



中国地理学会地理模型与地理信息分析专委会
2021年学术年会，长春

基于地理对象的流域管理措施空间配置优化方法

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

2021年9月25日

报告提纲

- 「1」 研究背景与科学问题
- 「2」 基本思路
- 「3」 基于坡位的BMP空间配置优化方法
- 「4」 应用案例：削减土壤侵蚀的BMP情景优化
- 「5」 小结与展望

1 研究背景与科学问题

以流域为单元，科学合理地配置多种最佳管理措施 (BMP)，对防治流域土壤侵蚀和非点源污染等生态环境问题、实现山水林田湖草沙的综合治理与开发具有重要意义 (如毕华兴等, 2010; 蔡强国等, 2012; 褚俊英等, 2019)。



封禁



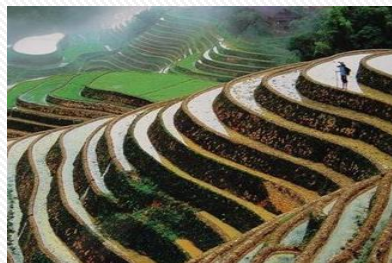
等高植物篱



草地过滤带



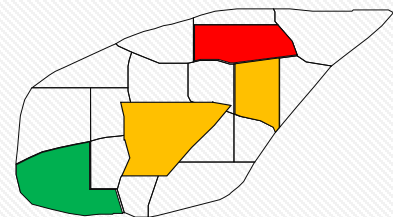
乔灌草混交



梯田



河岸缓冲区



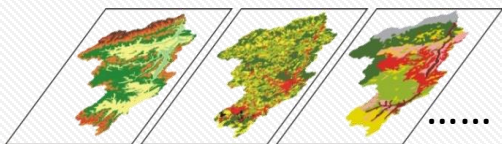
多种BMP在流域内的
空间组合 (BMP情景)

基于流域过程模拟的BMP情景分析方法

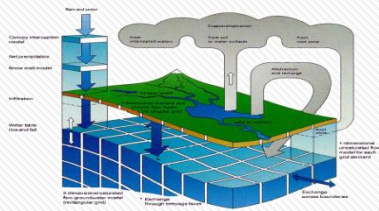
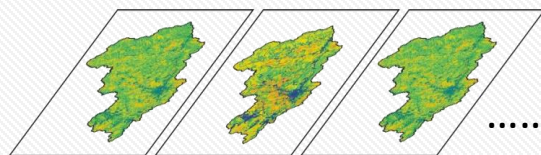
流域过程模拟

情景分析

地理要素空间分布信息



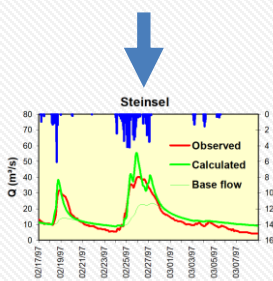
流域管理措施 (BMP) 情景



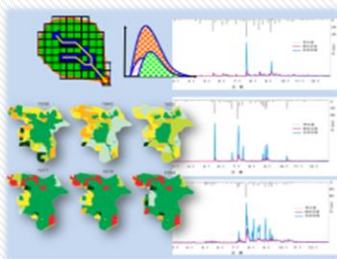
流域过程模型



智能优化算法



流域过程响应



不同情景下的
流域响应

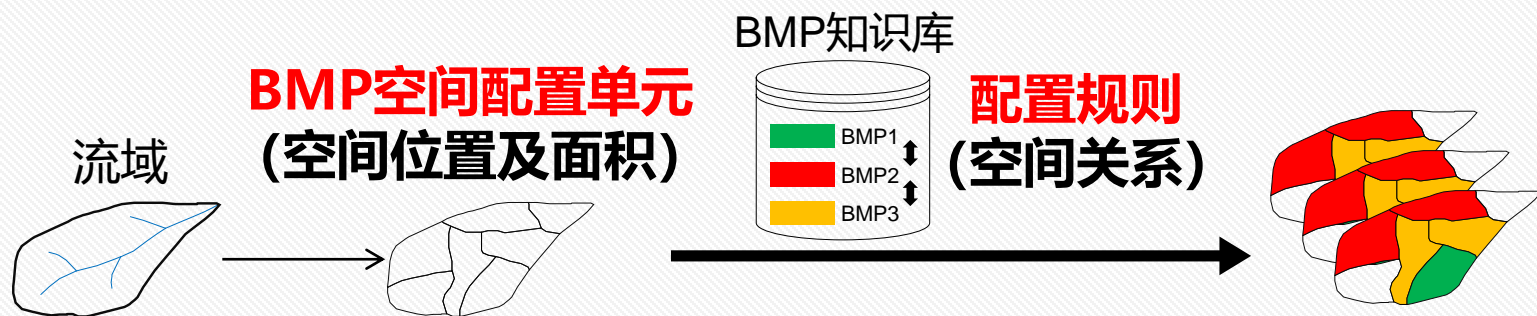


环境、经济效益
比较分析

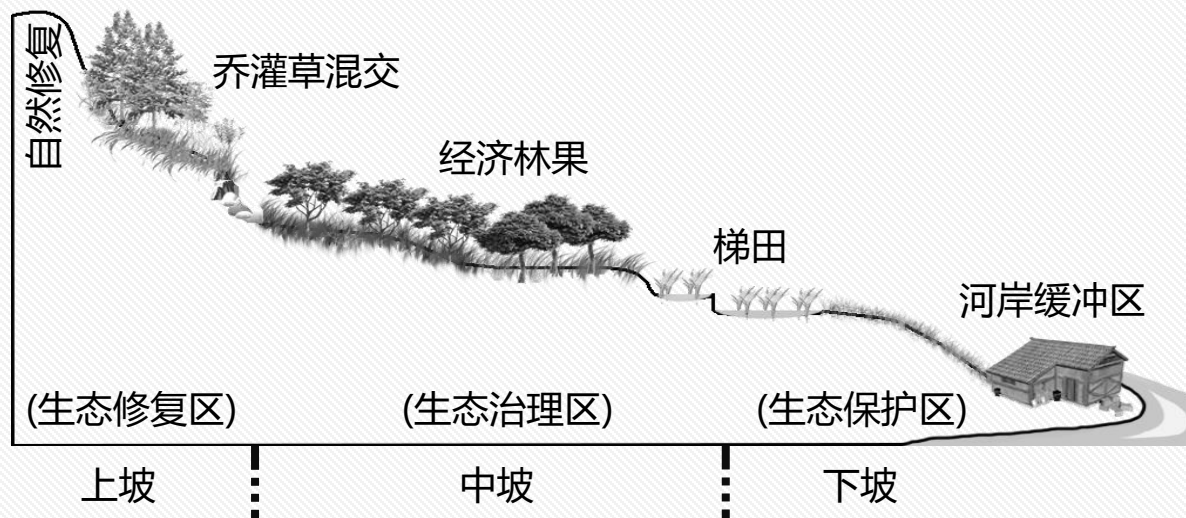


辅助决策制定
(朱阿兴 等, 2019)

BMP情景分析的关键环节：生成合理有效的BMP情景

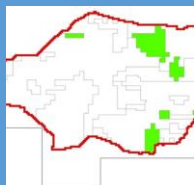


科学合理的BMP空间配置**不仅需要考虑单一BMP的适宜配置位置，更应强调对BMP之间空间交互关系的有效利用。**



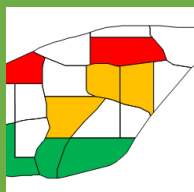
南方红壤侵蚀区流域水土保持综合治理模式示意图 (陈志彪等, 2013)

现有BMP空间配置优化方法



基于地理要素属性

Based on properties of geographic features

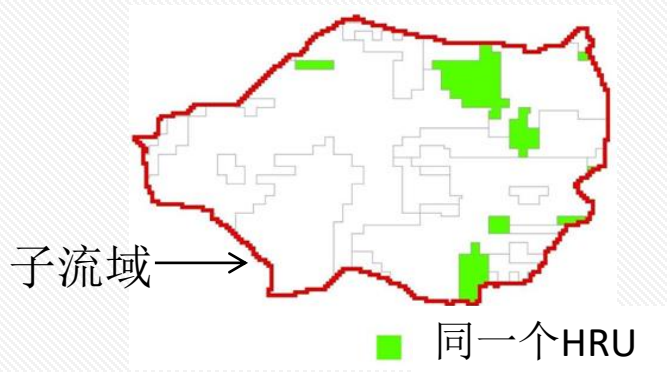


基于地理对象

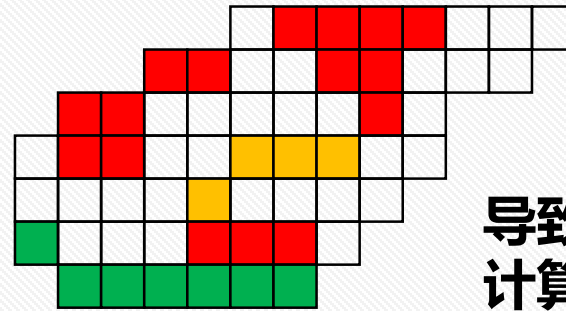
Based on geographic objects

基于地理要素属性的BMP空间配置优化方法

分析与BMP环境效益相关**地理要素（如地形要素）**的作用机理，通过**条件筛选、适宜性评价、空间叠加等**操作，得到适宜配置BMP的空间位置（Rodriguez等，2011；Panagopoulos等，2012；徐伟铭等，2016）。



