

中国地理信息科学理论与方法学术年会，上海，2019年10月18-20日

流域最佳管理措施空间配置单元边界优化方法

朱良君

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

2019年10月20日

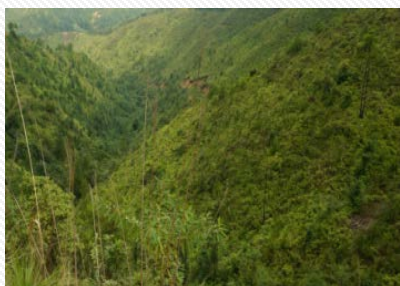
报告提纲

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

1 研究背景与科学问题

流域综合治理通常需要多种最佳管理措施（BMPs）在流域内的**空间组合配置**（蔡强国等, 2012; 毕华兴等; 2010）。

因而，在**什么空间位置**、以**多大面积**、配置**何种BMP**，是典型的**空间优化问题**（Qin等, 2018; Gaddis等, 2014; Perez-Pedini等, 2005; Srivastava等, 2002）。



封禁



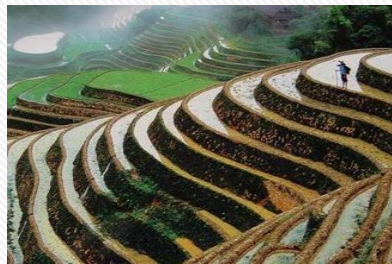
等高植物篱



草地过滤带



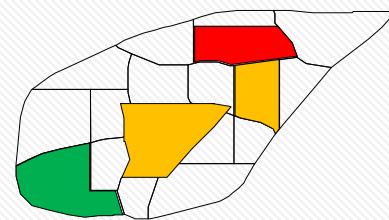
乔灌草混交



梯田



河岸缓冲区



多种BMPs在流域内的
空间组合 (BMP情景)

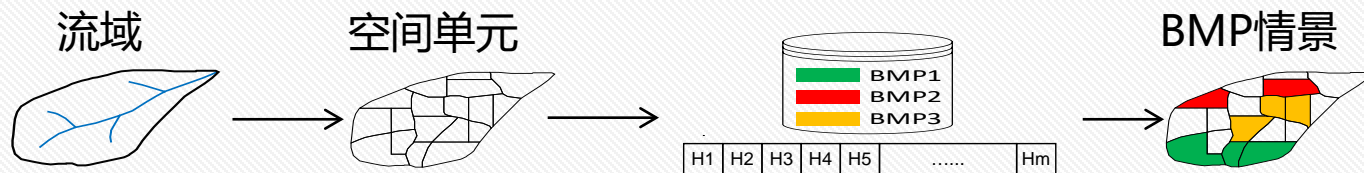
BMP情景空间优化问题

➤ 优化目标

- e.g., 以尽可能少的经济投入实现尽可能多的环境效益
- 单目标或多目标

➤ 地理决策变量

- 对应于在每个**空间单元**上配置何种BMP或不配置BMP的决策



➤ 限制条件

- 非空间限制条件, e.g., 最高预算、最低环境效益等
- **空间限制条件**, e.g., BMPs与空间位置间的关系、空间相邻BMPs间的交互影响以及空间单元的空间特征约束等

空间限制条件的表达与空间单元的选择密切相关, 是使该类优化问题成为空间优化问题且更具地学意义的关键!

空间限制条件及其对空间单元的要求

● BMPs与空间位置间的关系

- ✓ 通常表述为**适宜BMPs配置的空间位置**，可根据地形、土地利用、土壤及其他条件组合确定 (如Qin等, 2018; Yang和Best, 2015; Maringanti等, 2011)
- ✓ **不同BMPs对空间单元划分详略程度的要求不同**

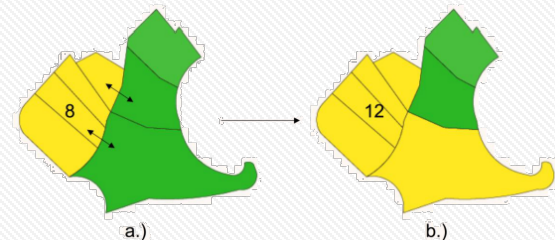
● 空间相邻BMPs间的交互影响

- ✓ 如空间相邻土地利用的互斥关系 (Ligmann-Zielinska等, 2008)、上下游空间单元上BMPs间的相互影响 (Qin等, 2018; Wu等, 2018) 等
- ✓ **空间单元应固有地具备空间邻接关系或空间拓扑关系 (如上下游关系)**

● 空间单元的空间特征约束

- ✓ 基本思路可概括为**利用基本空间单元形成较粗的单元 (如土地利用单元)** 并根据其空间特征约束 (如最大化紧凑度和连续性) **调整边界** (Fraley等, 2010; Church等, 2003)

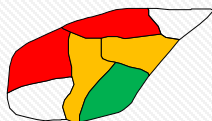
- ✓ **基本空间单元应足够精细，如栅格单元**



现有BMP空间配置单元



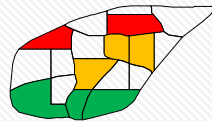
栅格
Gaddis等,
2014



子流域
Chichakly等,
2013



水文响应单元
Maringanti等,
2011



农场
Kalcic等,
2015



上下游关
系的地块
Wu等, 2018



坡位单元
Qin等, 2018

BMPs与空间
位置间的关系



空间相邻BMPs
间的交互影响



空间单元的空
间特征约束



极大加剧空间优化的
计算量, **仅适用于少
量栅格研究区内单一
BMP的空间优化**

过于粗略, 无
法体现子流域
内多种BMPs的
空间组合关系

非自然地理单元, 空
间划分易受土地利用、
土壤等影响, **边界固
化且不易调整**

**坡面地形部位的
基本地形单元**、
坡面过程在地形
上的综合体现

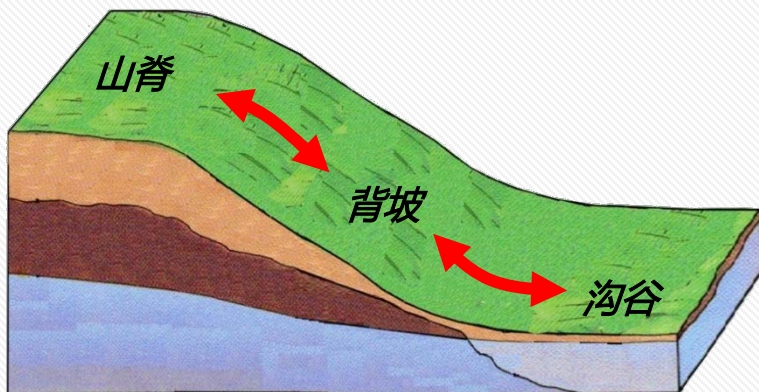
如何合理设计**坡位单元边界动态调整方法**，从而更加有效、高效地进行BMP情景空间优化？



