

青年地学论坛，南京大学仙林校区，2018年10月26~29日

以坡位为空间配置单元的 流域管理措施情景优化

秦承志

中国科学院地理科学与资源研究所
资源与环境信息系统国家重点实验室

2018年10月28日

内 容

- 1 研究背景与科学问题的提出
- 2 基本思路
- 3 方法设计
- 4 应用案例
- 5 小结

1、研究背景

➤ 流域最佳管理措施 (Beneficial Management Practice, BMP)

- 为了防治水土流失、控制和削减非点源污染、保护流域生态环境而采取的一系列工程或生物措施 (Gitau et al. 2004; Turpin et al. 2005; Arabi et al. 2006; Panagopoulos et al. 2012)

➤ BMP情景

- 不同BMP情景具有不同的环境和经济效益



封禁



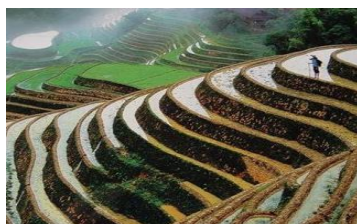
等高植物篱



草地过滤带



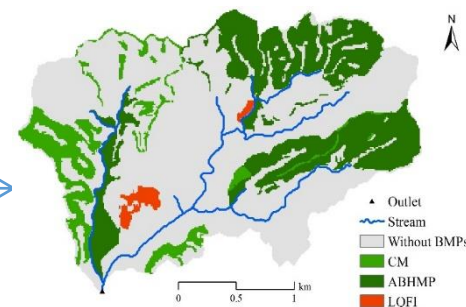
乔-灌-草混合种植



梯田



河岸缓冲带



BMP情景
(不同BMP在流域中空间单元上的配置)

➤ 如何为流域管理规划最优BMP情景?

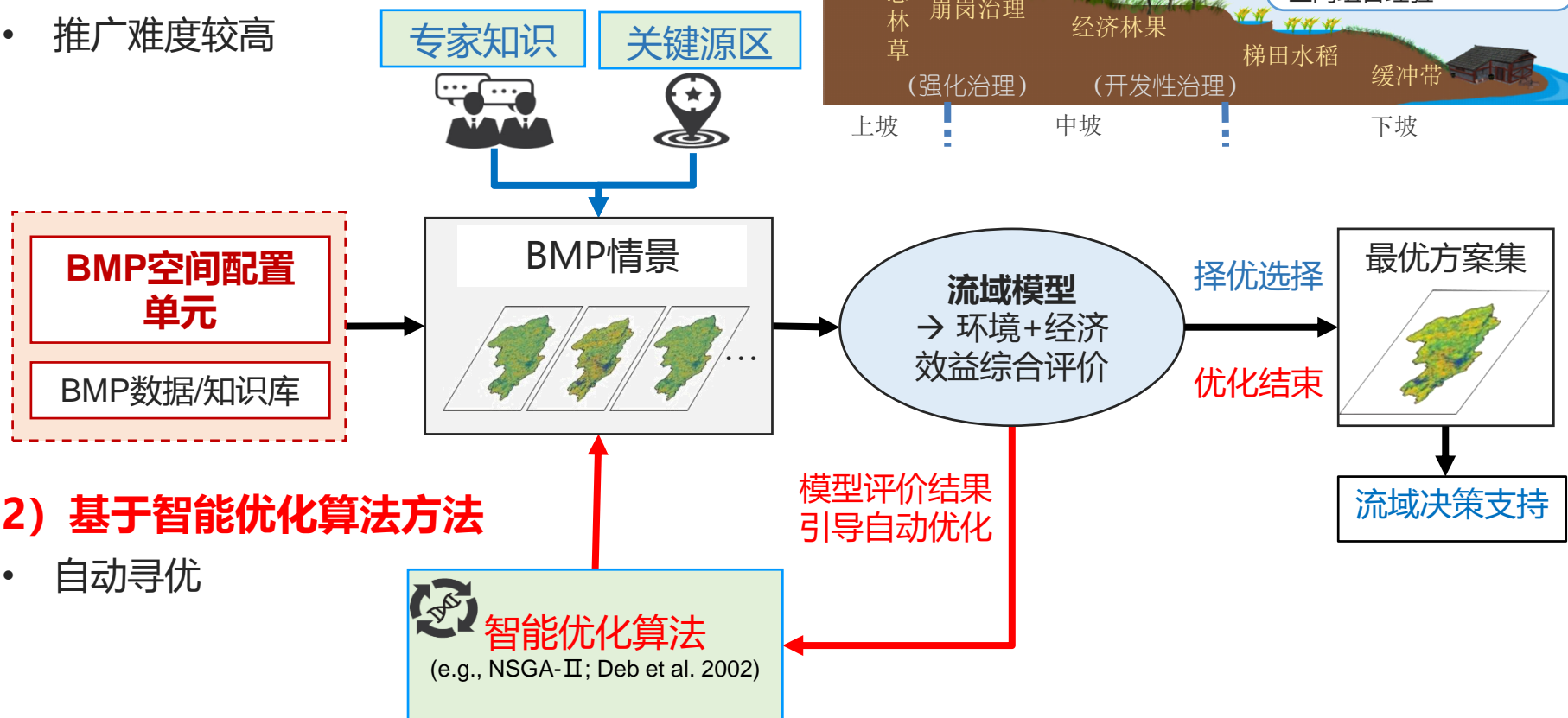
- BMP情景的大规模实地实验不现实 ➔ **基于流域过程模型的BMP情景分析方法**