水文响应单元(HRU)
如Maringanti 等, 2009



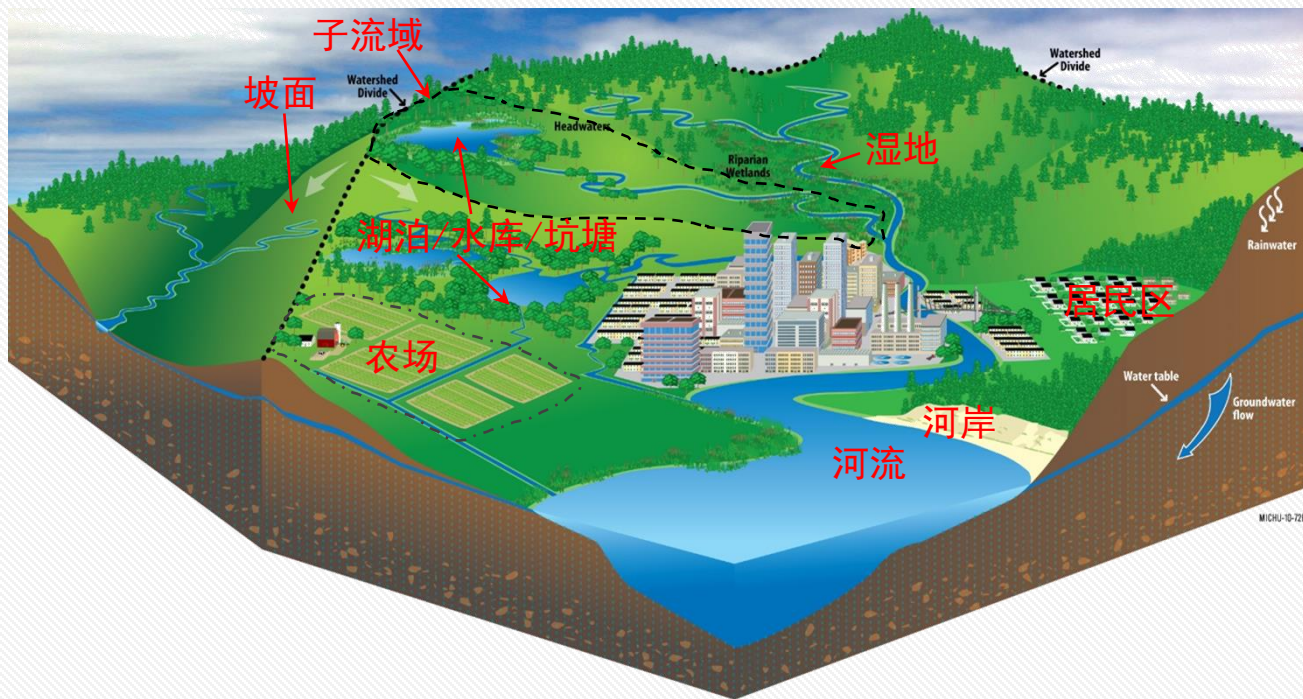
栅格
如Gaddis等, 2014;
Perez-Pedini等; 2005

**导致极大优化
计算量**

- ✓ 能够考虑一种或多种地理要素对BMP环境效益的影响
- ✗ 所得单元通常不具有明确定义的空间关系，**难以体现BMP之间的空间交互关系**（Arnold等，2010）

基于地理对象的BMP空间配置优化方法

地理对象是对现实世界客观存在的实体或地理现象的空间离散化抽象表达，如子流域、坡位、农场等。



根据考虑地理对象空间关系的方式

不考虑空间关系

隐式考虑空间关系

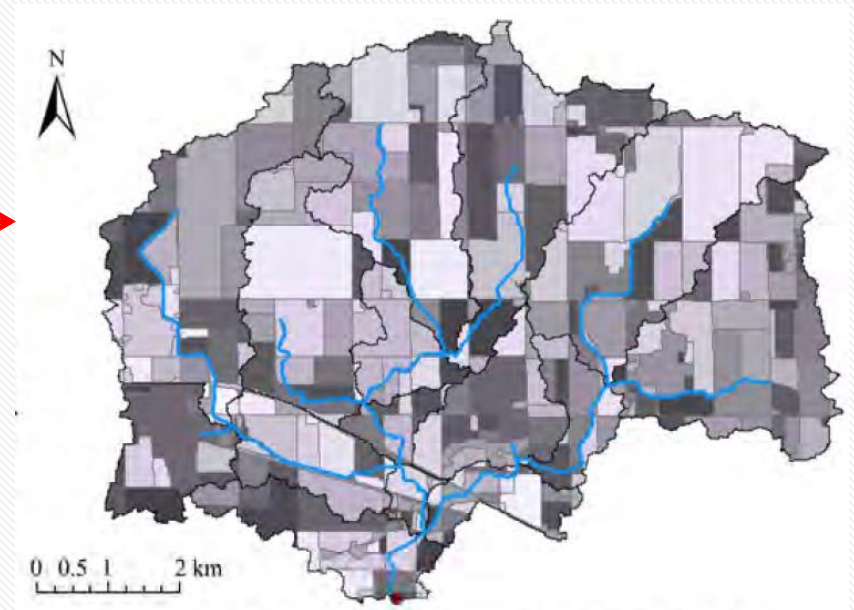
显式考虑空间关系

不考虑地理对象空间关系的BMP空间配置优化方法

对各地理对象个体逐一按其特征配置可选的BMP，分别评价BMP的环境效益，并在整个流域上简单汇总，情景优化过程中则直接利用智能优化算法的随机操作生成新情景（Kalcic等，2015；Teshager等，2016）。



利用农场边界定义HRU
如Kalcic等, 2015

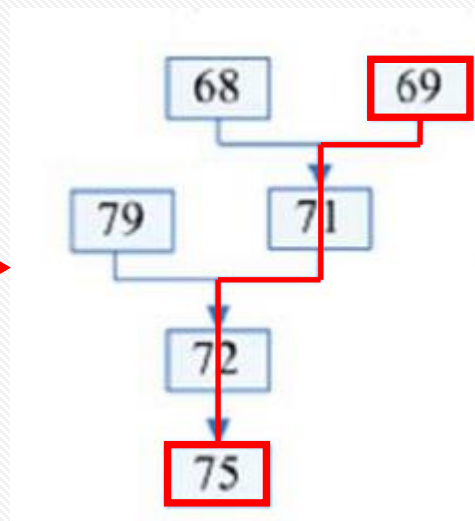
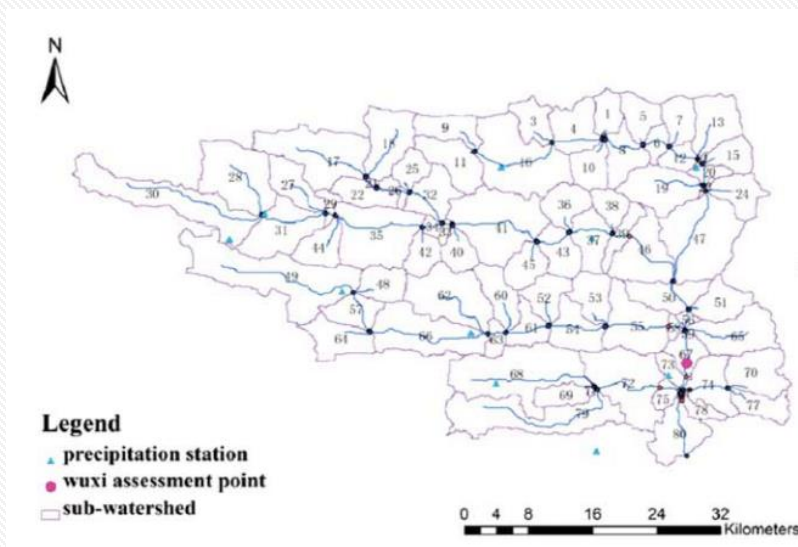


✓ 方法简单易行

✗ 未能从流域或坡面整体的角度考虑其内部空间配置单元间的BMP组合及其环境效益

隐式考虑地理对象空间关系的BMP空间配置优化方法

根据地理对象个体特征随机配置适宜的BMP，**依赖流域过程模型内部对地理对象空间关系的表达，体现所配置BMP之间的协同作用**，若该作用能够产生较高的环境效益，相应的情景则被优化算法选出（Shen等，2013）。