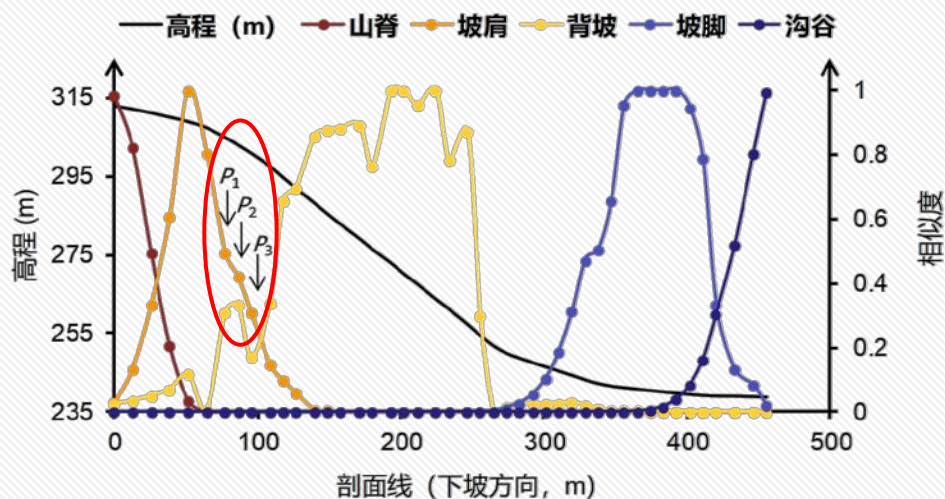
2 基本思路

坡位 (如山脊 [或山顶]、背坡 [或山坡]、沟谷)

- 普遍具有**空间渐变**、**边界模糊**的特点 (Qin等, 2009; MacMillan等, 2000)
- **模糊坡位**为空间任一位置对各坡位的模糊隶属度 (或相似度)
- 同一坡面上相邻两类坡位的**过渡位置对任一坡位的相似度均较低**——划为任一类坡位均具合理性



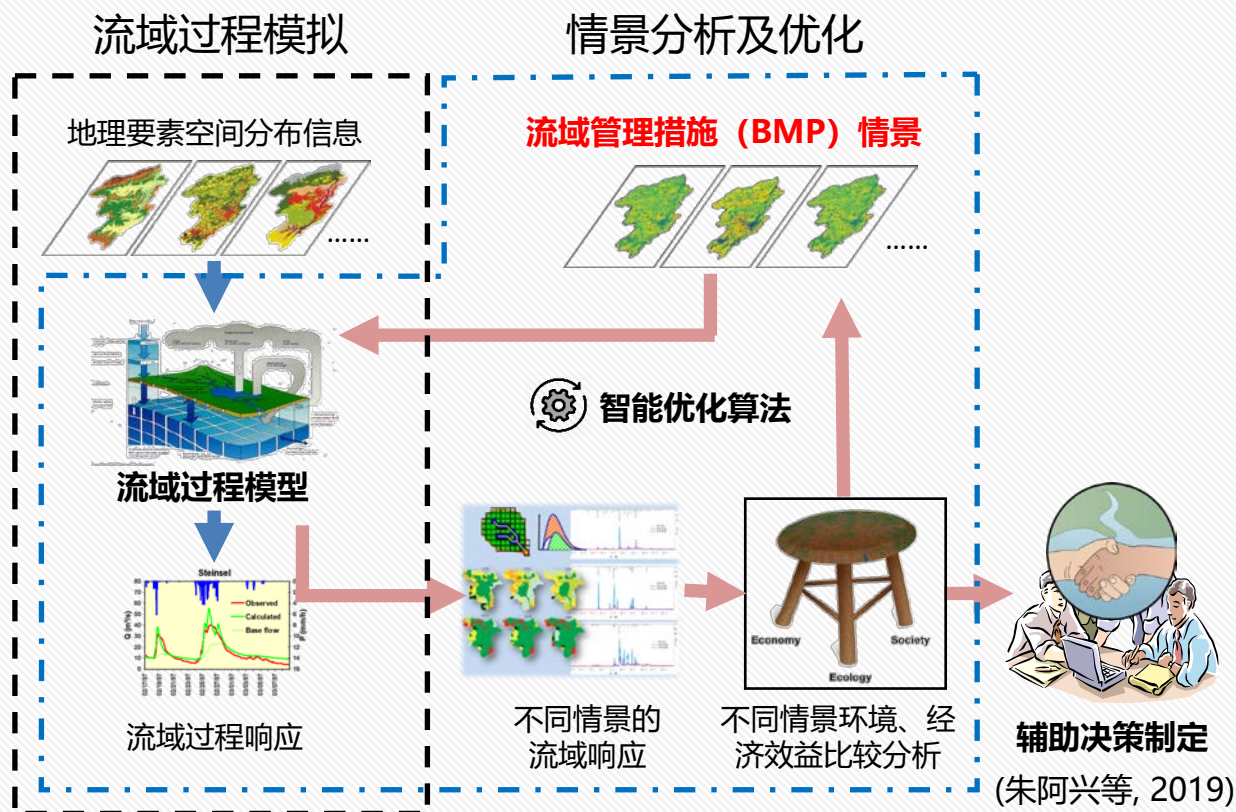
自然界中的坡位渐变特征



坡面上某剖面线的5类模糊坡位信息

3 方法设计

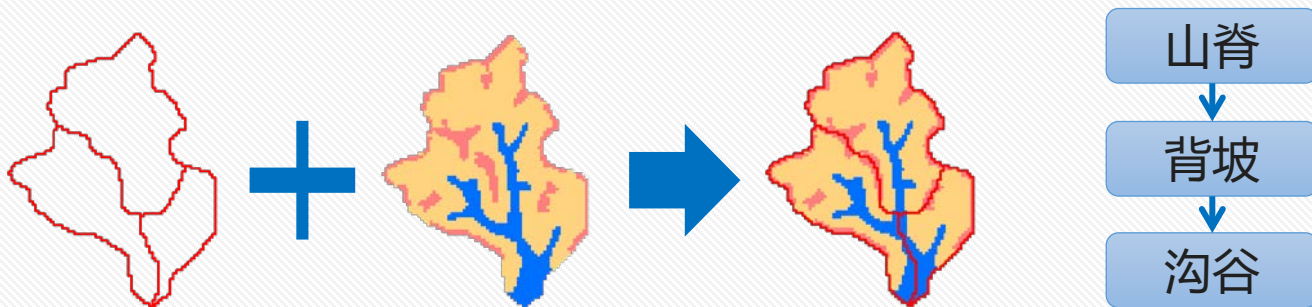
- 提出基于模糊坡位信息的BMP配置单元边界动态调整方法
- 在基于流域过程模拟和多目标优化算法的BMP情景优化框架中予以实现