基于流域模型的BMP情景分析方法

➤ 两类BMP情景分析方法

1) 基于专家知识和关键源区识别方法

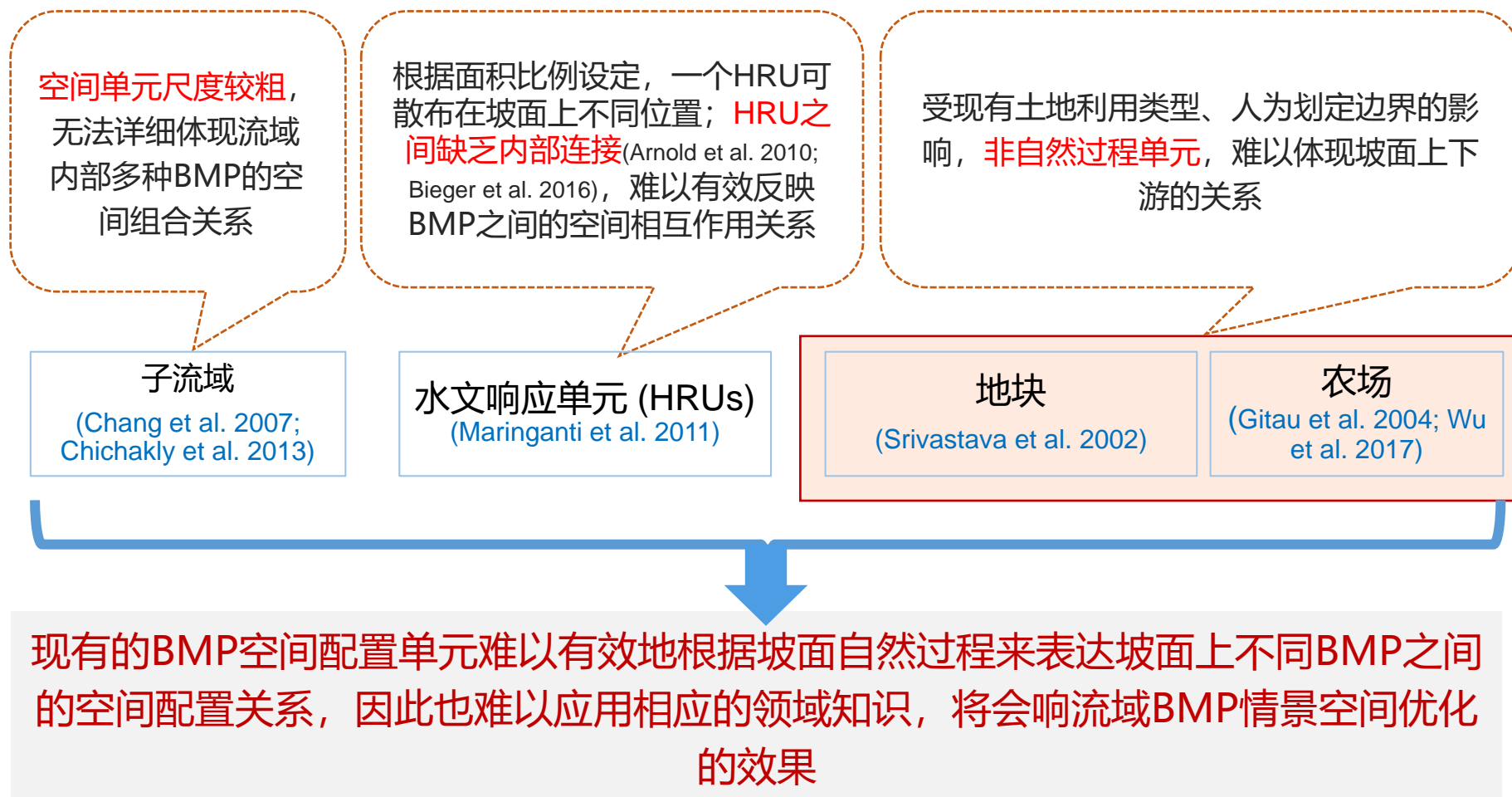
- 用户需对流域特点及BMP有较深理解、丰富的经验
- 推广难度较高



2) 基于智能优化算法方法

- 自动寻优

已有方法中常用的BMP空间配置单元



本研究针对的科学问题

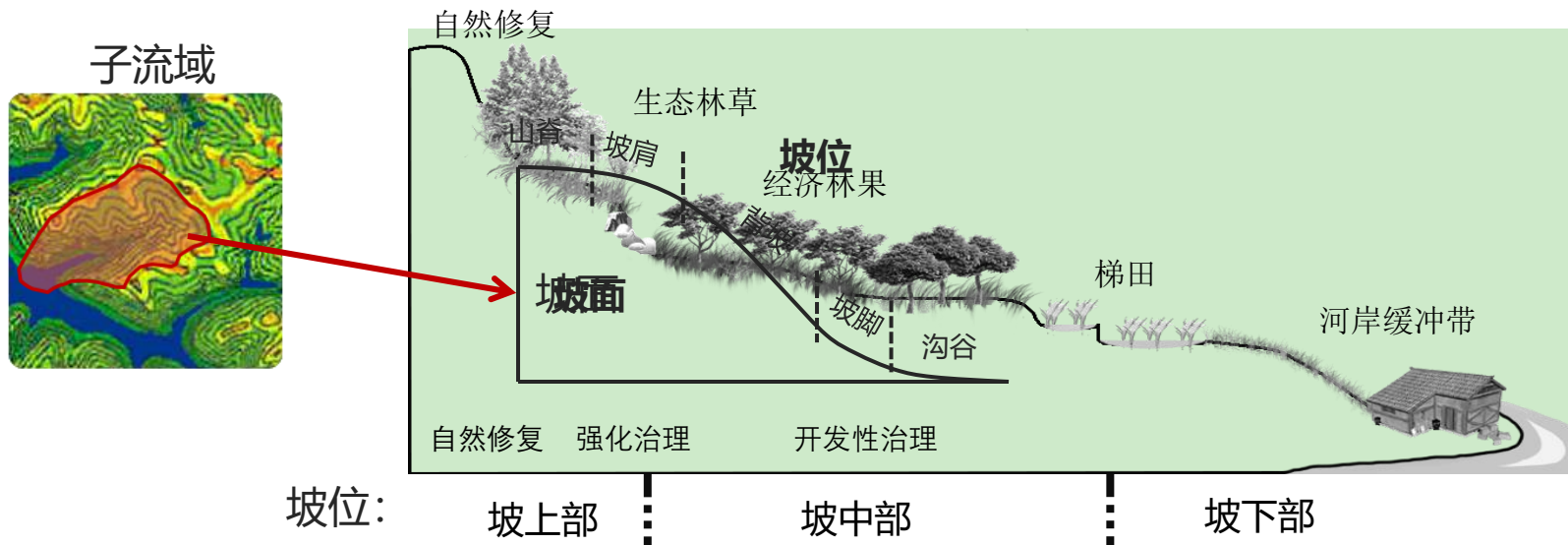
在基于流域过程模型的BMP情景分析中，如何选取适当的BMP空间配置单元，以有效地根据坡面自然过程表达BMP空间配置关系、应用相应的BMP空间配置关系知识



2. 基本思路

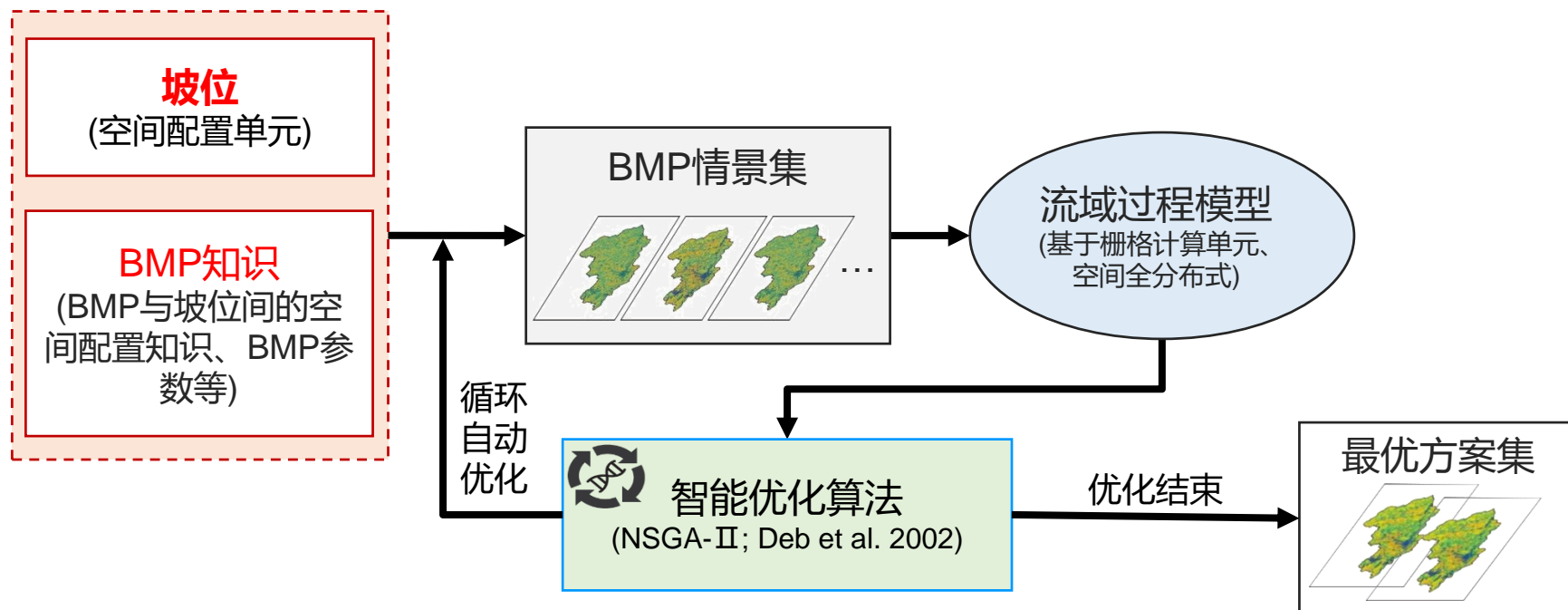
坡位 (如山脊、背坡、沟谷)作为BMP空间配置单元

- 是坡面地形部位的基本地形单元，不同坡位的空间组合形成完整的坡面；
- 是坡面过程的综合体现，从自然地理角度（地貌、土壤、水文等）可视为均一功能单元，影响坡面过程（如坡面产流、土壤侵蚀；Mudgal et al. 2010），进而影响BMP的有效性 (Bosch et al. 2012; Hernandez-Santana et al. 2013);
- BMP配置中应同时考虑BMP和坡位的特征(Berry et al. 2005; Goddard 2005; Pennock 2005; Mudgal et al. 2010).