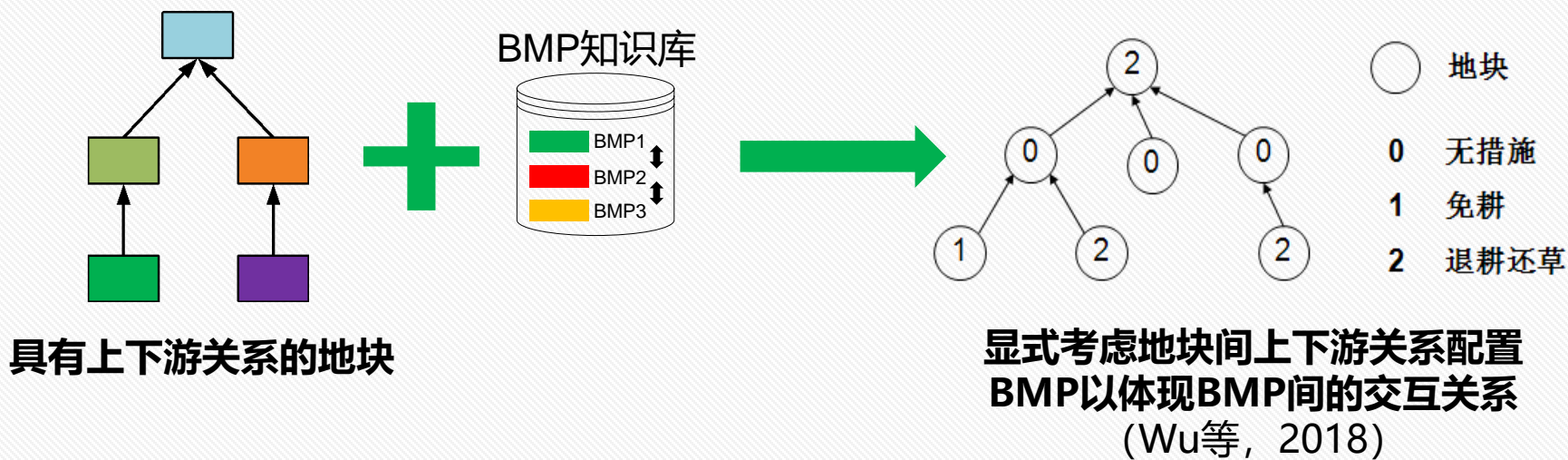


利用SWAT模型河道汇流评价各子流域配置BMP后的流域整体环境效益，并借助优化算法选优
如Chen等, 2014, 2016

- ✓ 充分利用流域过程模型对地理对象空间关系的表达能力
- ✗ **不同地理对象个体的BMP配置仍相互独立，未能直接利用地理对象空间关系配置BMP组合**

显式考虑地理对象空间关系的BMP空间配置优化方法

直接利用地理对象空间关系对BMP之间空间交互关系的表达能力，配置BMP组合 (Wu等, 2018)。



- ✓ 直接利用地理对象空间关系和BMP间空间交互知识，具有先进性
- ✗ 作为该方向的有益探索，Wu等(2018)**仅利用相邻地块的上下游关系，未考虑BMP效益受坡面不同地形部位的影响**

如何考虑地形部位对BMP效益的影响，显式表达坡面上BMP的上下游组合关系？

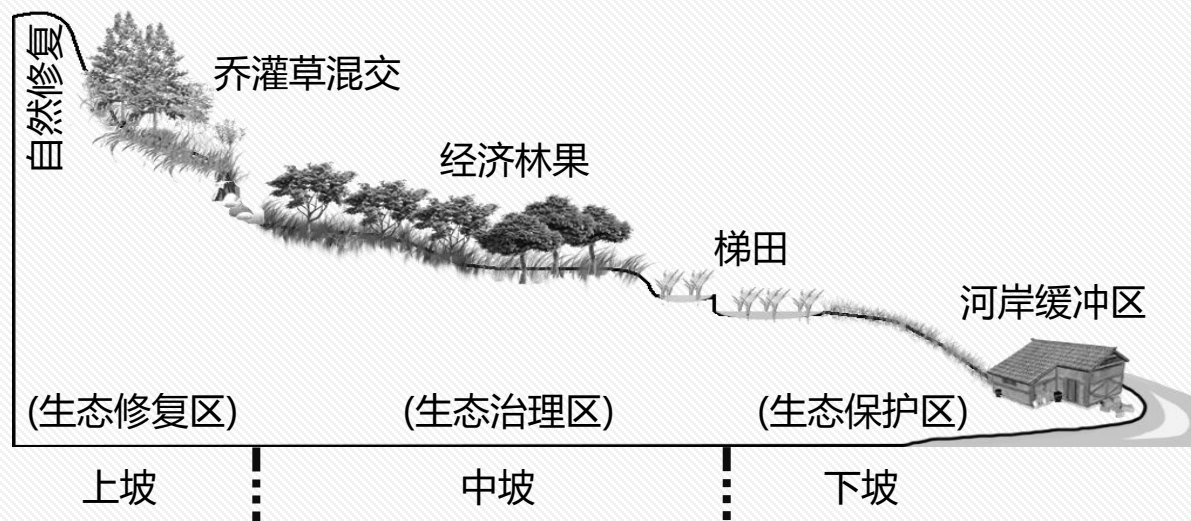


2 基本思路

坡位可作为BMP空间配置单元

坡位 (如山脊、背坡、沟谷)

- 是**坡面地形部位的基本单元**，沿坡面自上而下构成完整序列；
- 是**坡面过程的综合体现**，可视为均一功能单元，影响坡面过程，进而影响BMP效益
- 与**流域综合治理模式中定性描述坡面上BMP配置的空间单元概念相对应**



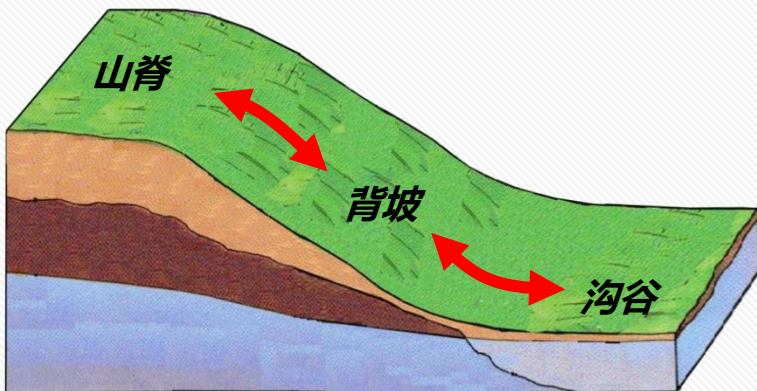
南方红壤侵蚀区流域水土保持综合治理模式示意图 (陈志彪等, 2013)

2 基本思路

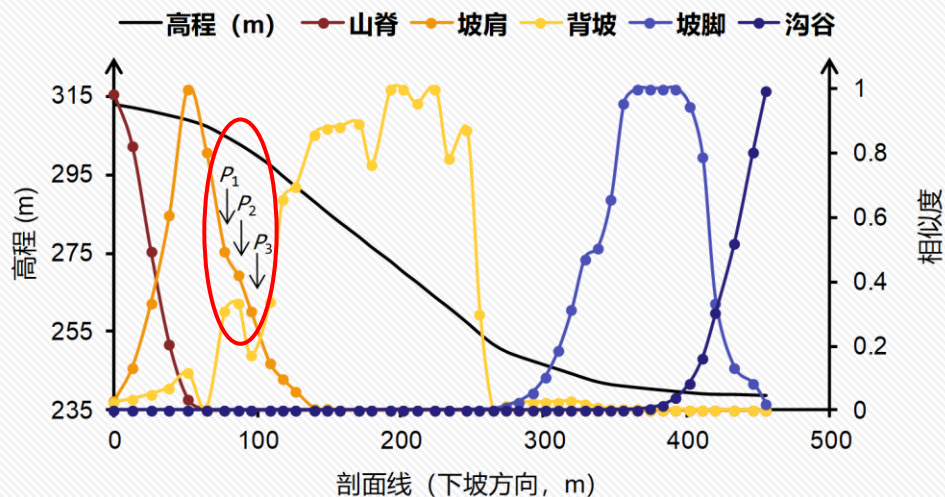
坡位可实现空间配置单元边界调整 (即实现BMP配置面积优化)

坡位 (如山脊、背坡、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

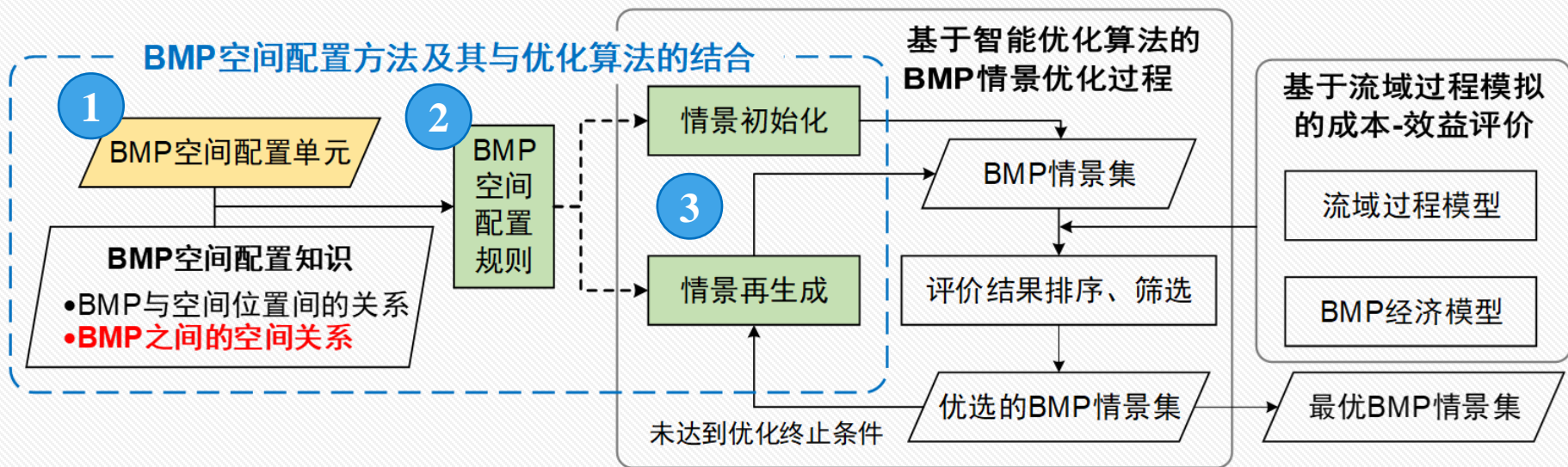


自然界中的坡位渐变特征



坡面上某剖面线的5类模糊坡位信息

3 基于坡位的BMP空间配置优化方法



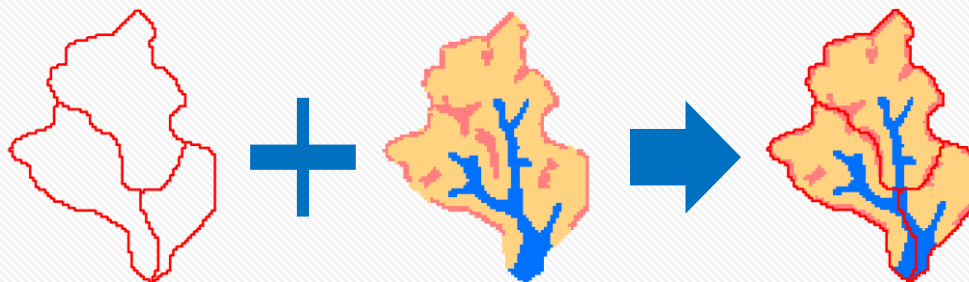
方法设计的关键之处:

1. 坡位单元的划分及其边界动态调整方法;
2. 显式考虑坡位上下游关系表达BMP空间交互关系;
3. 基于流域过程建模与情景优化建模框架进行方法实现。

坡位单元的划分及其边界动态调整方法

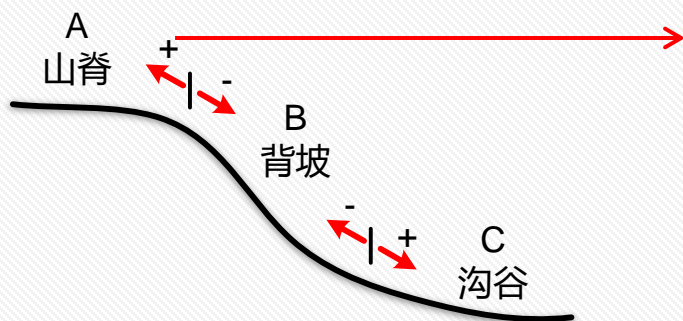
➤ 边界固定坡位单元的划分（以3类坡位为例）

- 采用**基于原型的模糊坡位推理方法**（Qin等, 2009; Zhu等, 2018）
- 子流域划分基础上**提取坡面单元**，作为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：



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

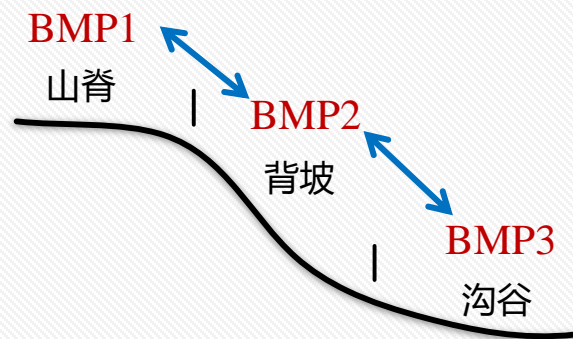
$$S_{\text{山脊}} - S_{\text{背坡}} < T$$

式中， S 为模糊坡位信息， T 为边界调整阈值

显式考虑坡位上下游关系表达BMP空间交互关系

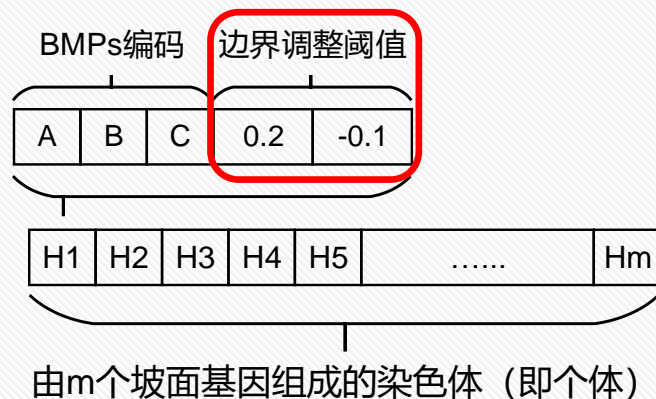
➤ BMP空间配置知识的总结

- 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）

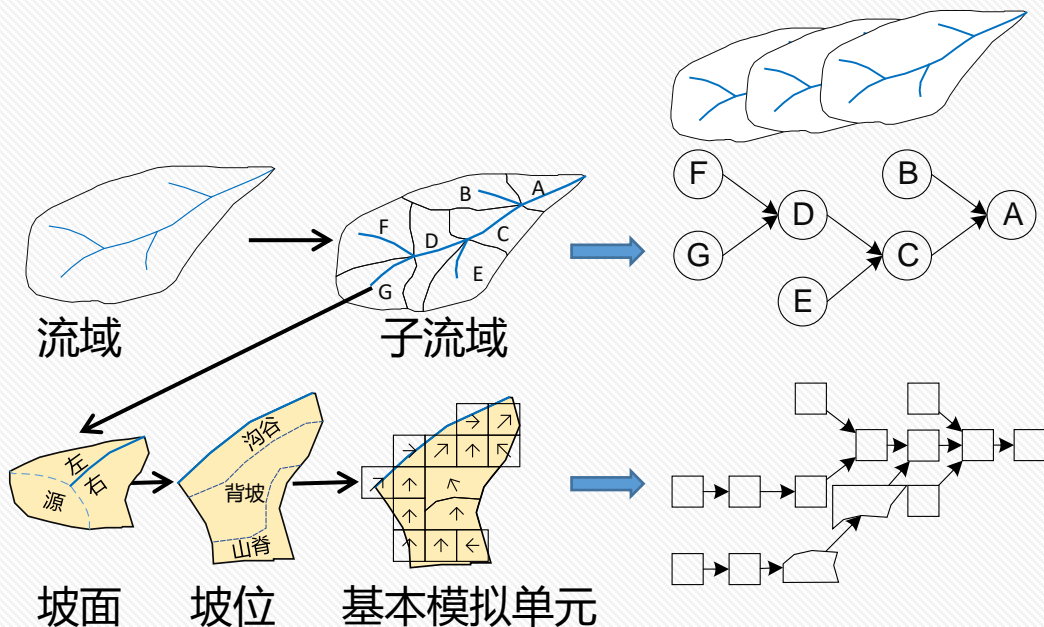
- 遗传算法编码的设计（地理决策变量）
 - BMPs编码
 - 边界调整阈值
- 优化算法中对BMP空间配置知识的表达
 - BMP情景初始化
 - BMP情景再生成（交叉、变异操作）



基于流域过程建模与情景优化建模框架进行方法实现

SEIMS (Spatially Explicit Integrated Modeling System)

(Liu等, 2016; Zhu等, 2019)