基于模糊坡位的BMP空间配置单元

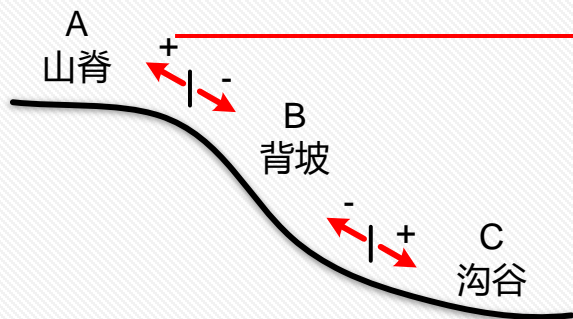
➤ 边界固定坡位单元的划分 (以3类坡位为例)

- 将坡面用作其内部一组坡位单元的空间范围约束
- 按**最大相似度原则**对模糊坡位进行“硬化”分类得到



➤ 动态阈值法实现坡位单元边界的动态调整

- 以背坡向山脊扩张为例:



$$S_{\text{沟谷}} < S_{\text{背坡}} < S_{\text{山脊}}$$

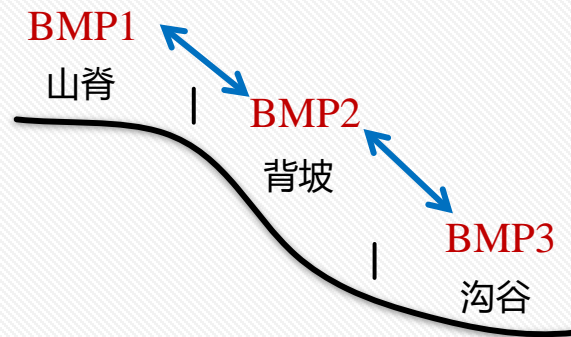
$$S_{\text{山脊}} - S_{\text{背坡}} < T$$

式中, S 为模糊坡位信息, T 为边界调整阈值

基于坡位单元边界优化的BMP情景优化方法

➤ 空间限制条件知识的总结

- BMP**适宜配置位置**知识 (土地利用、坡位类型)
- BMPs间**空间关系知识** (如下游坡位配置BMP的综合环境效益应**不低于**其上游坡位的配置)

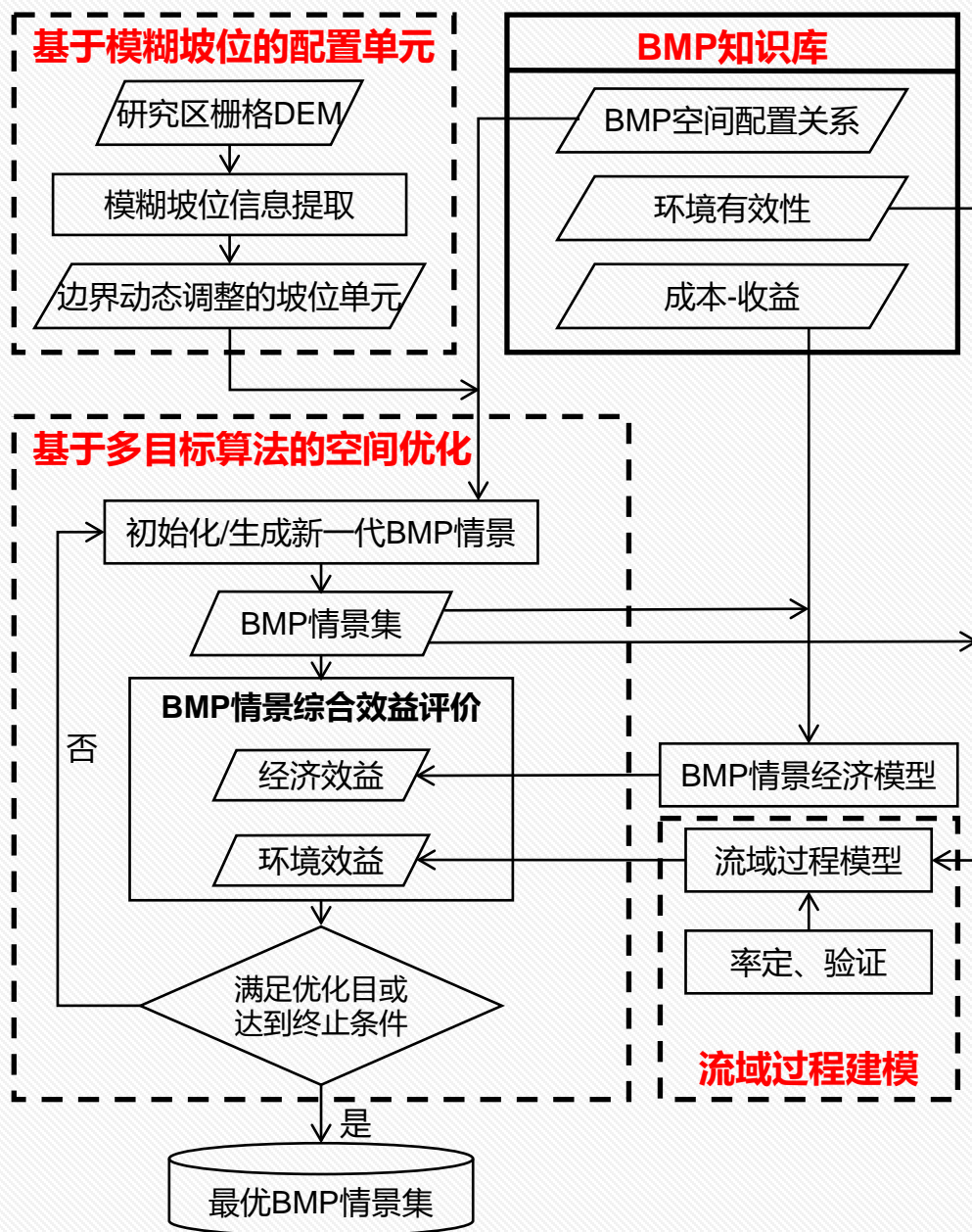


➤ 多目标优化算法的适配 (以NSGA-II为例)