例：流域水土保持综合治理模式（蔡强国等，2012）

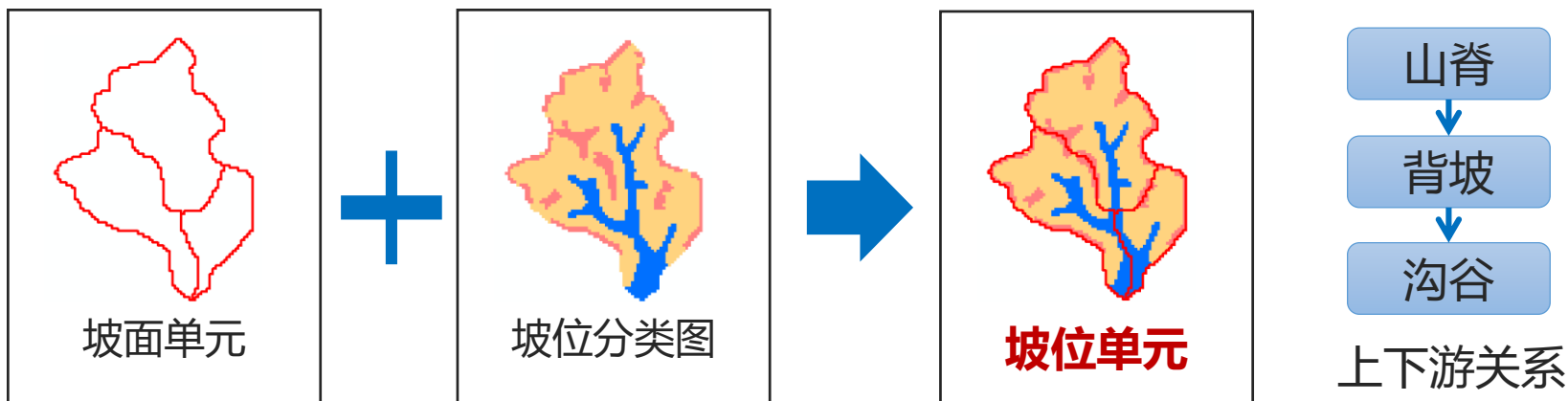
3. 以坡位为空间配置单元的流域BMP空间优化方法



- 方法具体设计中关键之处:
 - 1) 划分坡位单元;
 - 2) 对BMP与坡位间空间关系知识的形式化表达和应用

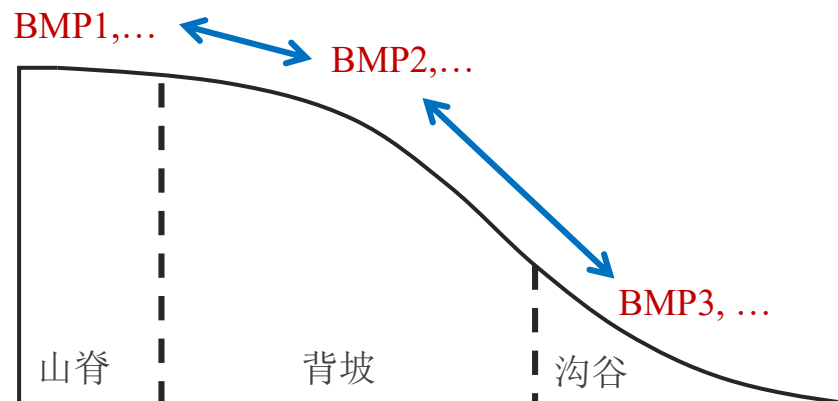
1) 坡位单元划分

- 采用山脊、背坡和沟谷三类坡位分类 (Arnold et al. 2010)
- 以数字地形分析方法提取坡位单元 (Qin et al. 2009; Zhu et al. 2018)
- 保证不同级别空间单元间的层次关系：子流域-坡面-坡位



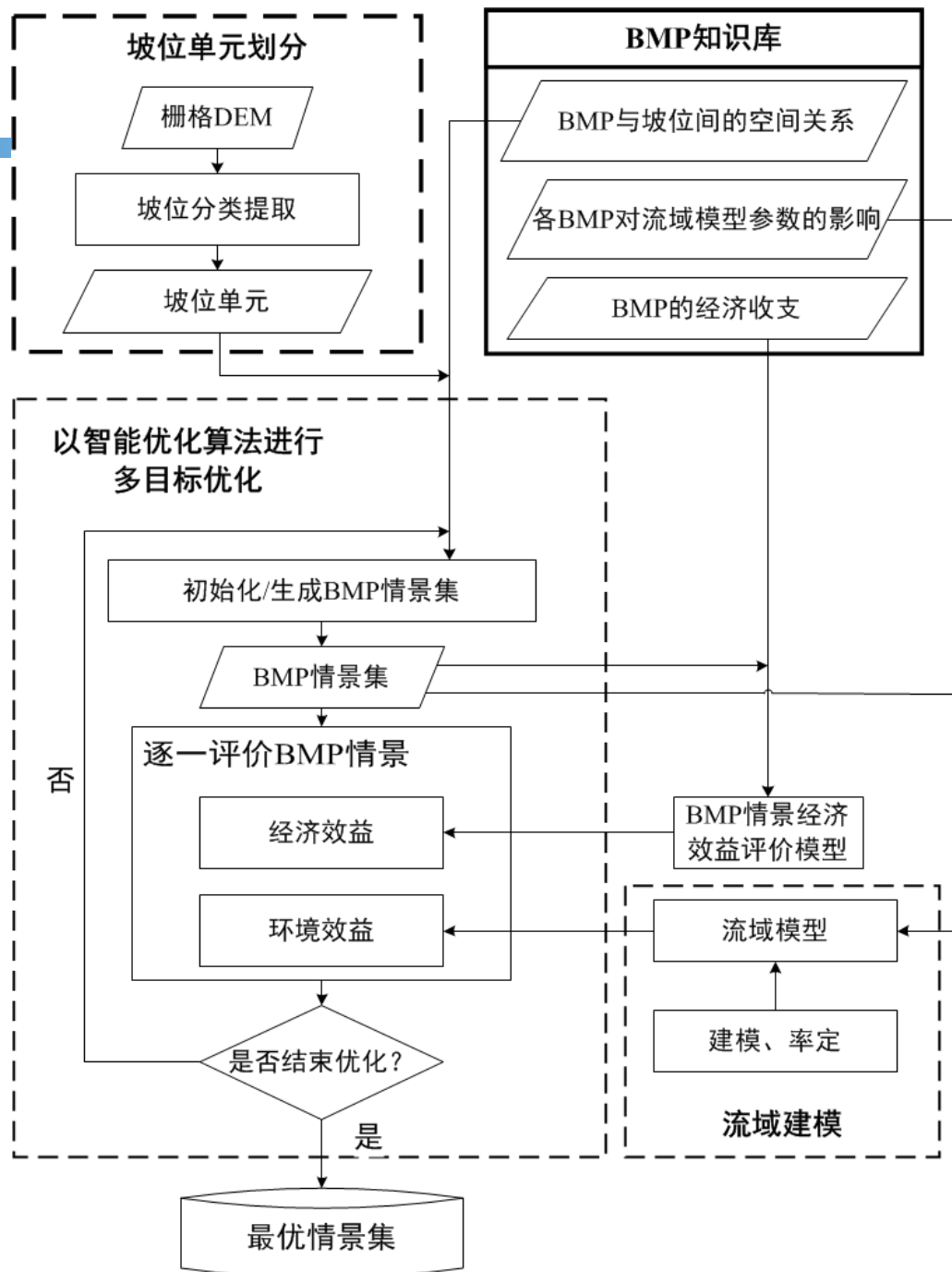
2) BMP和坡位间空间关系知识的形式化表达

- BMP和坡面上具有上下游关系的坡位之间的空间关系知识:



- (1) 某类坡位单元上适合配置何种BMP;
- (2) 坡面上具有上下游关系的坡位间配置BMP的空间约束关系
 - 领域知识/当地的治理经验知识 → 形式化规则

