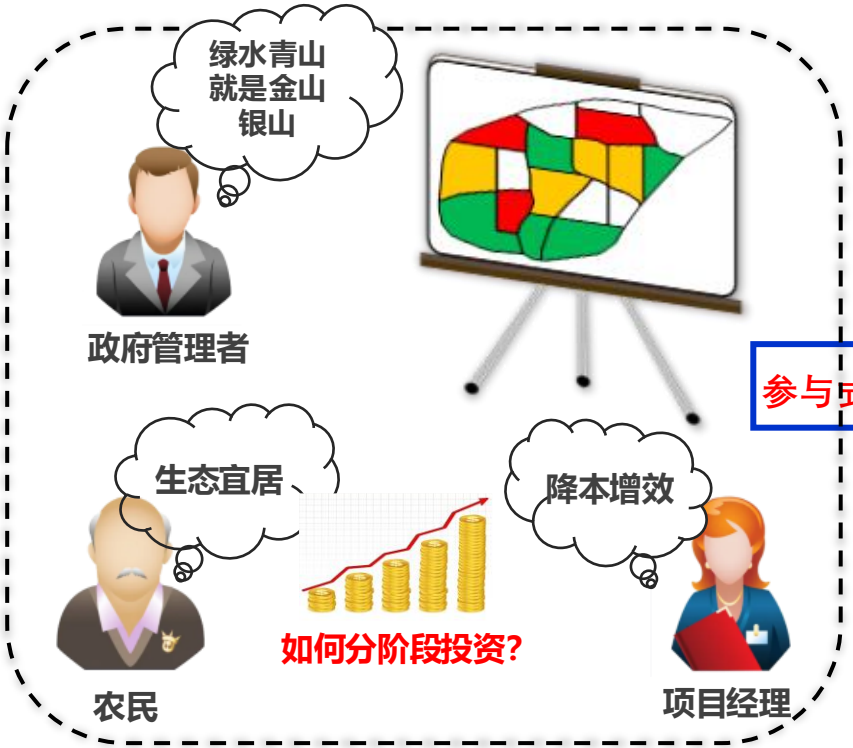
Wu, T., **Zhu, L.J.***, Shen, S., Qin, C.Z., and Zhu, A.X. **2026**. Spatiotemporal optimization method for watershed management practice scenarios within a simulation–optimization framework. ***Water Resources Management***, 40(7): 281.