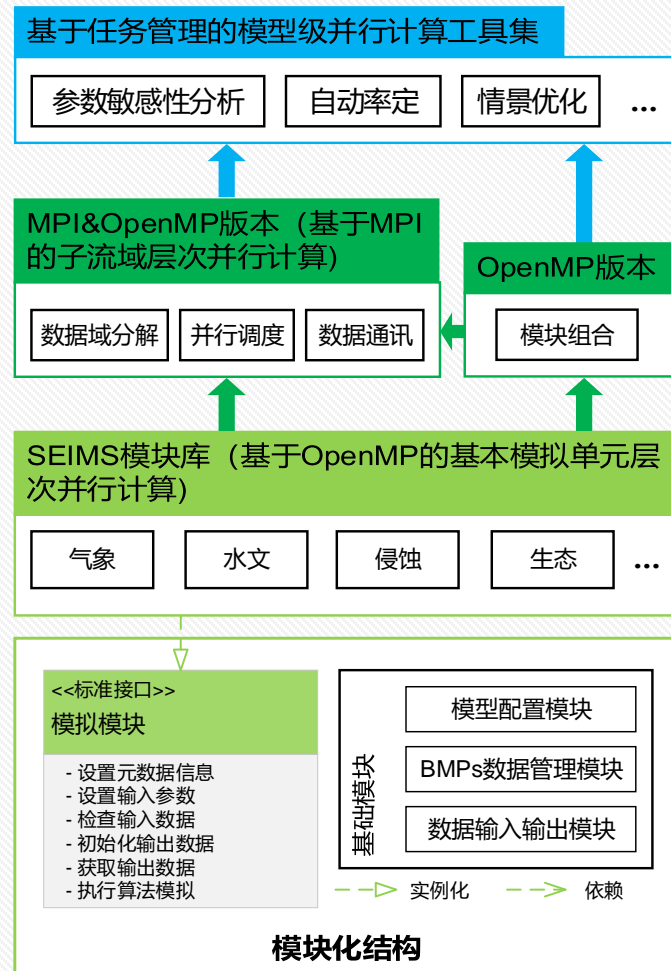


灵活的模块化结构

- 统一接口，一个模块对应一个过程的模拟算法
- 模块内部以近乎串行编程实现并行计算
- 无需关注子流域层次并行编程细节

多层次并行计算中间件

- “子流域-基本模拟单元” 双层
- 模型层次

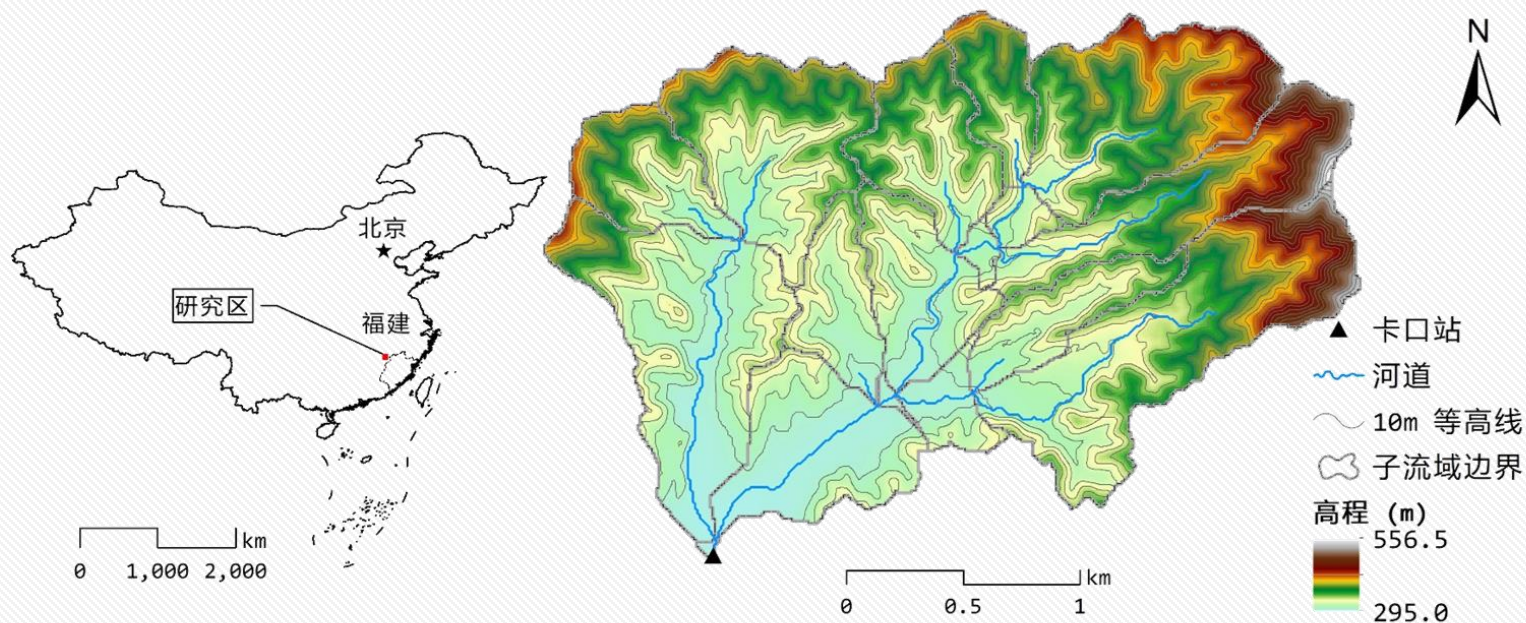


4 应用案例——削减土壤侵蚀的BMP情景优化

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

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

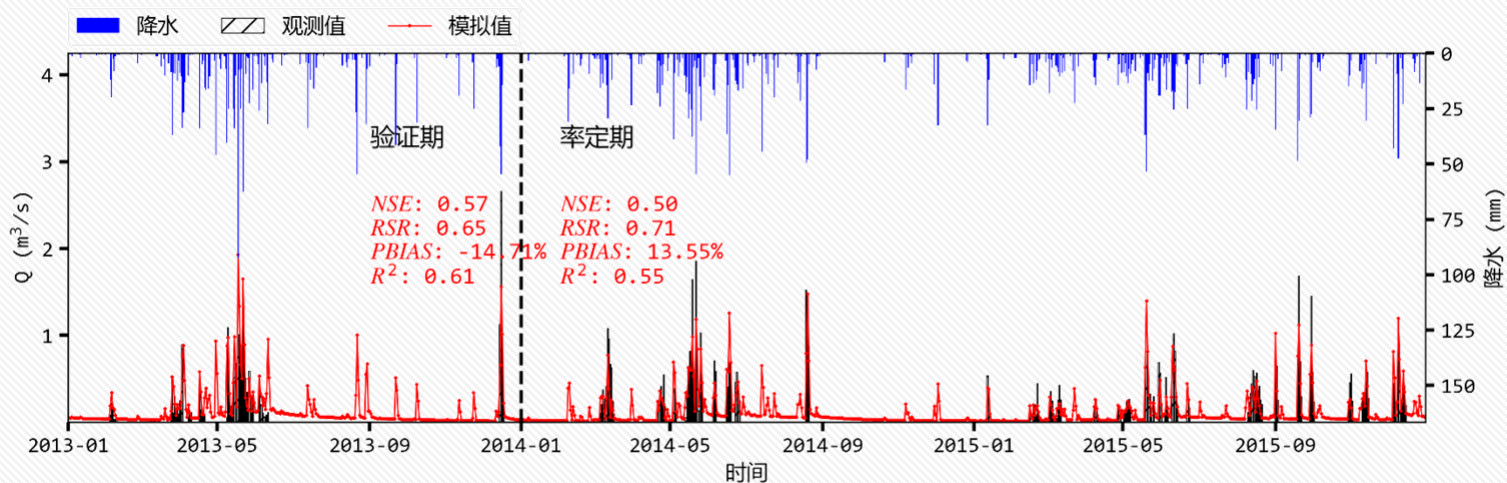
➤ 率定步骤

- 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

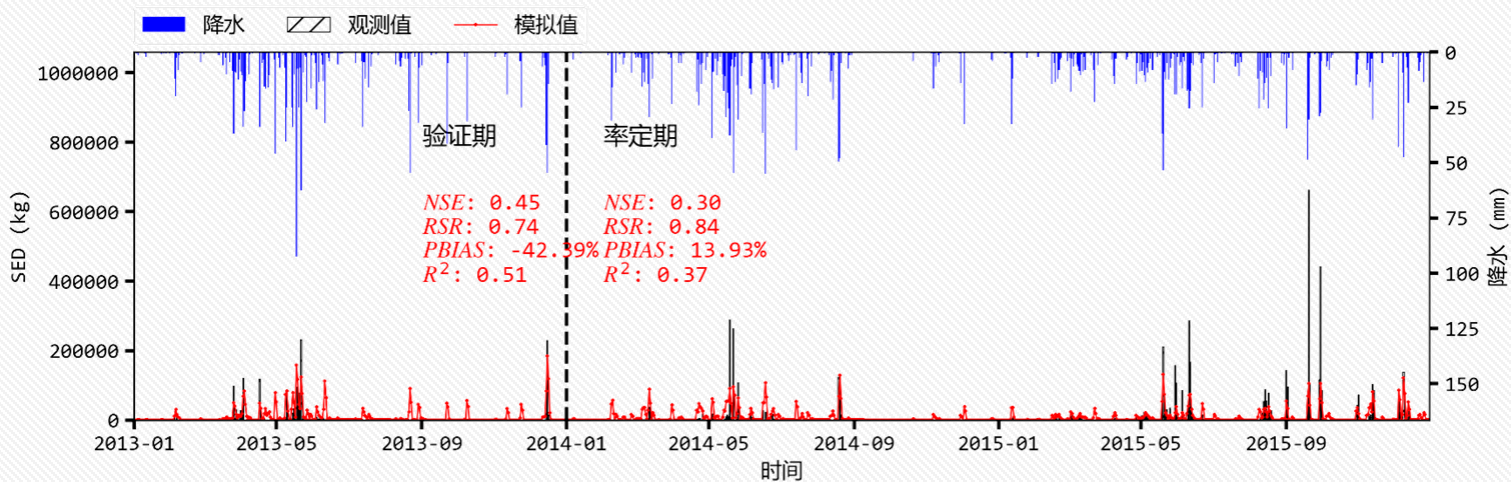
2) 流域过程建模

模型率定与验证

径流

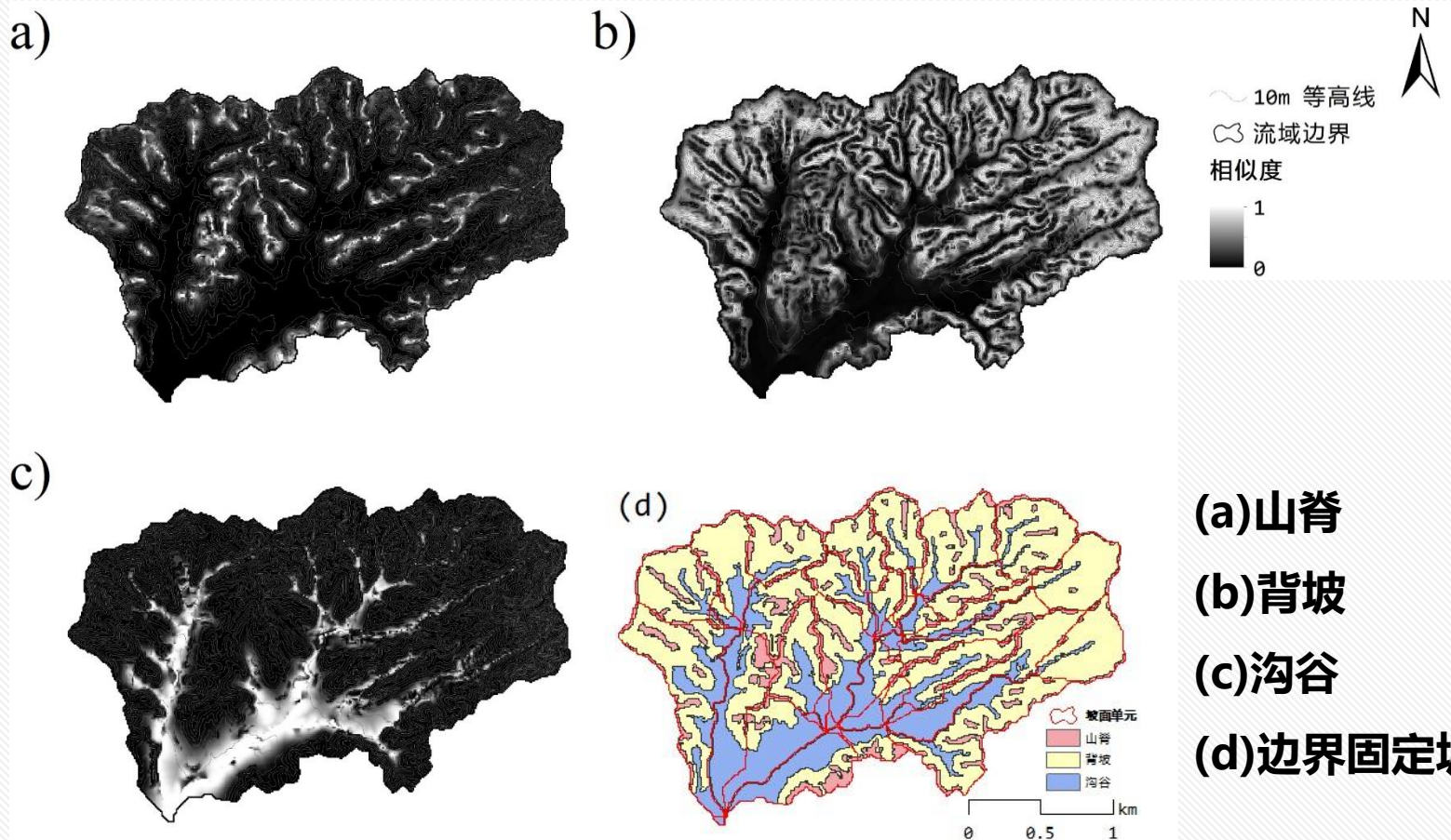


泥沙



3) BMP空间配置单元的划分——坡位单元