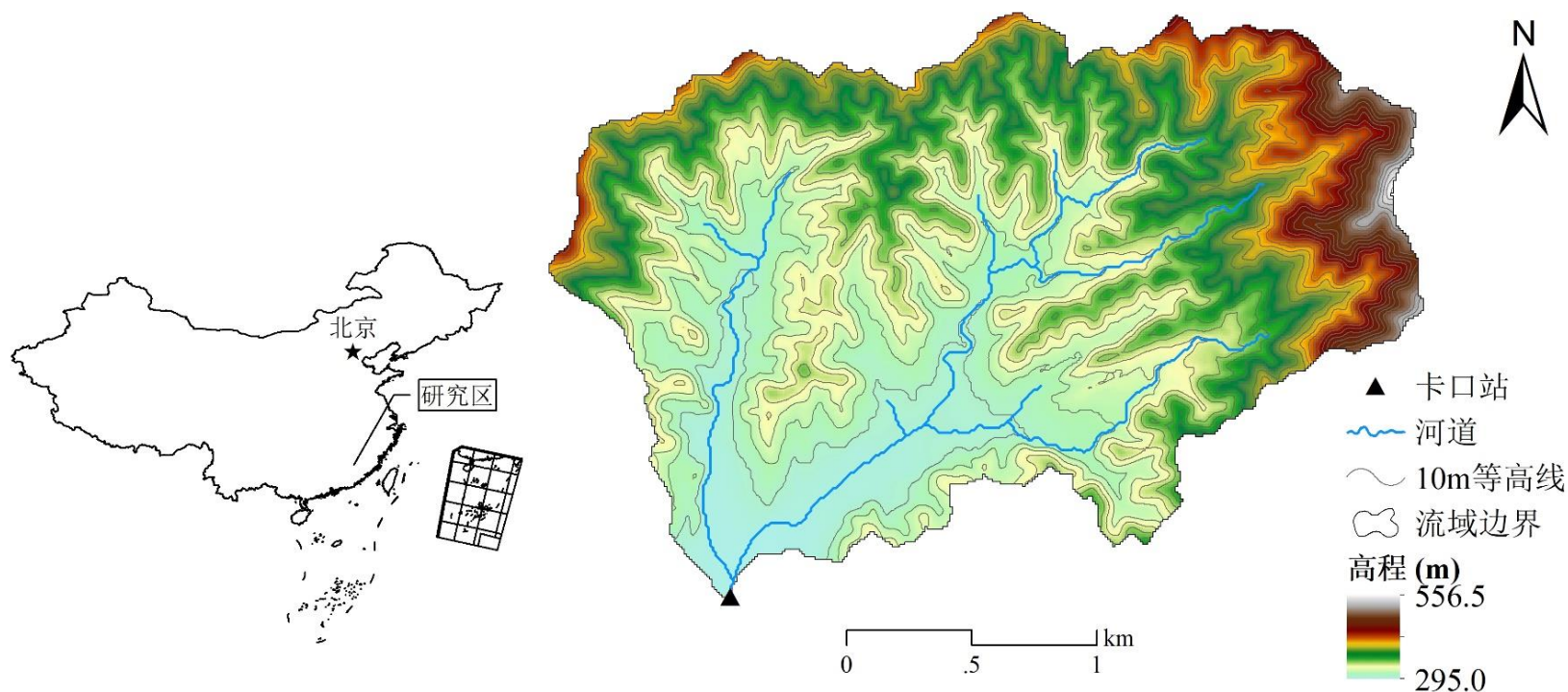
新建方法的框图



4. 应用案例：削减土壤侵蚀的BMP情景优化

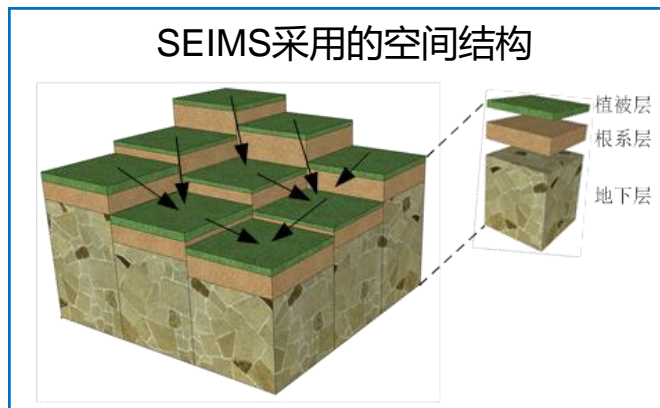
1) 研究区：福建省长汀县河田镇东部的游屋圳小流域 (~5.39 km²)

- 属汀江上游朱溪河流域，南方红壤区，土壤侵蚀严重，朱溪河流域内水土流失重点治理区域；
- 海拔295.0m~556.5m；平均坡度16.8°；低山、陡坡，较宽的冲积河谷；
- 中亚热带季风性湿润气候；年均温18.3 °C；年均降雨量1697.0 mm；降雨量集中、强度大，3~8月降雨量约占全年75% (陈志彪等，2013)；
- 主要土地利用类型：林地 (59.8%)、水田 (20.6%)、果园 (12.8%)



2) 空间全分布式流域过程建模

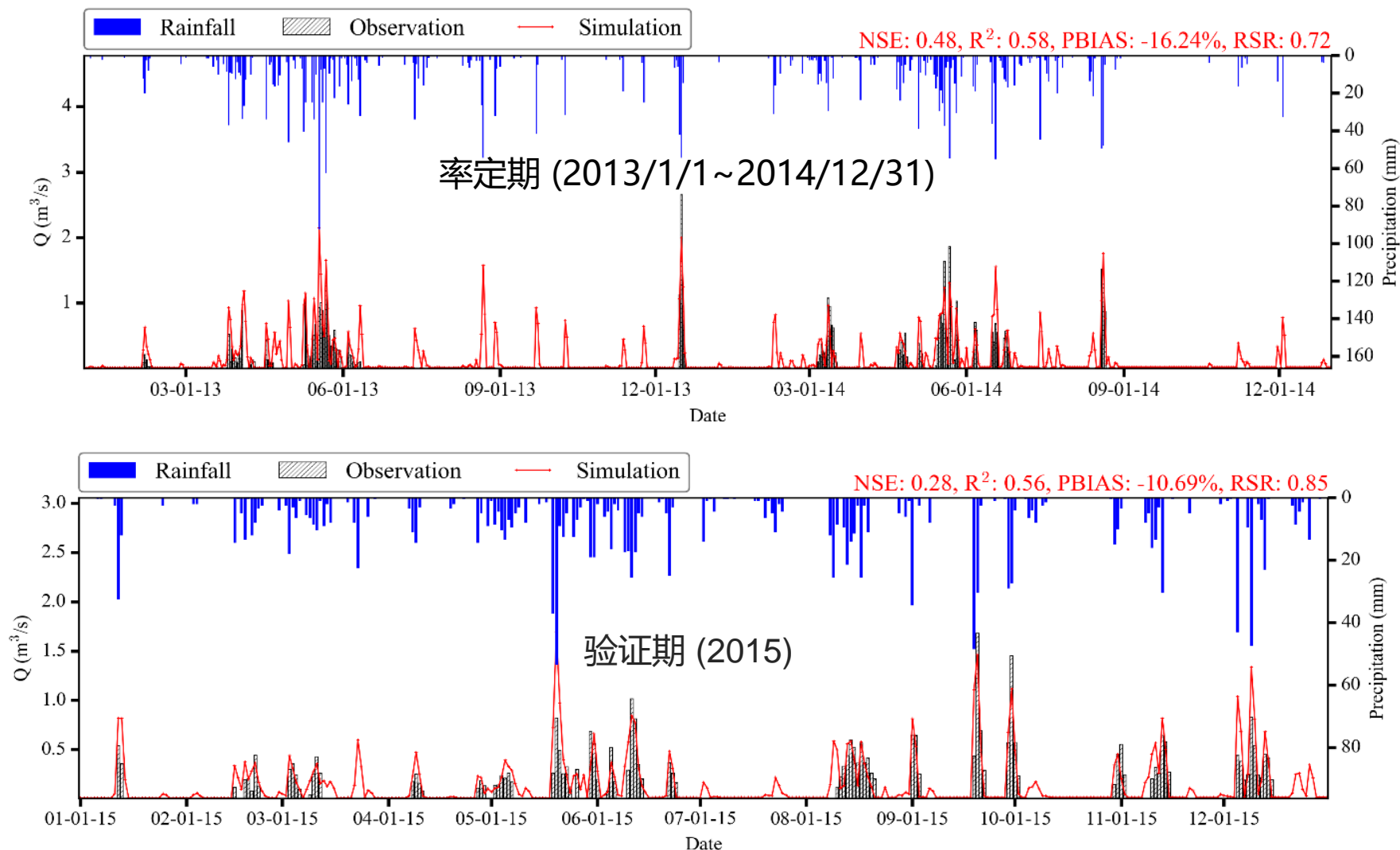
- 基于栅格计算单元的空间全分布式流域模拟并行计算框架SEIMS (Spatially Explicit Integrated Modeling System) (Liu et al. 2014, 2016)
 - 可灵活耦合多种流域过程模块;
 - 可模拟长期流域过程 (水文、土壤侵蚀、植物生长...)