- 遗传算法编码的设计 (地理决策变量)
 - BMPs编码
 - 边界调整阈值
- 空间限制条件的表达
 - BMP情景初始化
 - 生成新一代BMP情景 (交叉、变异操作)



方法框图

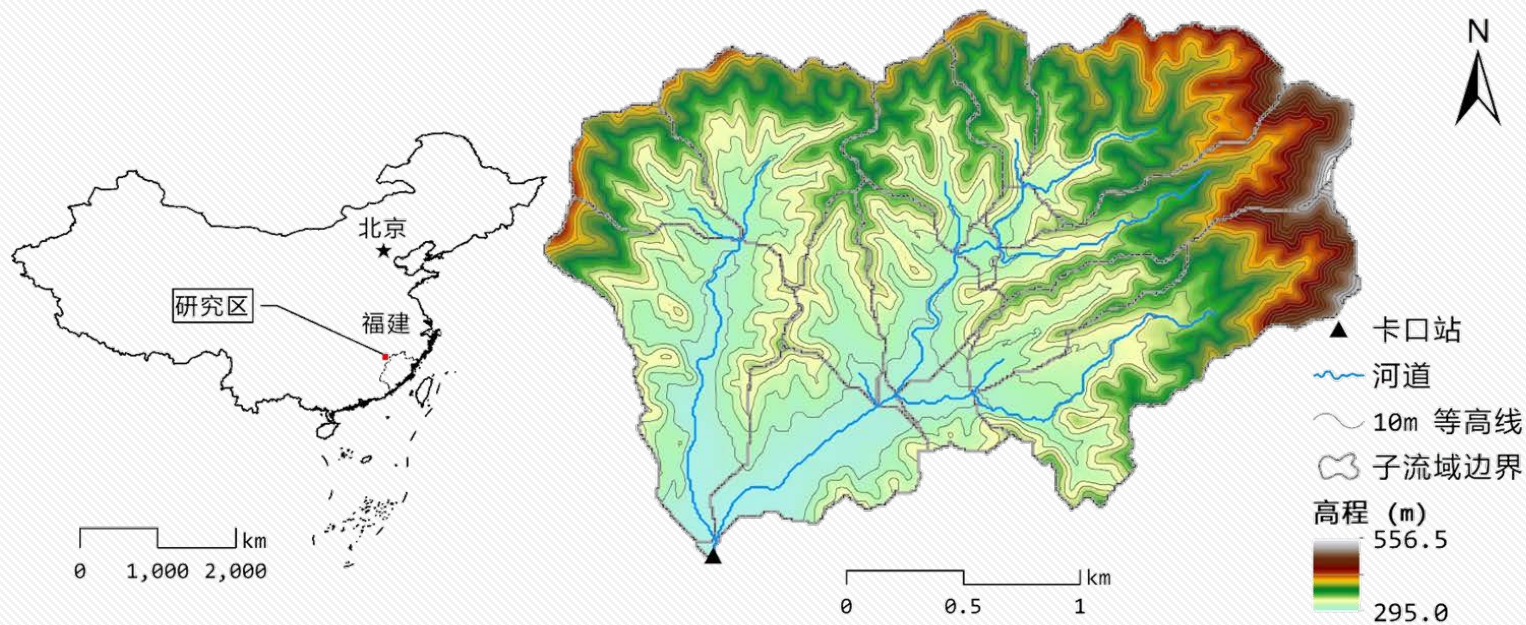


4 应用案例——削减土壤侵蚀的BMP情景优化

1) 研究区

福建省长汀县河田镇东部的**游屋圳小流域**，属于汀江上游朱溪河流域

- 面积约5.39 km²；平均坡度16.8°；海拔295 ~ 556 m
- 南方红壤**水土流失重点治理区域**



2) 流域过程建模

数据收集

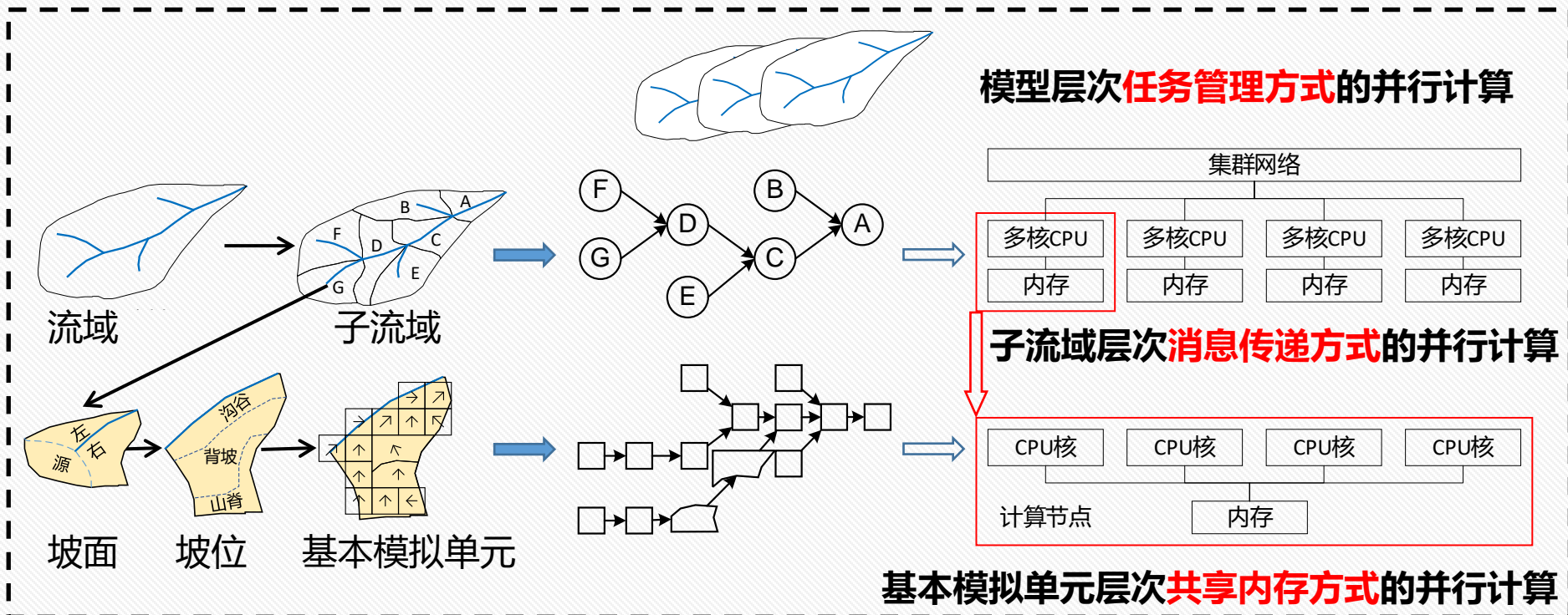
数据类型	数据内容	时间/空间分辨率
基础空间数据	DEM	10 m
	土地利用图及相关参数	10 m
	土壤类型图及理化性状数据	1:5 万 (重采样至10 m)
气象数据	降水 (河田站)	2012-2015年逐日
	气温、湿度、日照时数等 (长汀站)	2012-2015年逐日
水文观测数据	流域出口径流	2012-2015年逐日*
	流域出口泥沙	2012-2015年逐日*