3. 研究进展3a：模拟–优化–决策支持： 设计易用的参与式流域规划系统

科学问题：优化方法的应用对专业知识要求较高，难以有效促进各方实际参与

主要成果：将会商决策过程与专业建模过程相分离，设计并评价了一个用户友好的参与式流域规划系统。

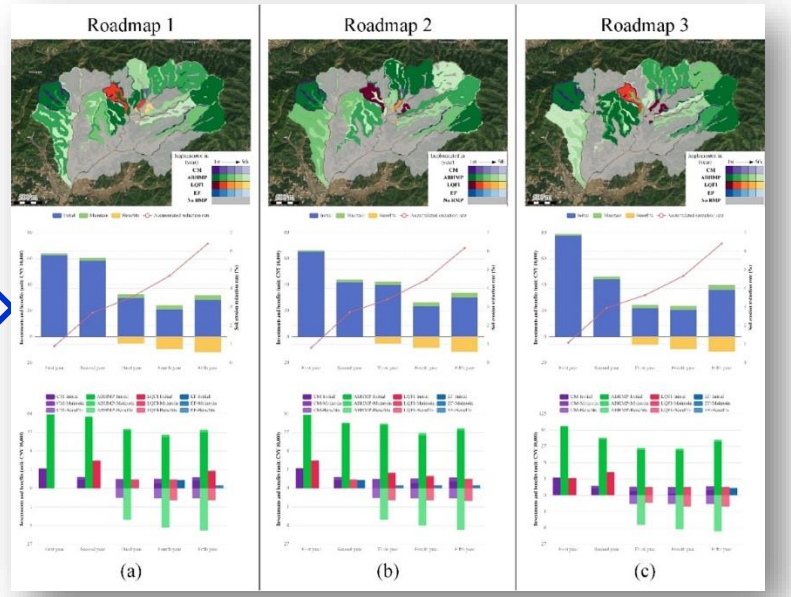
http://8.130.184.170:18080



参与式规划



达成一致的实施路线图

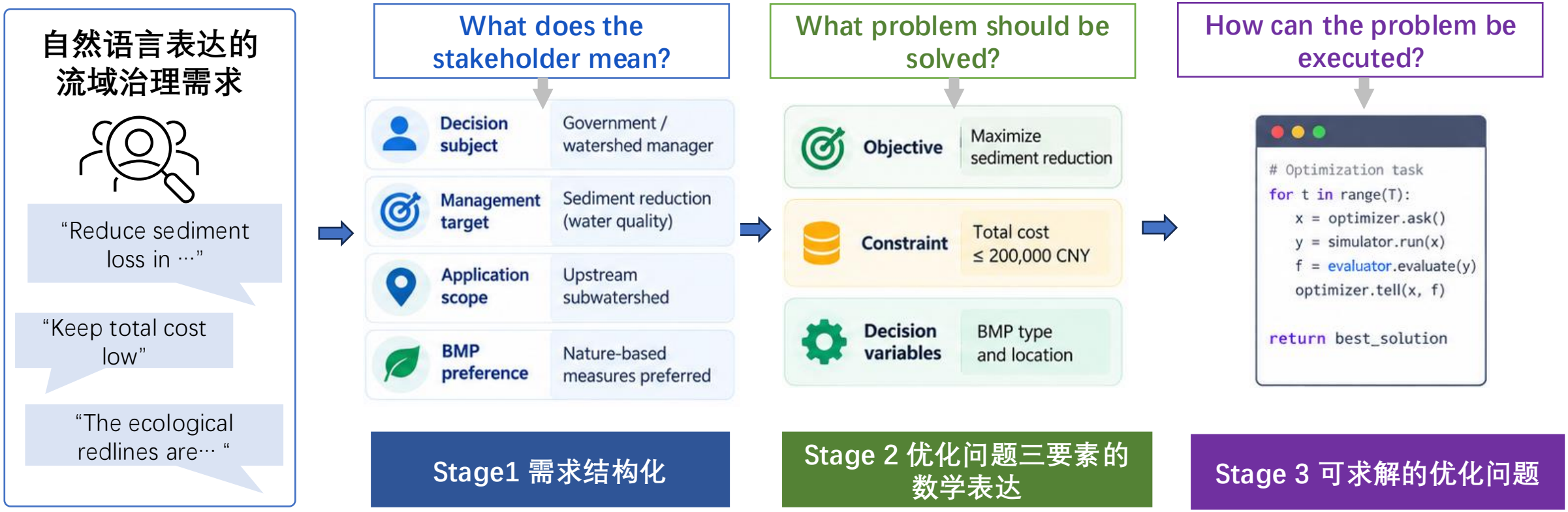


Shen, S., Qin, C. Z., **Zhu, L. J.***, Zhu, A. X. **2023**. From scenario to roadmap: Design and evaluation of a web-based participatory watershed planning system for optimizing multistage implementation plans of management practices under stepwise investment. ***Journal of Environmental Management***, 342: 118280.

3. 研究进展3b：模拟–优化–决策支持： 设计易用的参与式流域规划系统

科学问题：优化方法的应用对专业知识要求较高，难以有效促进各方实际参与

新方法：领域建模知识约束下、基于LLM的BMP情景优化问题生成与求解方法。



http://8.130.184.170:18080 https://github.com/lreis2415/WatershedPlanningSystem

Fan, X., **Zhu, L.-J.**, Qin, C.-Z.*, **2026**. Watershed Management Demands to Executable Optimization Tasks: A Structured Demand-to-Task Approach for Watershed Management Scenario Optimization. ***Available at SSRN***: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.7601923 (Under review for JoH)