子过程	模块算法
截留	最大冠层容量法 (Aston 1979)
填洼	经验公式 (Linsley et al. 1975)
产流/入渗	a modified coefficient method in WetSpa (Liu 2004)
潜在蒸散发	Priestley-Taylor equation (Priestley & Taylor 1972)
渗漏	SWAT中的方法 (Neitsch et al. 2011)
壤中流	Darcy定律和运动波近似 (Liu et al. 2004)
地下水	线性水库法 (Liu et al. 2004)
坡面汇流	扩散迁移法 (Liu et al. 2003)
河道汇流	马斯京根法 (Cunge 1969)
坡面侵蚀	MUSLE (Williams 1975)
河道侵蚀与输移	A simplified Bagnold stream power equation (Williams 1980)
植物生长过程	修改自SWAT模型 (Williams 1995)

数据	分辨率
DEM	10 m
土地利用	10 m (陈志彪等, 2013)
土壤	1:50,000 (陈志彪等, 2013)
气象、降雨	日

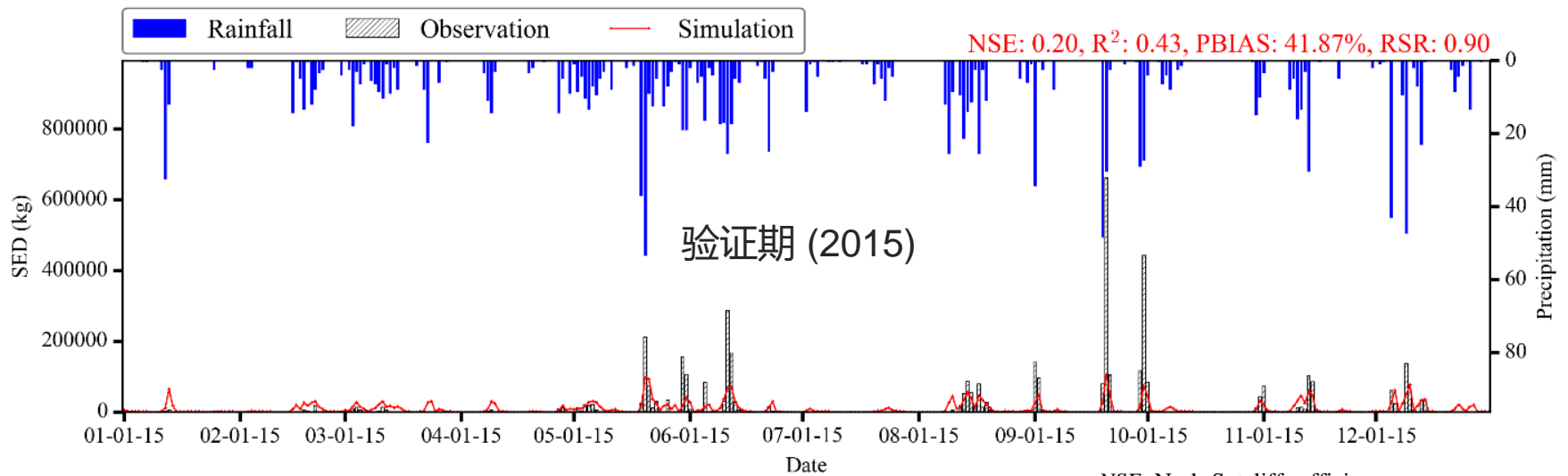
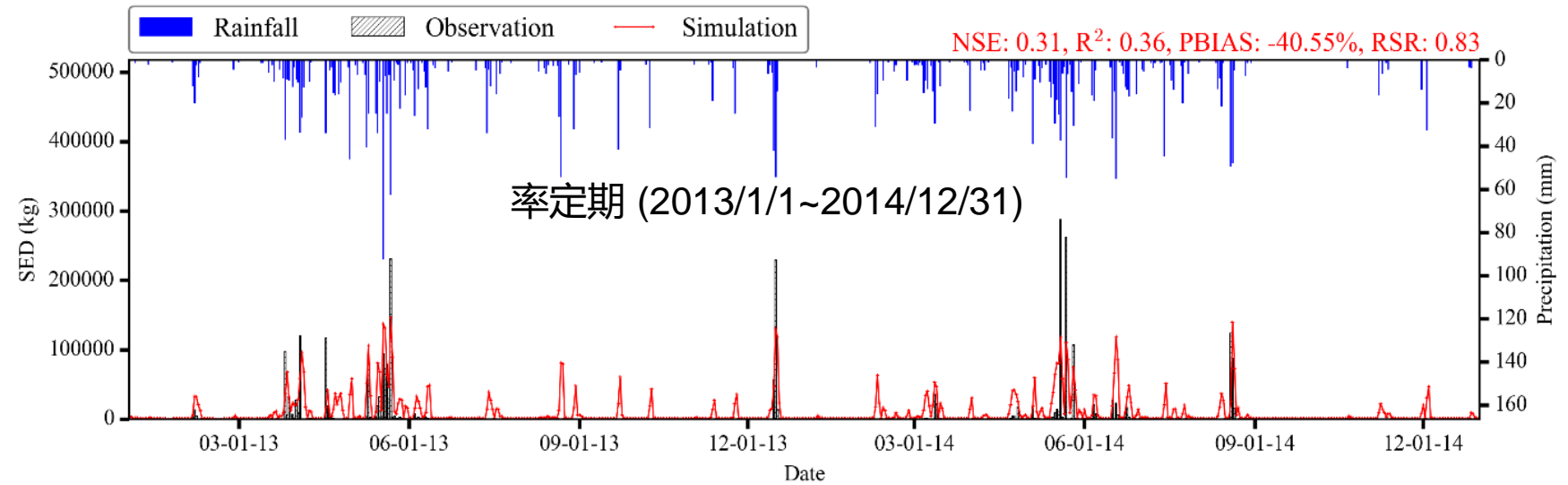
流域出口的模拟径流 (m^3/s)



- 2013~2015径流和产沙量监测数据由长汀水保局提供

NSE : Nash-Sutcliffe efficiency
 $PBIAS$: percent bias
 RSR : root mean square error-standard deviation ratio

流域出口的模拟产沙量 (kg)



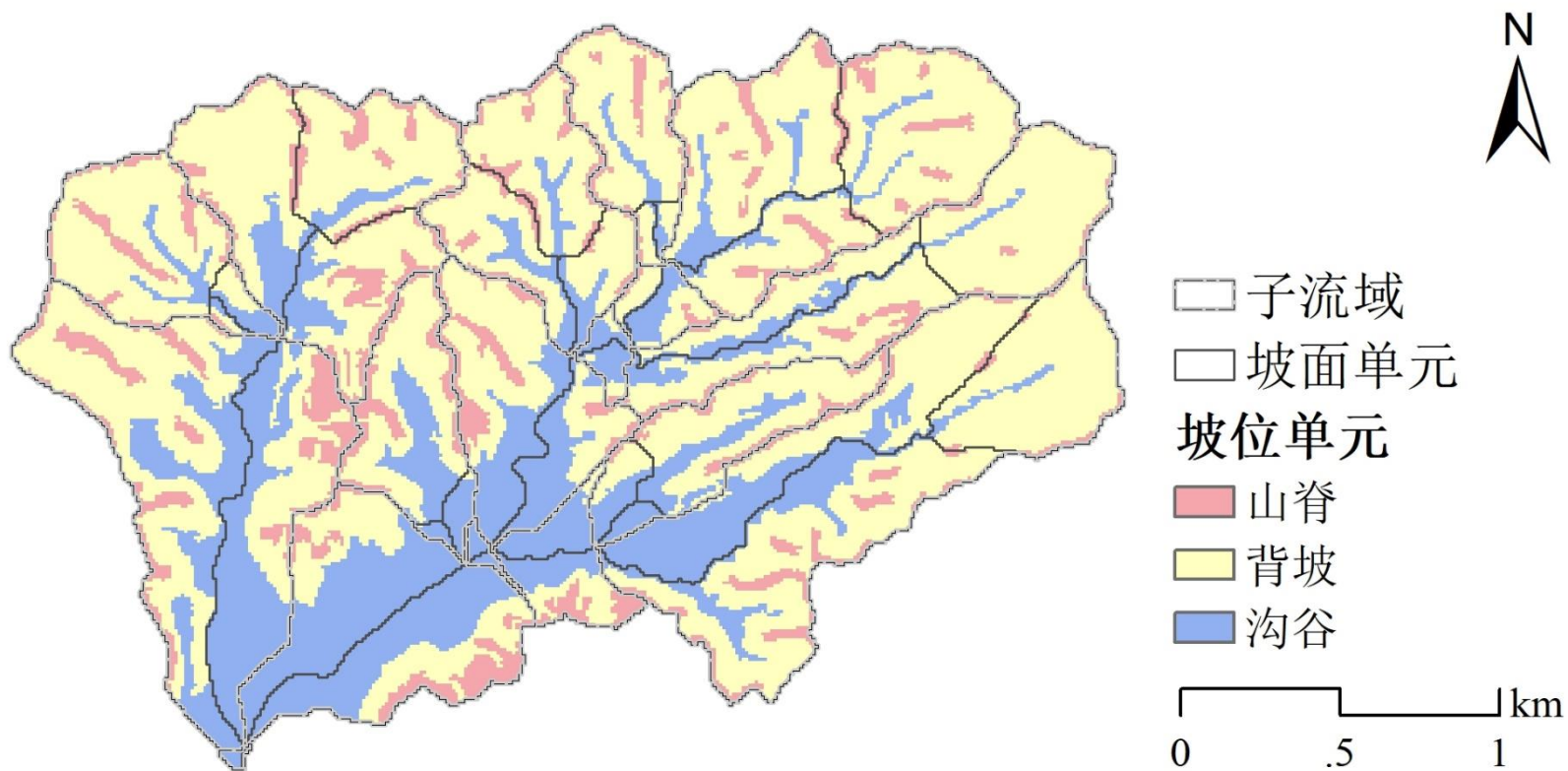
NSE: Nash-Sutcliffe efficiency

PBIAS: percent bias

RSR: root mean square error-standard deviation ratio

3) 坡位单元划分结果

- 研究区划分为17个子流域、35个坡面单元、105个坡位单元



4) 研究区BMP及空间配置知识

- 研究区4种BMP

(陈志彪等, 2013; Chen等, 2017)