*由于数据质量问题, 选取**连续3天以上降水且产流产沙**的流域出口径流和泥沙数据用于后续流域过程模型的率定与验证。

2) 流域过程建模

选用基于栅格的分布式流域过程建模框架SEIMS (Zhu等, 2019a; Liu等, 2014, 2016)

Spatially Explicit Integrated Modeling System; <https://github.com/lreis2415/SEIMS>



- **灵活:** 模块化结构支持多过程模拟算法的扩展
- **易用:** 近乎串行编程方式实现并行化流域过程模型的快速开发
- **高性能:** 多层次并行计算中间件支持高效率流域过程建模及应用

2) 流域过程建模

基于SEIMS构建日尺度流域过程模型

对游屋圳流域水文、土壤侵蚀、作物生长等过程进行模拟，所选子过程及算法：

子过程	子过程模块/算法
冠层截留	最大冠层容量法 (Aston, 1979)
潜在蒸散发	Penman-monteith公式 (SWAT; Allen等,1989)
地表产流及入渗	修正的经验系数法 (WetSpa; Liu, 2004)
洼地储蓄	Linsley经验公式 (Linsley等, 1975)
渗漏	SWAT方法 (Neitsch等, 2011)
壤中流	达西定律和运动波方程近似计算 (WetSpa; Liu, 2004)
坡面汇流	基于水流扩散传输的分布式单位线法 (Liu等, 2003)
地下水	线性水库法 (WetSpa; Liu, 2004)
河道汇流	马斯京根法 (SWAT; Cunge, 1969)
坡面侵蚀产沙	MUSLE (Williams, 1975)
坡面泥沙输移	分布式单位线法 (Liu等, 2003)
河道侵蚀与输移	简化的Bagnold方程 (SWAT; Williams, 1980)
作物生长	简化的EPIC模型 (SWAT; Williams, 1995)

2) 流域过程建模

模型率定与验证

➤ 率定设置

- 预热期：2012年
- 率定期：2014年-2015年
- 验证期：2013年

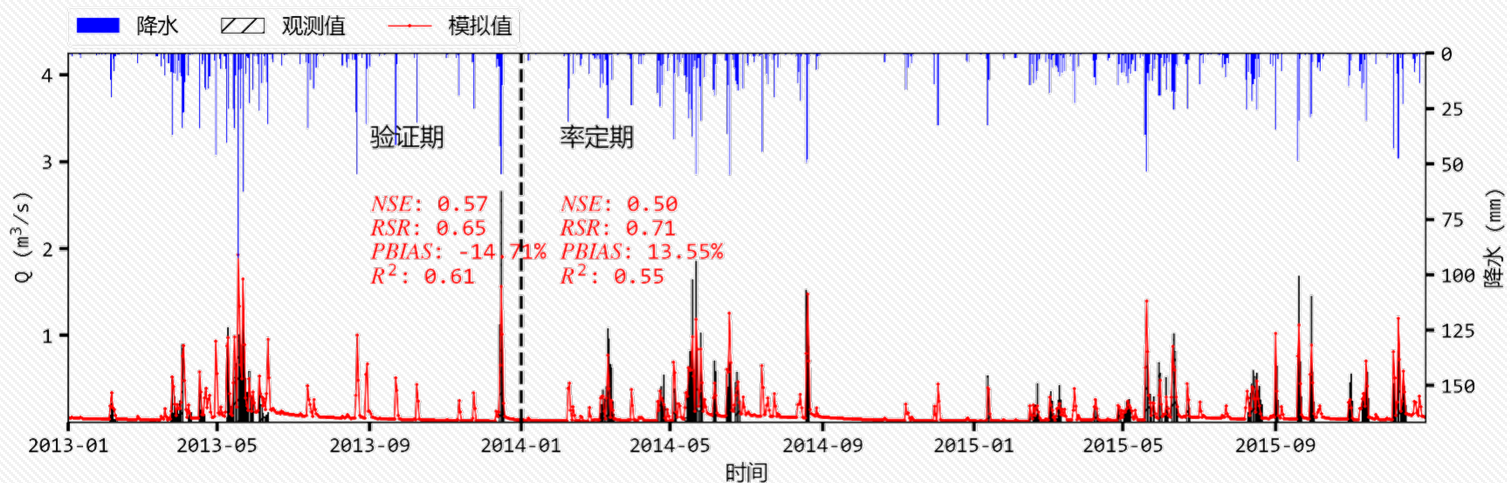
➤ 率定步骤

- 选用Morris筛选法 (Morris, 1991) 依次对**径流模拟相关**和**泥沙模拟相关**参数进行**参数敏感性分析**
- 选用NSGA-II算法 (Deb等, 2002) 利用筛选得到的少量敏感参数进行**自动率定**
- 从自动率定所得最优解集中选择一套率定参数进行后续应用