4. 智能化方法研究展望

面向情景分析的流域建模框架 ⟹ 情景优化 ⟹ 参与式情景决策支持

流域过程异质性、BMP模拟方法、…；计算密集

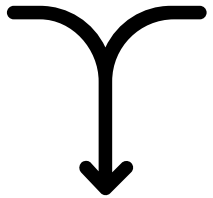
➔如何灵活高效进行流域建模与模拟？

BMP成本-效益的时空差异、BMP空间配置知识、…

➔如何有效表达流域治理需求进行情景优化？

方法应用的高复杂性、多利益相关者的参与、…

➔如何有效辅助多利益相关者参与并协商决策？

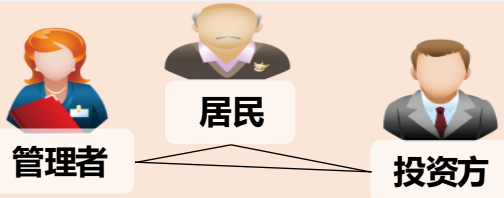


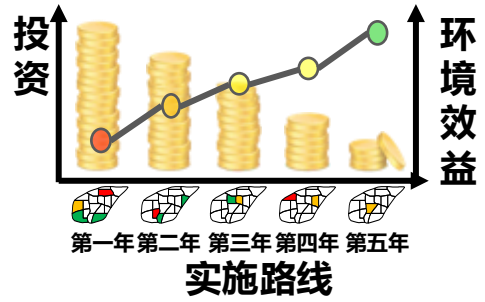
智能化：自适应于流域治理应用场景，自动化、用户友好且准确地进行流域过程模拟与管理措施情景优化。



流域治理目标
社会经济发展
资金分期投入
政策法规限制……

?





易用的流域精细治理决策支持系统

? 与大语言模型（LLMs）结合

? 流域模拟与情景优化的一站式智能化平台

对流域精细治理应用场景的智能化理解与形式化

对建模过程和结果的人机交互智能化

流域模拟智能化

? 智能化确定合适的模型结构

? 智能化配备输入数据和模型参数

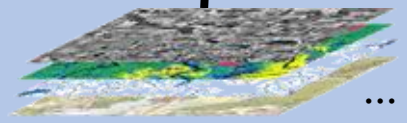
? 智能化实现模型高效率执行

? ……

流域模拟

流域响应

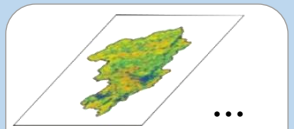
流域过程模型
（定量评价BMP情景）



…

地理要素空间分布信息

情景优化



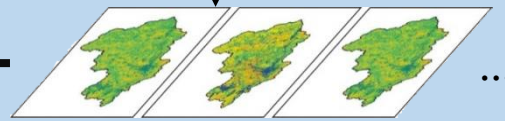
…

情景优化结果

情景优化工具

优化结束

可能的情景? 自动寻优



…

流域管理措施情景

情景优化智能化

? 智能化确定情景优化问题（优化目标、决策变量、约束条件）

? 智能化实现高质量、高效率的情景优化

? ……

基础地理信息和
流域管理措施数据库

流域建模和流域治理等
领域知识库

流域系统模拟和情景优化
等模型算法库

大语言模型、知识图谱、云原生、数字孪生等新一代信息技术

5. 总结

- 面向流域精细治理决策支持需求，以GIS的视角，开展方法研究和工具研发：

1）如何合理高效进行流域过程建模与模拟?

从建模灵活性和计算性能角度，迭代设计流域建模框架SEIMS (EM&S, 2019, 2026)

2）如何合理高效进行情景分析及优化?

从BMP空间配置单元角度，提出了考虑流域管理措施空间交互作用和配置单元边界动态调整的情景优化系列 (JSWC, 2018; JoH, 2023; PPG, 2021)

从BMP实施时间角度，考虑逐步投资约束，将情景优化从空间维扩展到时空维 (WRR, 2023; WARM, 2026)

3）如何有效辅助决策制定?

从易用化角度，设计研发参与式流域规划系统 (JEM, 2023)

- 智能化方法研究展望：领域知识驱动、大语言模型赋能

Qin, C.-Z., **Zhu, L.-J.***, Zhu, A.-X., **2025**. Position paper: Domain knowledge-driven intelligentization of watershed modeling and scenario analysis for precise watershed management. ***Information Geography***, 1(1): 100016.

敬请批评指正！

zlj@lreis.ac.cn

https://zhulj.net

https://people.ucas.edu.cn/~ljzhu

开源代码: ***https://github.com/crazyzlj***

https://github.com/lreis2415