BMP	描述	综合效益等级
封禁 (CM)	通过封山育林, 消除人为干扰 (如伐木、放牧), 使植被自然恢复。适用于轻度水土流失的 山脊和上坡 部位。	3
生态林草 (ABHMP)	在侵蚀严重地区, 通过工程措施 (如条沟) 和混合施肥, 进行乔 (如木荷、枫香) 灌 (如胡枝子) 草 (如宽叶雀稗) 混交。适用于 全坡面 部位。	5
低效林改造 (LQFI)	利用树冠投影上坡位置的施肥穴 (40 cm×30 cm×30 cm) 进行抚育施肥, 以改善立地条件, 促进马尾松林木的生长。适用于 上坡和陡背坡 部位。	4
经济林果 (OI)	在水肥条件良好的 中下坡 部位, 修建水平梯田、排水沟、灌溉设施和道路等, 种植经济林果 (如板栗、杨梅), 果园内套种草和豆科植物。	4

(综合效益等级(1~5): 等级值越大表示土壤侵蚀削减效益越高)

- BMP和坡面上具有上下游关系坡位之间的空间关系

- 当地治理经验 (陈志彪等, 2013) → 规则: 背坡上所配置BMP的综合效益等级应**不低于**山脊上所配置BMP综合效益等级

如, 同一坡面上山脊-背坡允许的BMP配置组合可以是ABHMP-ABHMP, CM-ABHMP, CM-CM; 而不能是ABHMP-CM (因为CM的综合效益等级3低于ABHMP的综合效益等级5)

研究区BMP环境与经济效益数据

• BMP配置完成后环境效益

- BMP在流域模型中表达为水文、土壤侵蚀过程相关主要参数（土壤属性、USLE因子）的相对变化率 (Wu et al. 2017)

(陈志彪等, 2013; 长汀水保局《2010年长汀县水土流失检测报告》)

BMP	有机质	容重	总孔隙度	水力传导率	USLE_K	USLE_P
封禁	1.22	0.98	1.02	0.81	1.01	0.90
生态林草	1.45	0.93	1.07	1.81	0.82	0.50
低效林改造	1.05	0.87	1.13	1.71	0.81	0.50
经济林果	2.05	0.96	1.03	1.63	0.88	0.75

• BMP的经济收支

BMP	实施费用	年维护费用	年收益
封禁 (CM)	15.5	1.5	2.0
乔灌草混交的生态林草措施 (ABHMP)	87.5	1.5	6.9
低效林改造 (LQFI)	45.5	1.5	3.9
经济林果 (OI)	420	20	60.3

(单位: 10,000 元/km²; 王学强, 2008)

5) BMP情景优化

• 优化目标:

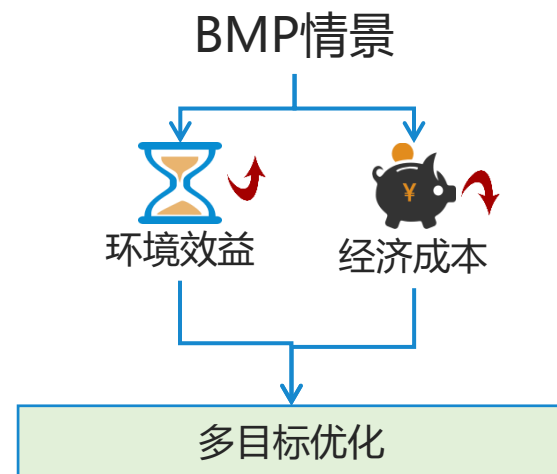
(1) 土壤侵蚀削减率最大化

- 相比于基线情景 (即模型率定时的情景)

(2) BMP综合经济成本最小化

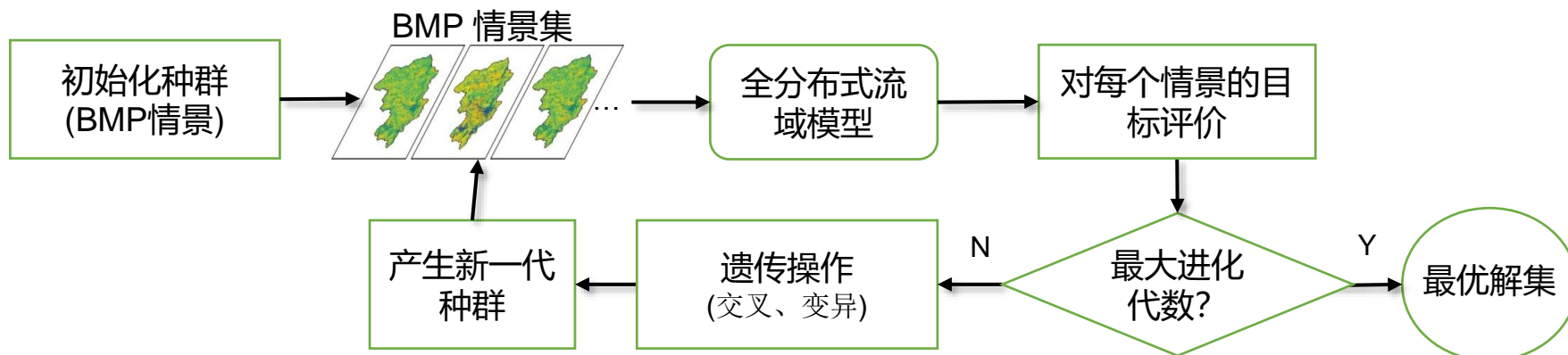
$$g(X) = \sum_{i=1}^n A(x_i) \times \left\{ \left[C(x_i) + yr \times (M(x_i) - B(x_i)) \right] \right\}$$

其中, $A(x_i)$ – BMP面积; $C(x_i)$, $M(x_i)$, $B(x_i)$ 分别为初始实施经济投入、年度维护经济投入、年度收益的单位面积值。



NSGA-II (带精英策略的非支配排序遗传算法 Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II; Deb et al., 2002)

- 所产生的BMP情景需符合BMP和坡位间的空间关系知识
- 一个BMP情景是种群中的一个个体, 表达为一个由基因构成的染色体 (即每个BMP空间配置单元上配置某种BMP或不配置任何BMP)



6) 对比实验设计

□ 新方法 vs. “随机配置方法”