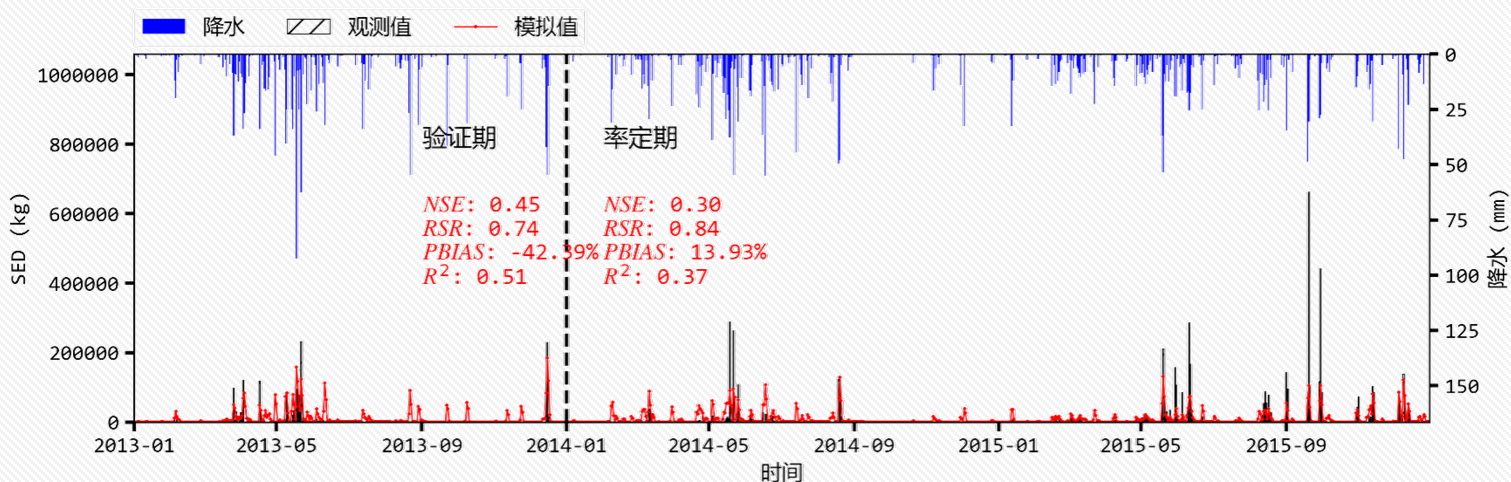
2) 流域过程建模

模型率定与验证

径流

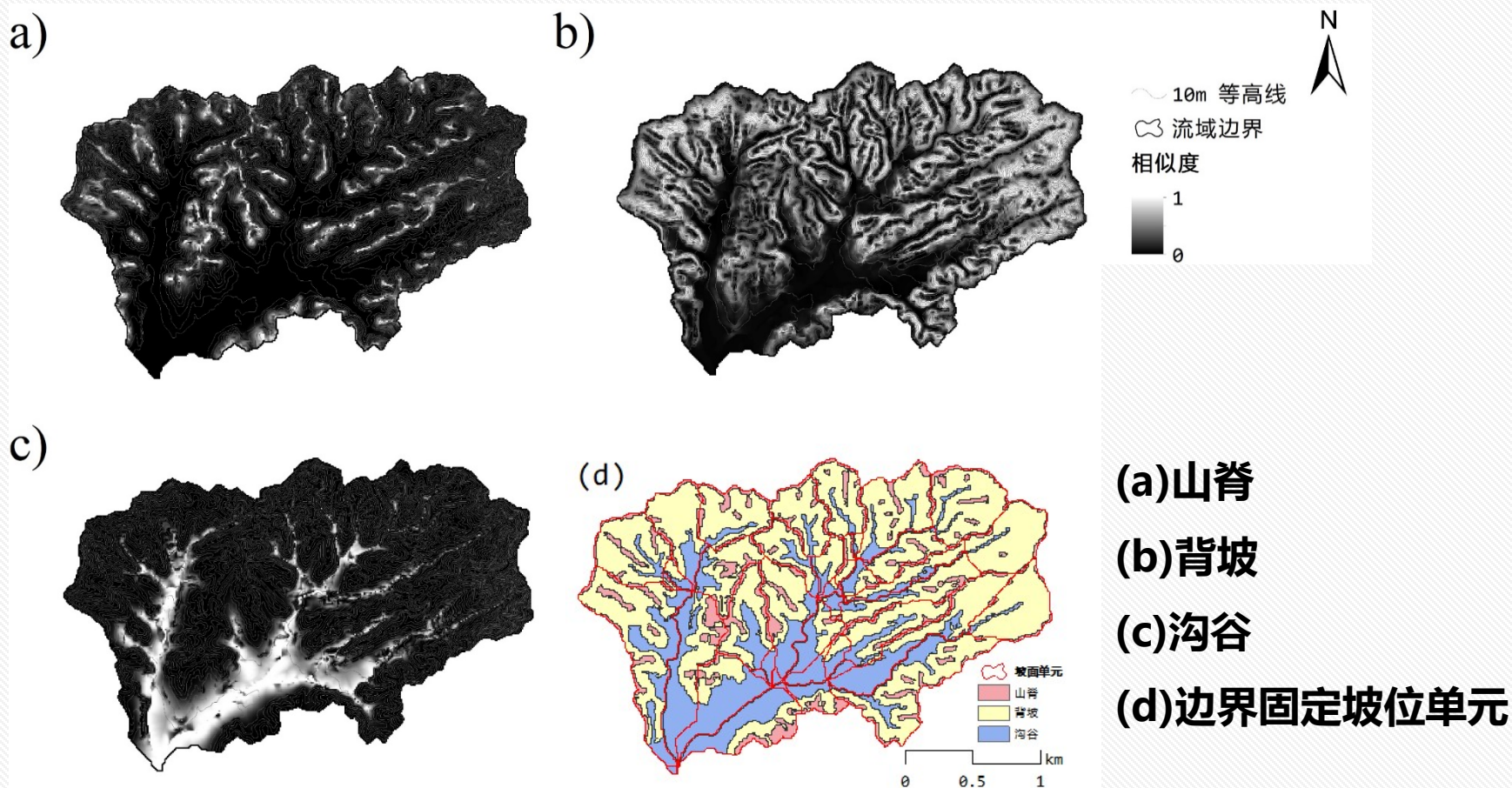


泥沙



3) 模糊坡位信息提取

选用**基于原型的模糊坡位推理方法** (Qin等, 2009), 利用**自动化方法** (Zhu等, 2018) 提取了**3类坡位系统的模糊坡位信息**



4) 研究区BMP知识库

BMPs类型及空间配置知识

➤ 考虑研究区常见的4种BMPs：封禁、生态林草、低效林改造、经济林果

BMP	措施特点	适宜坡位	适用土地利用类型	综合效益等级
封禁	适宜在流域边缘、离居民点较远、高山陡坡的轻度水土流失地实施	山脊、背坡	林地	3
生态林草	在未达到封育成林强度的水土流失地和园地上方种植生态林草	各坡位	林地、果园	5
低效林改造	适宜在立地条件较差的中度水土流失地与立地条件较好的强度流失坡地实施	背坡	林地	4
经济林果	适宜在坡地较缓、水肥条件较好的山坡中、下部实施	沟谷	林地、果园	4

其中，综合效益等级表示BMP减轻土壤侵蚀的有效性程度，**数值越高越好**，可用于**坡面上BMP空间配置关系的形式化表达**

(Chen等, 2017; 陈志彪等, 2013)