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**



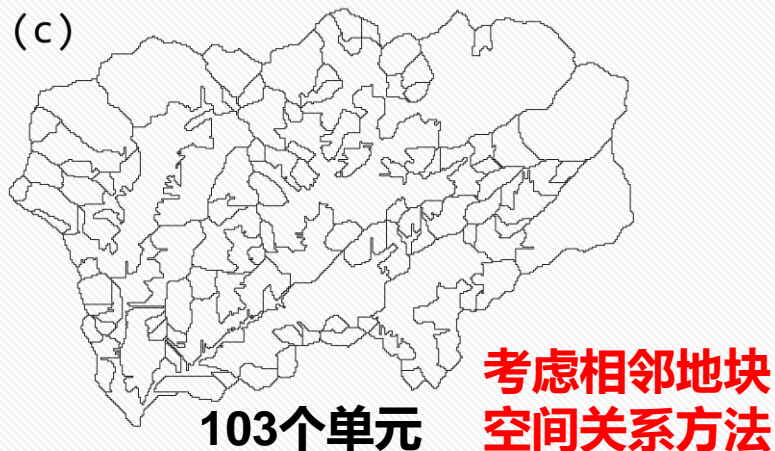
3) BMP空间配置单元的划分——其他方法中常用的空间单元



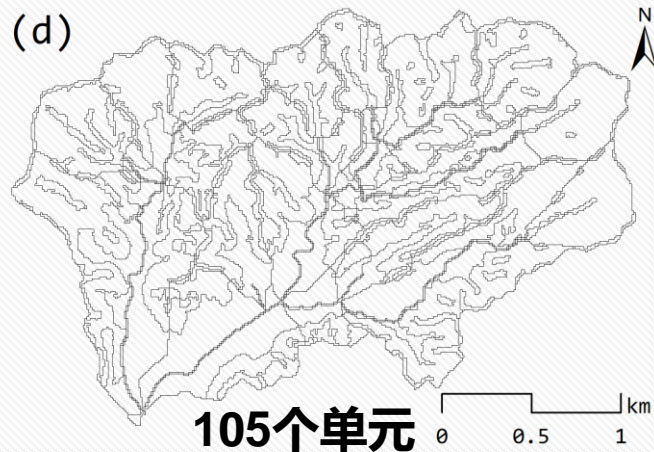
(a) 水文响应单元HRUs (Arnold等, 1998)



(b) 空间显式HRUs (Teshager等, 2016)



(c) 具有上下游关系的地块 (Wu等, 2018)



(d) 坡位单元 (Qin等, 2018)

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

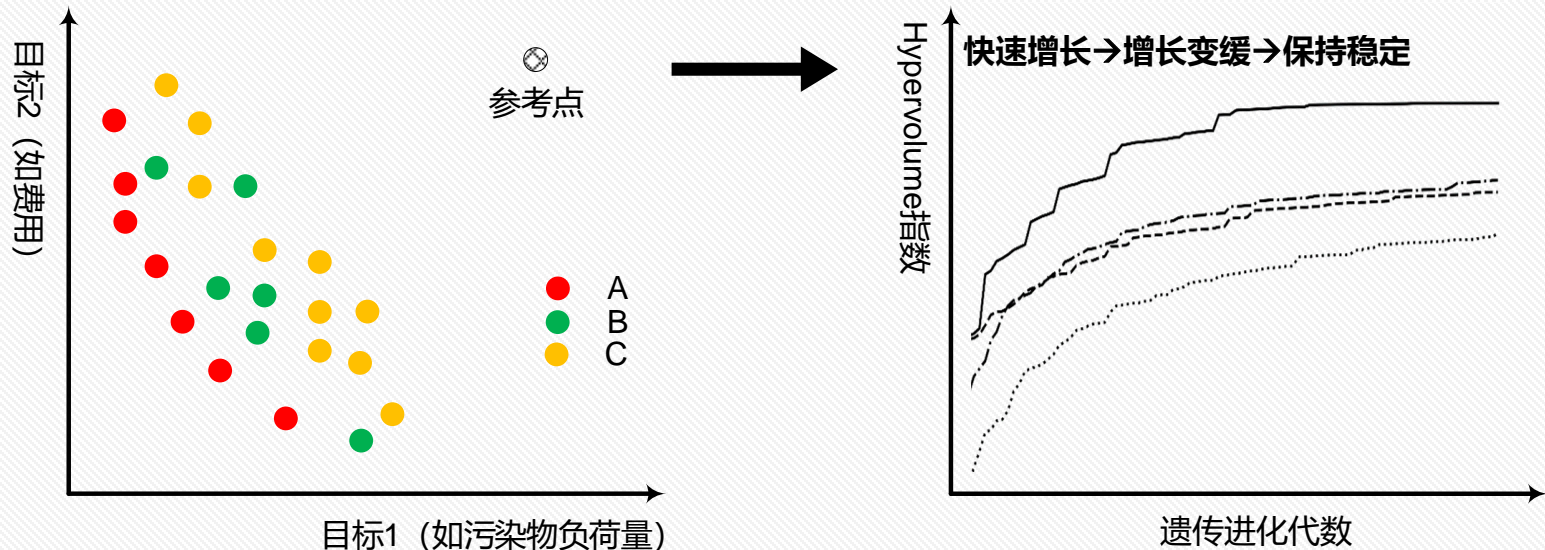
6) 评价实验

➤ 实验步骤

- 实验1：边界固定坡位单元与其他3种空间配置单元的对比
- 实验2：边界固定坡位单元与边界动态调整的对比

➤ 情景优化结果评价方法

- 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)
- 最优BMP情景集的实际可实施性 (BMP情景空间分布，定性分析)