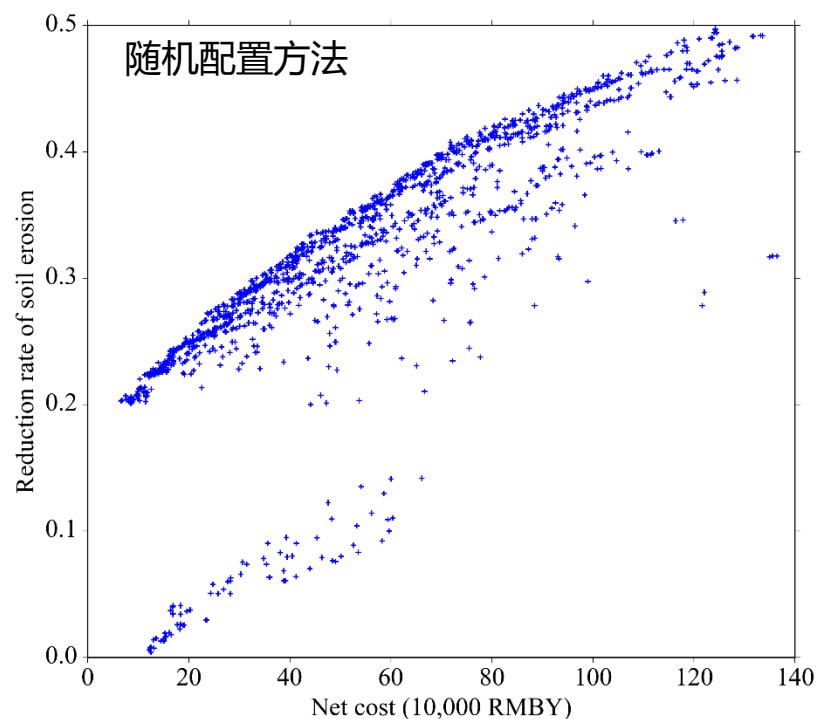
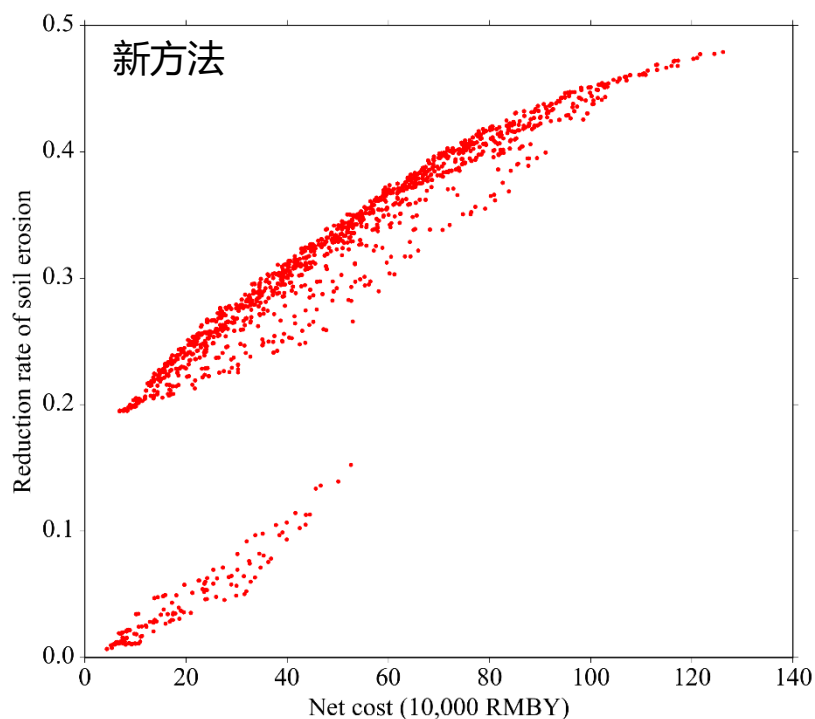
- 随机配置方法：初始化和生成情景时在空间配置单元上完全随机配置BMP的传统方法（如Arabi等，2006）
- 其它设置相同
 - ✓ 流域模型
 - ✓ BMP空间配置单元（坡位）
 - ✓ 模型中的BMP参数
 - ✓ NSGA-II参数：种群规模为60，个体数100；最大进化代数为100；交叉概率0.75；变异概率0.15
- 不同之处：新方法在空间优化时利用了BMP和坡位间的空间关系知识。

□ 评价近似Pareto最优解集的质量

- (1) 数学角度：各进化代数所得近似Pareto最优解集的收敛性和Pareto最优前沿（optimal front）的多样性；
- (2) 地理学角度：情景优化所得近似Pareto最优解的BMP空间配置合理性

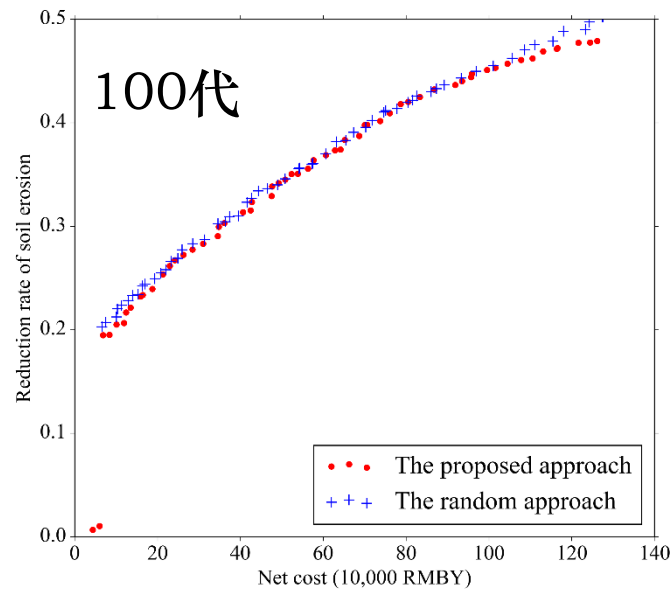
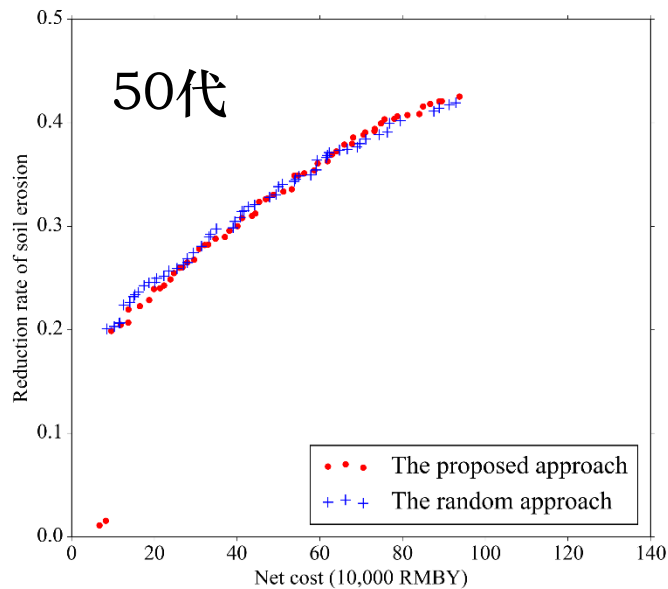
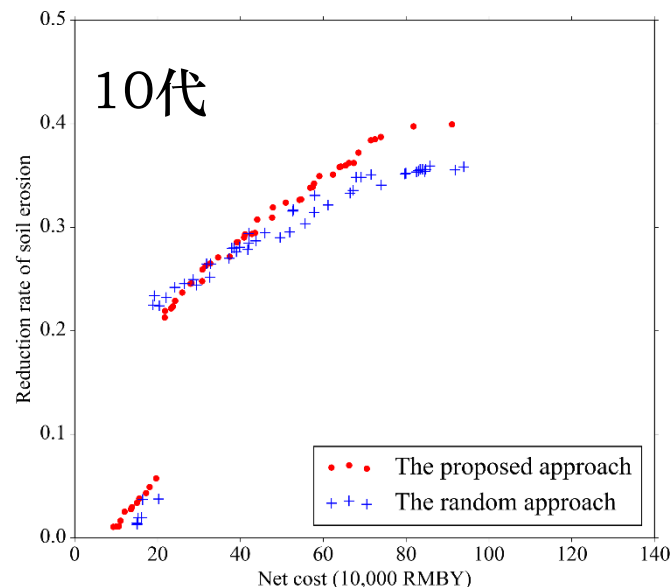
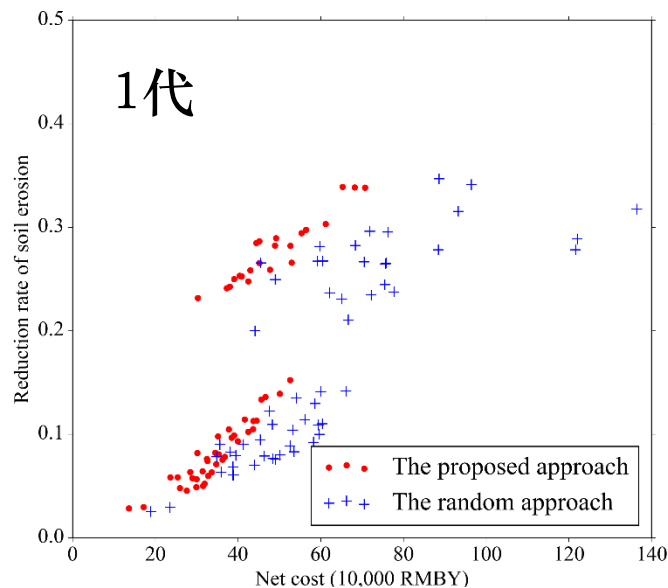
7) 结果与讨论

近似Pareto最优解集分布



- 与随机配置方法相比，新方法所得近似Pareto最优解更加集中，且Pareto最优前沿具有相似多样性
- 考虑了BMP与坡位空间关系后，新方法缩小了寻优解空间，加快了找到符合应用目标最优解的速度
 - 率定的流域模型对新方法应用时共评价了1476个BMP情景，对随机配置方法应用时共评价了1523个BMP情景