4) 研究区BMP知识库

BMPs环境有效性和成本-收益知识

- BMPs实施后达到相对稳定的**环境有效性**（数值为模型相关参数的相对变化率）

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

原始资料来源：《2010年长汀县水土流失检测报告》

- BMPs**成本-收益数据**（单位：万元/km²；王学强，2008）

BMP	实施费用	年维护费用	年收益
封禁	15.5	1.5	2.0
生态林草	87.5	1.5	6.9
低效林改造	45.5	1.5	3.9
经济林果	420	20	60.3

5) BMP情景优化目标

优化目标：土壤侵蚀削减率最大化、经济净投入最小化

$$\text{optimal solutions} = \min(-f(X), g(X))$$

式中， $f(X)$ 为实施BMP情景后的土壤侵蚀削减率（%）； $g(X)$ 为实施BMP情景所需的经济净投入（万元）。

➤ 土壤侵蚀削减率：

$$f(X) = \frac{V(0) - V(X)}{V(0)} \times 100\%$$

式中， $V(0)$ 为基准情景下的模拟值（如全流域产沙量之和，kg）， $V(X)$ 为BMP情景下的模拟值。

➤ 经济净投入：

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

式中， yr 为BMP情景中BMPs的经济效益达到稳定所需时间（年）（本文中 yr 为8）， $C(x_i)$ 为第 i 个配置单元所配置BMP的初始投资费用， $M(x_i)$ 为BMP每年维护费用， $B(x_i)$ 为年收益， $A(x_i)$ 为对应的面积， n 为配置单元个数

6) 对比评价实验

为讨论**BMP空间配置单元边界优化**的有效性：

➤ 对比实验

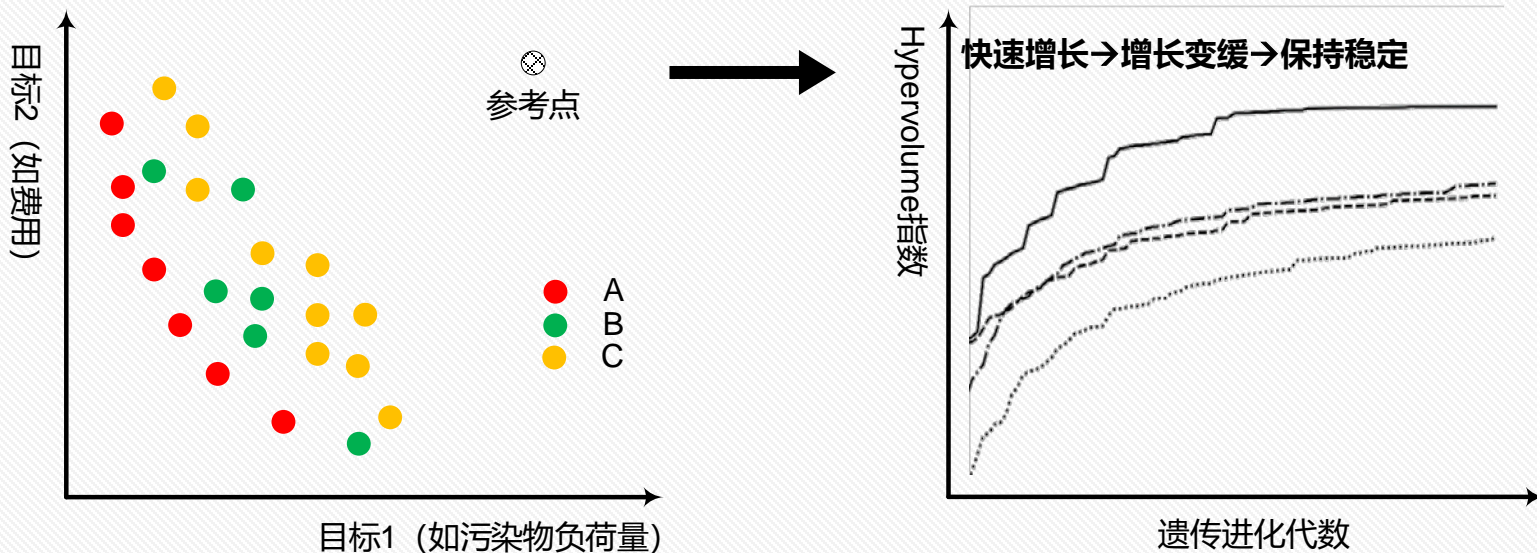
- a) 边界固定坡位单元的BMP情景优化
- b) 以边界固定坡位单元BMP情景优化的第100代Pareto解集作为初始情景，应用边界动态调整策略进行BMP情景优化
- c) 直接应用边界动态调整策略进行BMP情景优化

➤ NSGA-II优化算法参数设置

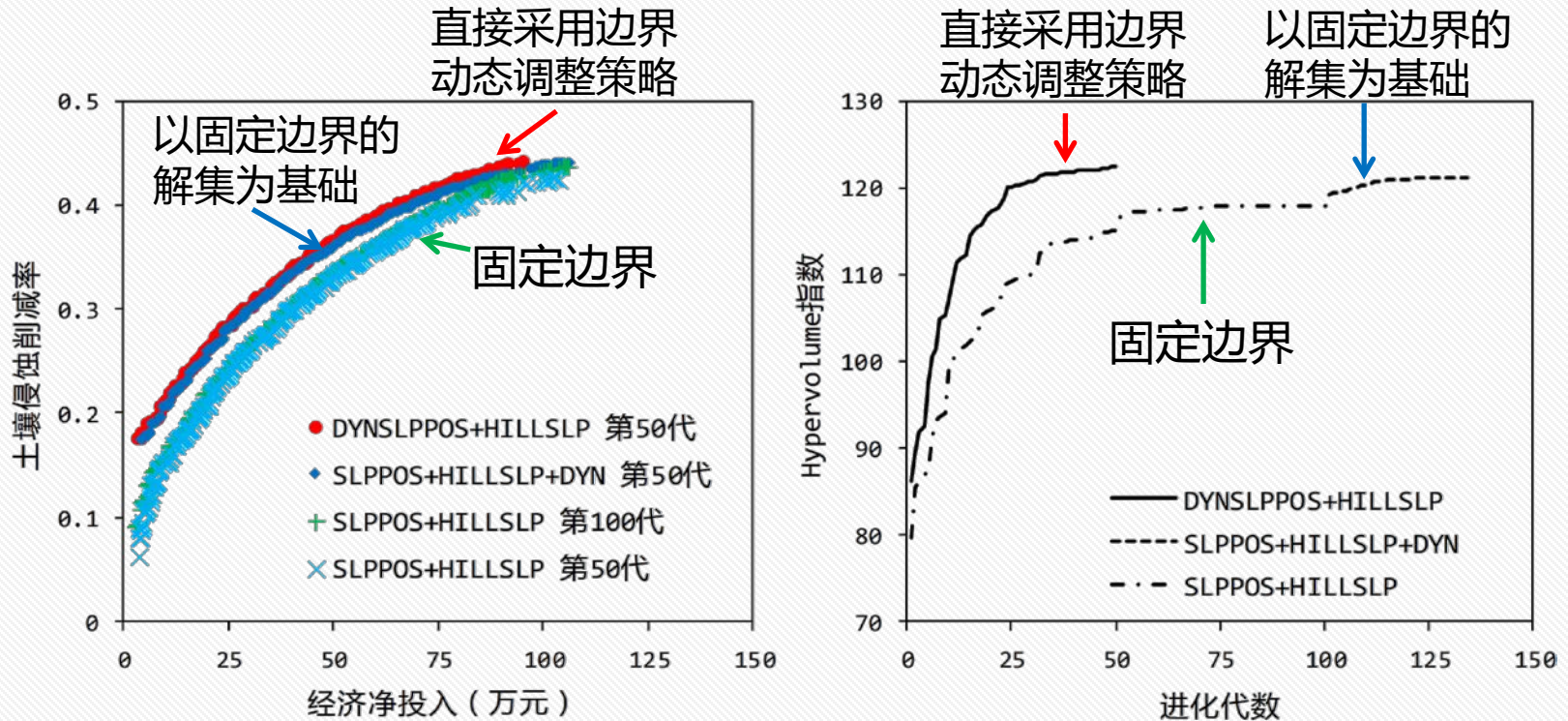
- 初始种群规模480，最大进化代数50，交叉概率0.8，变异概率0.1
- 边界调整可选阈值设置为 ± 0.2 、 ± 0.15 、 ± 0.1 、 ± 0.05