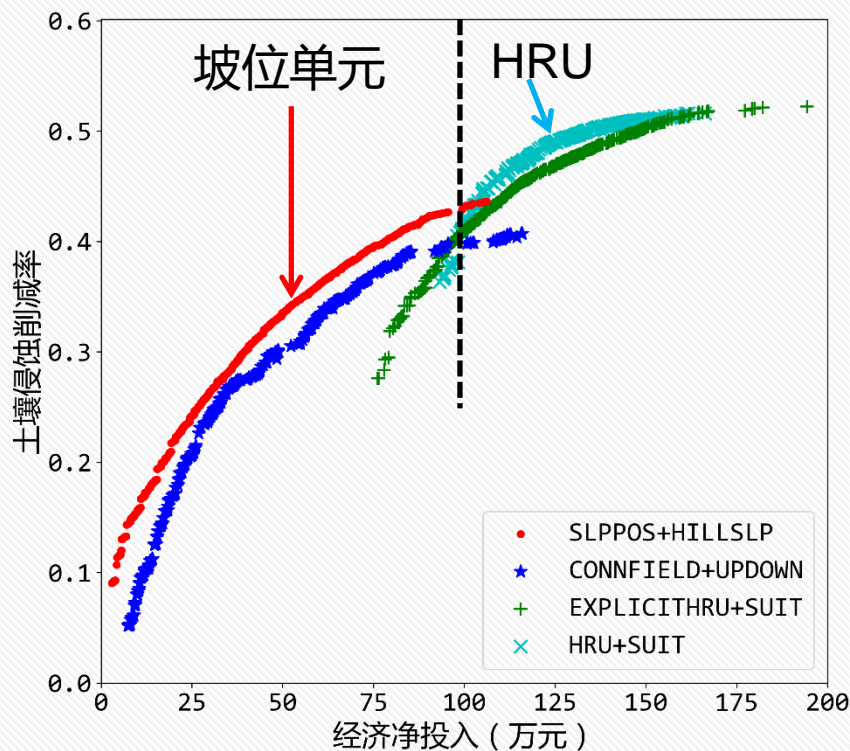
6) 评价实验1：边界固定坡位单元与其他空间配置单元的对比

实验设计

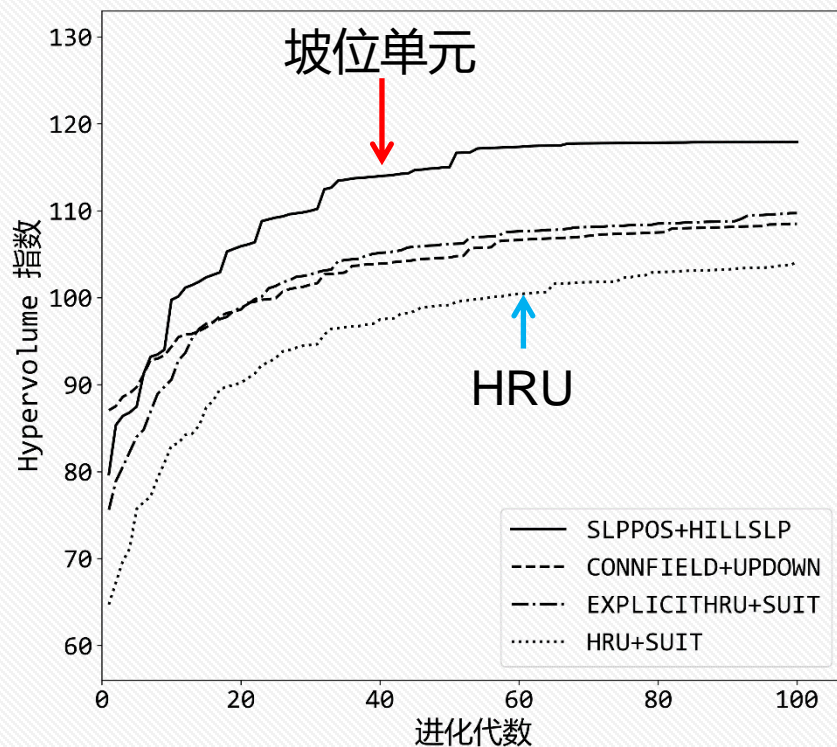
- **空间配置单元应用其相应最佳配置策略的组合（即尽可能多地利用BMP知识）**
 - **a, HRU + 适宜配置策略(SUIT)**：据BMP适宜配置的土地利用类型知识，随机选取并配置一个适宜的BMP
 - **b, 空间显式HRU + 适宜配置策略(SUIT)**
 - **c, 具有上下游关系的地块 + 上下游配置策略(UPDOWN)**：在适宜策略的基础上，如果一个地块已经配置有BMP，则其上游地块无需再配置BMP，反之，其上游地块则根据适宜策略配置BMP (Wu等, 2016)
 - **d, 坡位单元 + 坡面空间配置关系策略(HILLSLP)**：在适宜策略的基础上，考虑BMPs与坡位单元之间的空间关系，即在同一坡面内，下游坡位单元配置BMP的综合环境效益等级应不低于其上游坡位单元配置BMP (Zhu等, 2019; Qin等, 2018)
- **NSGA-II优化算法参数设置**
 - 初始种群规模480，最大进化代数100，交叉概率0.8，变异概率0.1

6) 评价实验1 —— Pareto解集分布及Hypervolume指数

结果分析



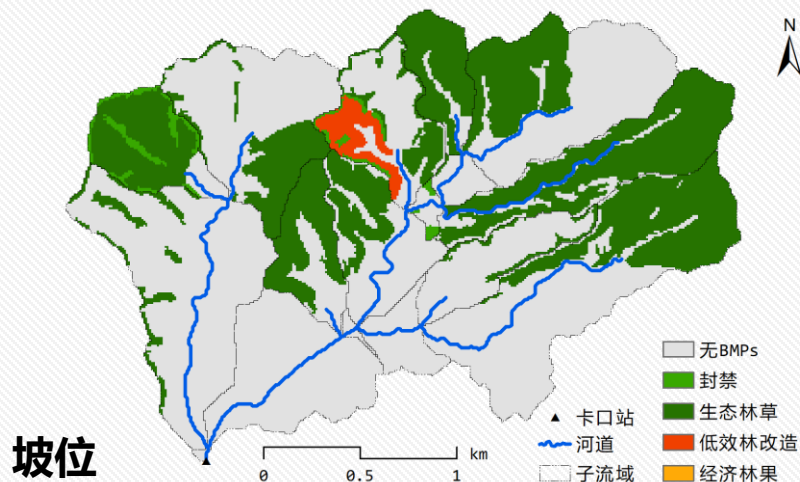
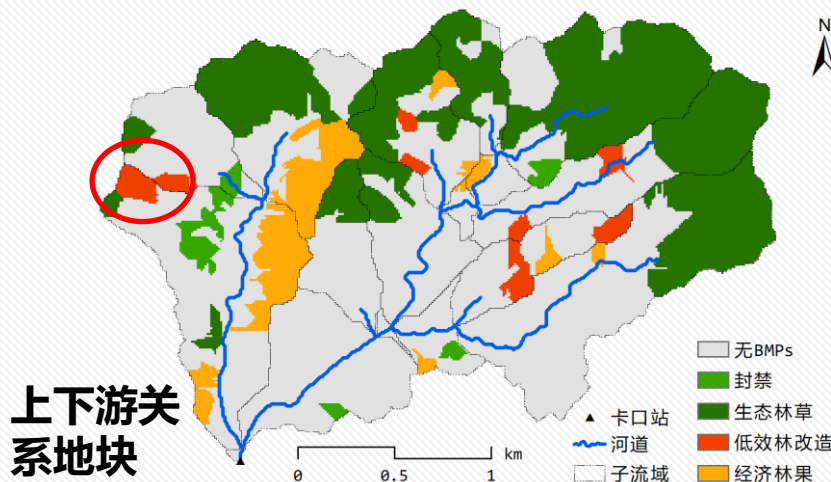
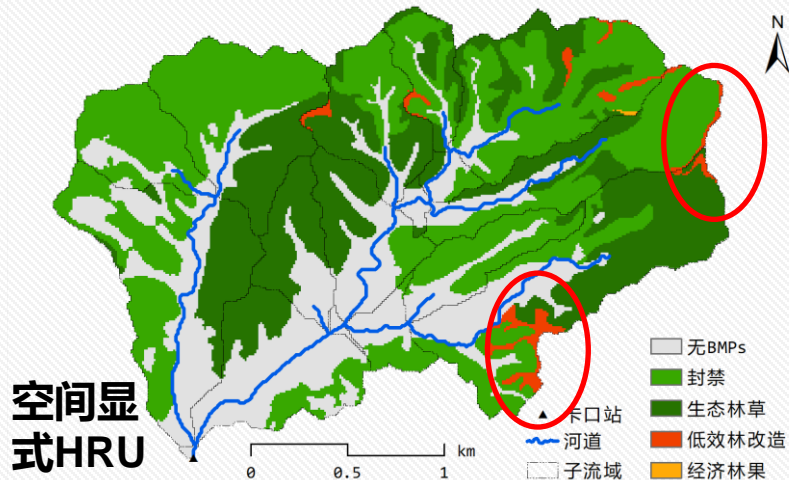
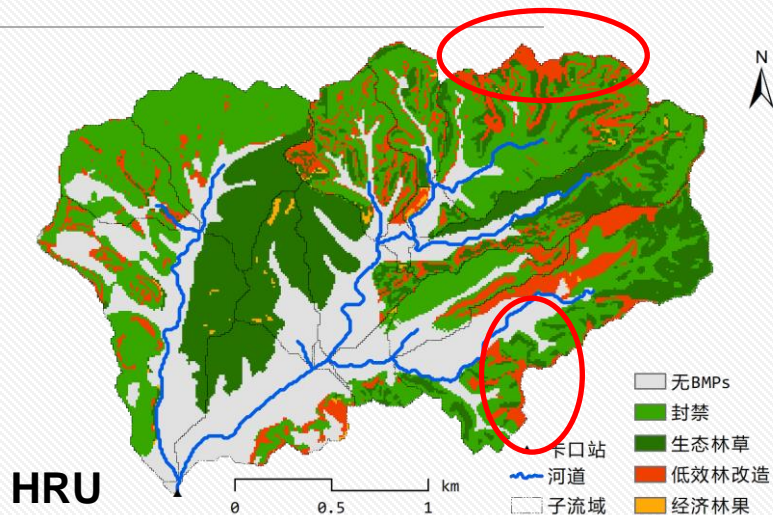
第100代Pareto近似最优解集分布图



Hypervolume指数随进化代数的变化

- ✓ HRU单元和坡位单元分别在净投入较高和较低时具有最优的非支配解集
- ✓ **坡位单元综合性能最优**，而HRU单元则表现最差

6) 评价实验1 ——空间分布对比



- ✓ 适宜配置策略和上下游配置策略可能导致不符合实际管理措施经验的配置
- ✓ 坡位单元能够考虑坡面上BMPs空间配置关系，具有更好的可实施性

(Zhu等, *Water*, 2019; Qin等, *JSWC*, 2018)

6) 评价实验2: 固定边界坡位单元与边界动态调整的对比

实验设计

为讨论**边界动态调整的坡位单元**对BMP情景优化的有效性:

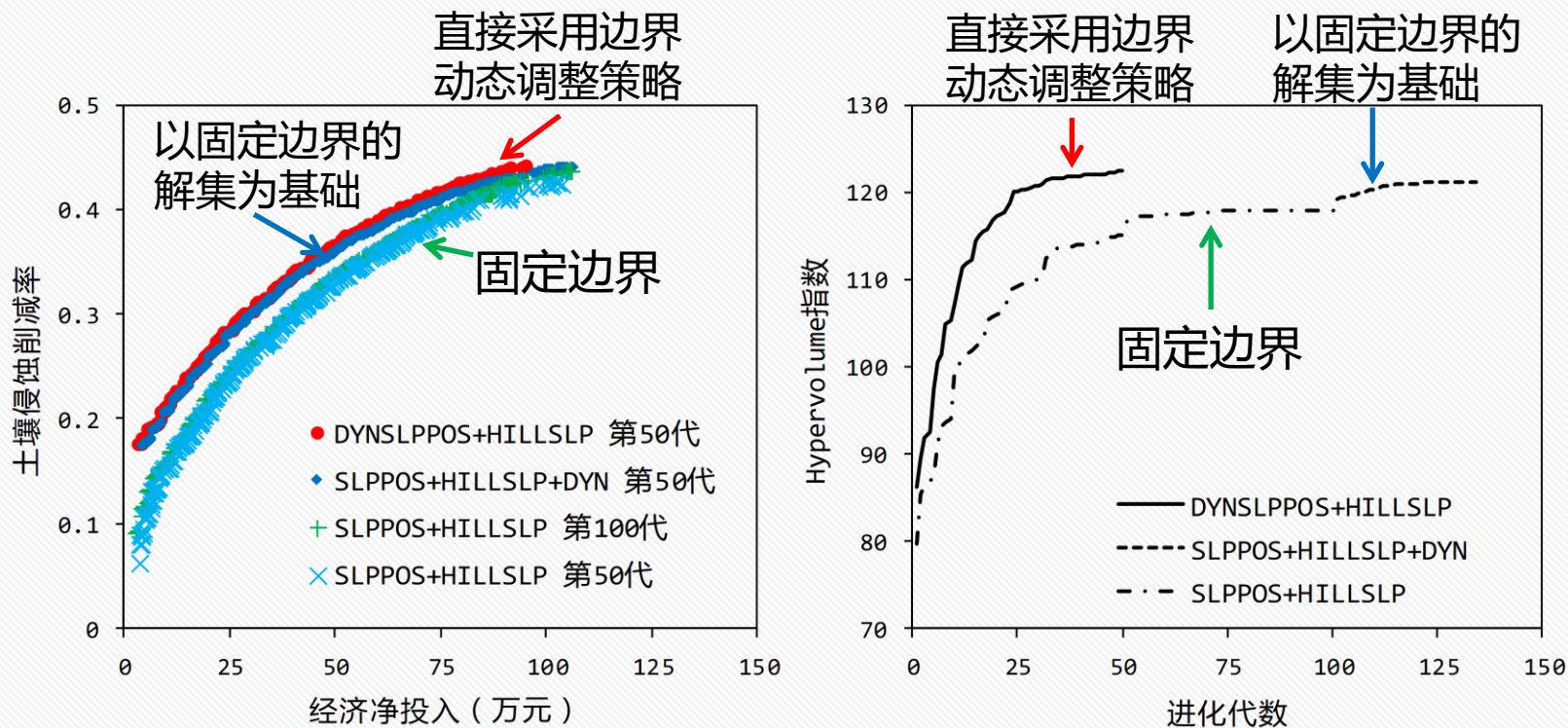
➤ 对比实验

- 以边界固定的坡位单元进行BMP情景优化得到的第100代Pareto解集作为初始情景, 应用边界动态调整策略
- 直接应用边界动态调整策略进行BMP情景初始化及优化

➤ NSGA-II优化算法参数设置

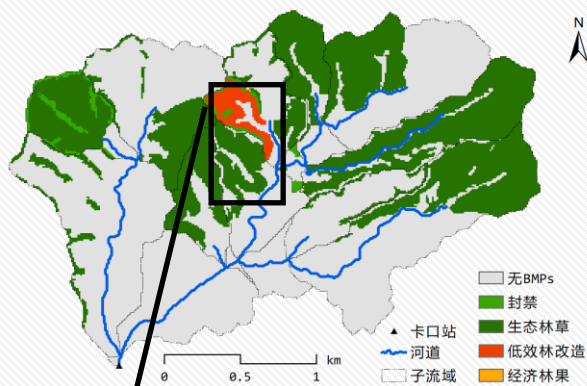
- 边界调整可选阈值设置为 ± 0.2 、 ± 0.15 、 ± 0.1 、 ± 0.05
- 初始种群规模480, 最大进化代数50, 交叉概率0.8, 变异概率0.1

6) 对比评价实验2——Pareto解集分布及Hypervolume指数

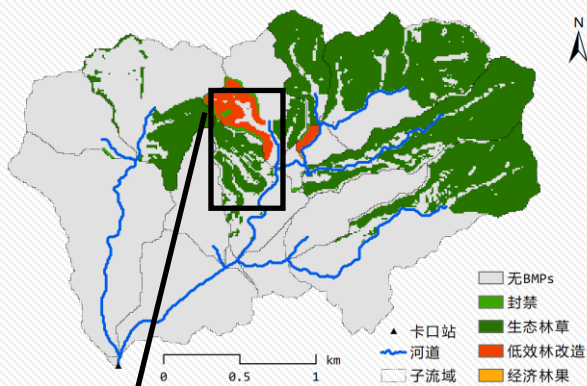
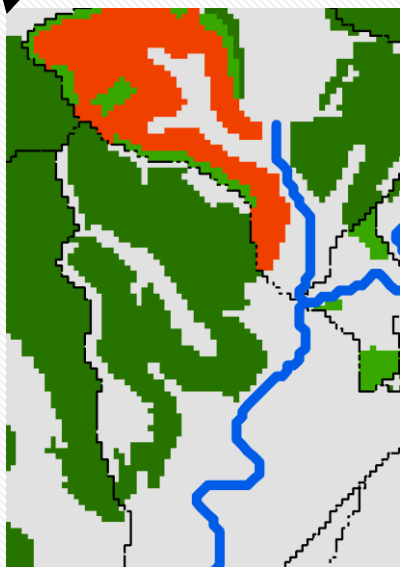


- ✓ 基于坡位单元边界优化的BMP情景优化能够显著扩大解空间、得到综合成本-效益更优的BMP情景集，且具有更高的优化效率。

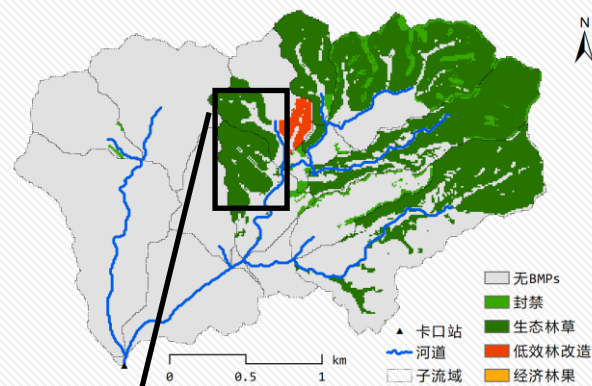
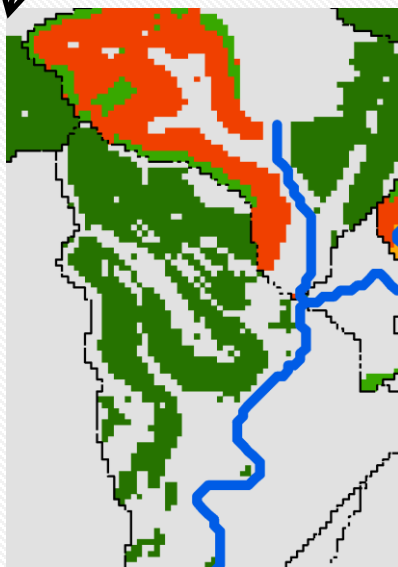
6) 对比评价实验2——空间分布对比



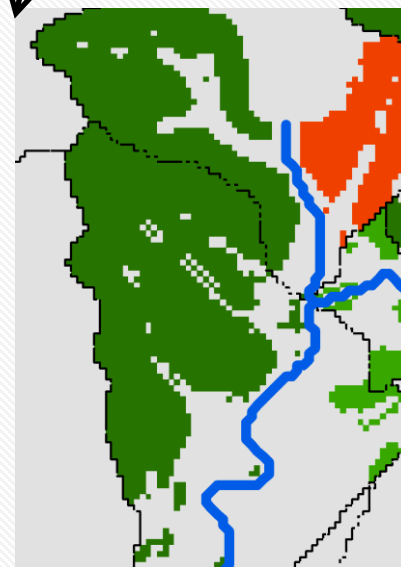
(a) 固定边界



(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 小结与展望

针对现有显式考虑地理对象空间关系的BMP空间配置优化方法尚处于起步探索阶段，而未能有效考虑BMP效益受坡面不同地形部位影响的问题，提出了将具有**明确地学含义且具有空间渐变、边界模糊特征的坡位单元**作为BMP空间配置单元的方法，并基于**SEIMS流域建模框架**实现为一整套**基于边界动态调整坡位单元的流域管理措施空间配置优化方法**。

而仅利用单一地理对象，特别是单一自然地理对象，仍难以表达涉及流域不同层次过程的BMP复杂空间交互关系，限制了优化所得BMP情景的合理性和有效性。因此，**探索利用多种地理对象空间关系表达多类BMP之间复杂多样的空间交互关系是进一步研究的方向**（史亚星等，2021）。



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

谢谢！ 敬请批评指正！

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*, 2021, 45(2):207–227.

史亚星, 朱良君*, 秦承志, 朱阿兴. 基于坡位-地块单元的流域最佳管理措施空间优化配置方法. *地球信息科学学报*, 2021, 23(4): 564–575.

朱阿兴, 朱良君*, 史亚星, 秦承志, 刘军志. 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*, 2019, 38(8): 1111–1122.

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.



zlj@reis.ac.cn

<https://zhulj.net>