不同进化代数下的近似Pareto最优解集质量

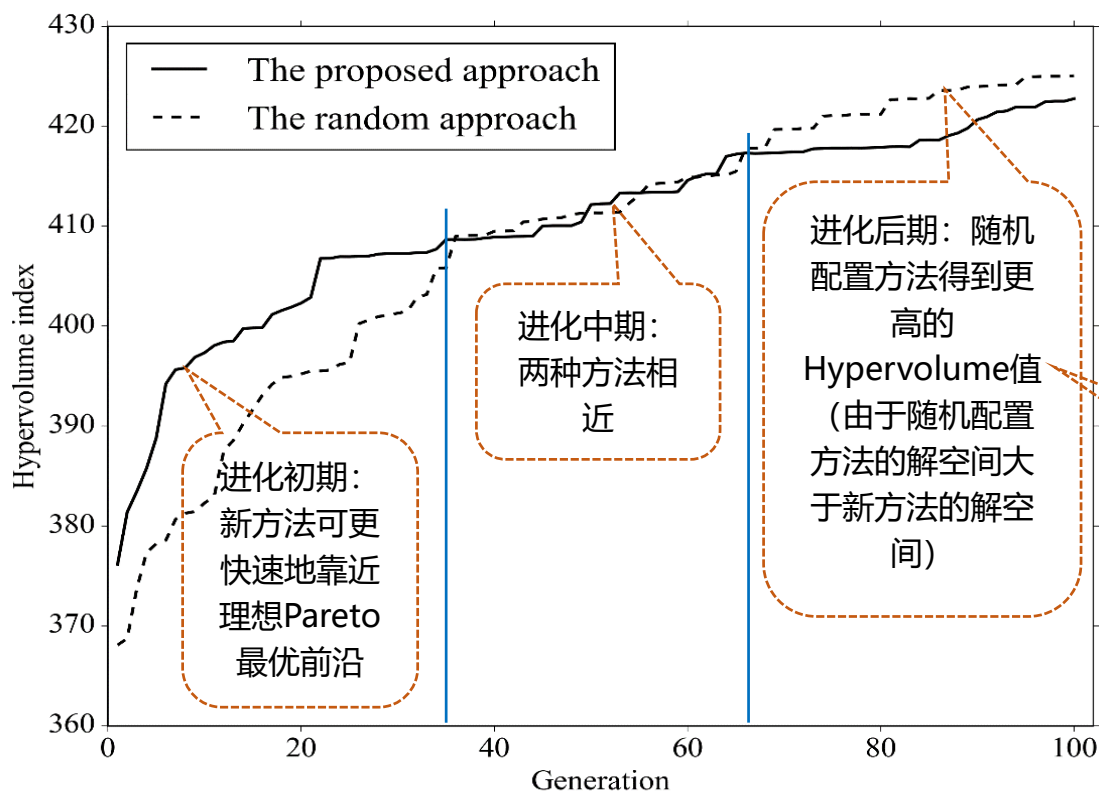


解空间 (Ω) : $\Omega_{\text{新方法}} \subseteq \Omega_{\text{随机配置方法}}$

不同进化代数下的近似Pareto最优解集质量

□ **Hypervolume指标值随进化代数的变化**: 对近似Pareto最优解集质量同时考虑收敛性和多样性的一个定量比较方式 (Zitzler et al. 2003)

- Hypervolume指标(Zitzler & Thiele 1999): 度量目标空间被一套近似Pareto最优解集所覆盖的面积, 值越大表明近似Pareto最优解集质量越好



✓ 优化过程中, 新方法可有效利用BMP与坡位的空间关系知识

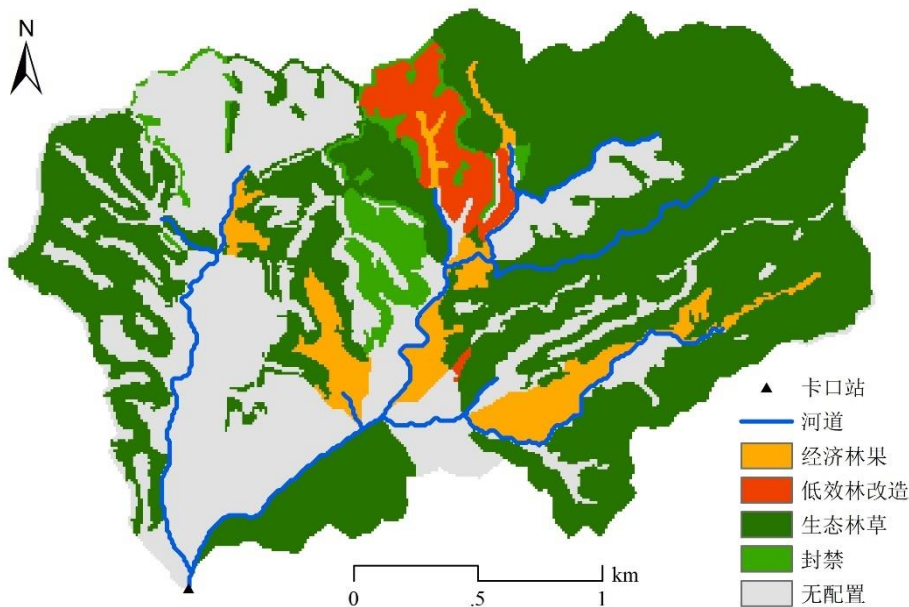
这些最优解对应的BMP空间配置在实际中合理吗?

* 计算hypervolume指标的参考点: (300, -1), 即经济效益3亿人民币、泥沙削减率为 -1

BMP情景优化结果（进化代数100代时）的空间配置合理性

新方法

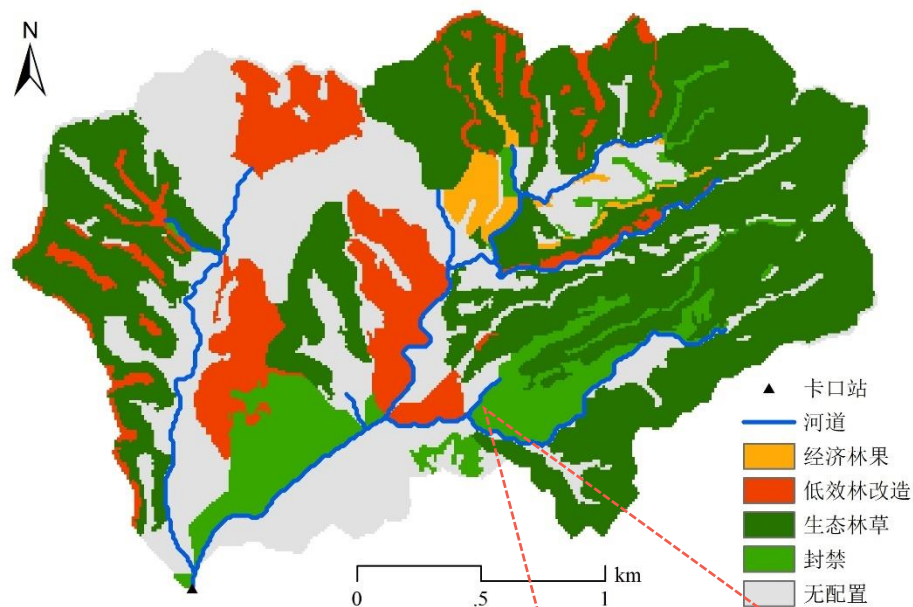
(经济效益为121.6万元, 侵蚀削减率为47.7%)



符合BMP和坡位间空间关系知识

随机配置方法

(经济效益为115.4万元, 侵蚀削减率为47.9%)



不符合当地实际治理经验
如：在山脊上不合理地配置了经济林果(OI)、在沟谷中不合理地封禁(CM)

- 新方法较随机配置方法可得到更实际的BMP最优情景

4、小结

- ❑ **科学问题**：在基于流域过程模型的BMP情景分析中，如何选取适当的BMP空间配置单元，以有效地根据坡面自然过程表达BMP空间配置关系、应用相应的BMP空间配置关系知识？
- ❑ **提出以坡位为空间配置单元，进行流域BMP情景优化**
- ❑ **建立了一套基于坡位单元的流域BMP空间优化方法**
 - 可有效体现BMP空间配置关系、应用相应的BMP空间配置关系知识
 - 案例结果表明：与随机配置方法相比，新方法能够快速、有效地获得可行性更高的管理措施空间配置优化方案
- ❑ **未来的扩展研究**
 - 其它流域过程模型（如SWAT+；Bieger et al., 2016）
 - 其它智能优化算法（如SPEA2；Zitzler et al., 2001）
 - 扩展的坡位分类系统（Qin et al. 2009; Zhu et al. 2018）
 - 不同研究区的BMP



敬请指正!

Qin C-Z, Gao H-R, Zhu L-J*, Zhu A-X, Liu J-Z, Wu H. Spatial optimization of watershed best management practices based on slope position units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(5): 504-517.

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

Liu J-Z, Zhu A-X*, Qin C-Z*, Wu H, Jiang J-C. A two-level parallelization method for distributed hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80: 175-184.

秦承志

Email: qincz@lreis.ac.cn

主页: <http://people.ucas.ac.cn/~qincz>

Code: <https://github.com/lreis2415/>



资源与环境信息系统国家重点实验室
State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System