6) 对比评价实验——评价方法

- Pareto解集
 - 散点图体现成本-效益分布，定性分析
 - Hypervolume指数，定量 (Zitzler等, 2003)
- 情景优化效率 (据Hypervolume指数趋势，半定量分析)

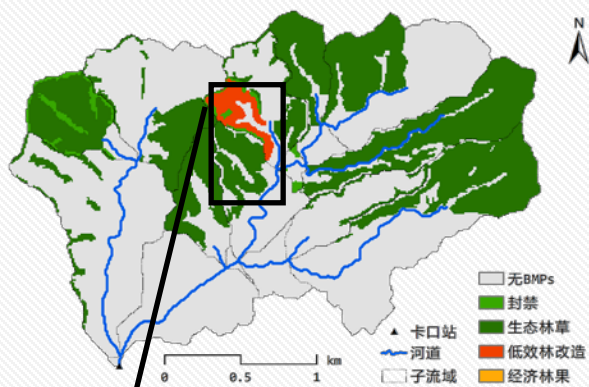


6) 对比评价实验——Pareto解集分布及Hypervolume指数

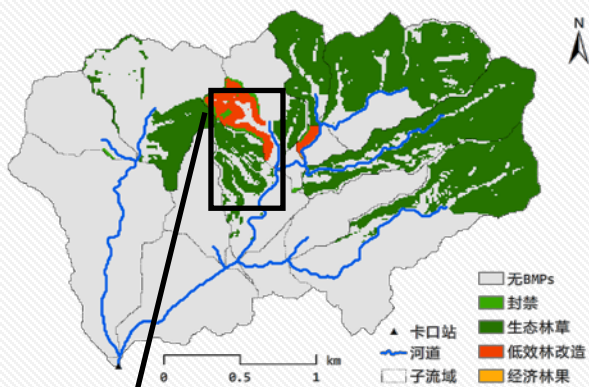


- ✓ 基于坡位单元边界优化的BMP情景优化能够显著扩大解空间、得到综合成本-效益更优的BMP情景集，且具有更高的优化效率。

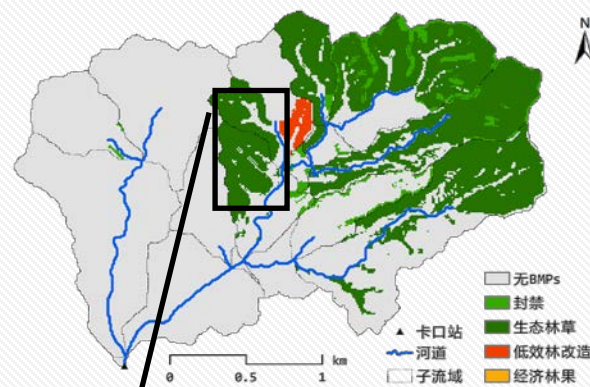
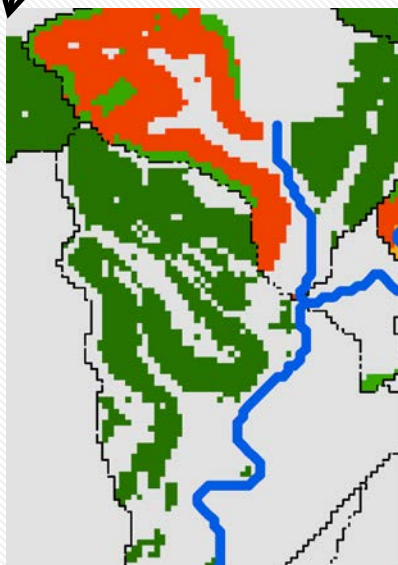
6) 对比评价实验——空间分布对比



(a) 固定边界



(b) 以固定边界的解集为基础



(c) 直接采用边界动态调整策略



5 小结

- 提出了基于模糊坡位信息的BMP空间配置单元边界优化方法
- 对比评价实验表明了该方法的有效性和高效性
- 该方法也可应用于其他分布式流域过程模型（如SWAT+, Bieger等, 2017）
和智能优化算法（如SPEA2; Zitzler等, 2001）构成的BMP情景优化框架
- 下一步研究可在优化过程中考虑坡位单元的空间特征指标



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

请批评指正，谢谢！

Zhu L-J, Qin C-Z*, Zhu A-X. Spatial optimization of watershed best management practice scenarios based on boundary-adaptive configuration units. ***Progress in Physical Geography: Earth and Environment***, 2020, **accepted**.

Zhu L-J, Liu J*, Qin C-Z*, Zhu A-X. A modular and parallelized watershed modeling framework. ***Environmental Modelling & Software***, 2019a, 122: 104526.

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

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.



Email: zlj@reis.ac.cn

主页: <https://zhulj.net>