

基于流域系统模拟—情景优化的 精细治理决策支持方法

秦承志^{1,2}, 朱良君^{1,2}, 申 申¹, 吴 彤^{1,2}, 肖桂荣^{3,4}, 吴 升^{3,4},
陈芸芝^{3,4}, 汪小钦^{3,4}, 冯险峰^{1,2}, 朱阿兴^{1,2,5,6}, 陆 锋^{1,2}

(1. 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, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 数字中国研究院(福建), 福州 350108;
4. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350108; 5. 南京师范大学
地理科学学院, 南京 210023; 6. 威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 美国麦迪逊 WI 53706)

摘要: 面向美丽中国生态文明建设所需, 亟待有效实现流域精细治理的科学决策, 以根据流域综合治理愿景目标, 优化流域管理措施(BMP)的空间布局方案(即BMP情景)、制定符合实际需求的实施路线图。对此, “流域系统模拟—情景优化”方法框架近年展现出广阔应用前景。本文介绍了该框架在应对实际应用需求中尚存的一系列问题, 开展了体系性的方法研究: ① 提出新的流域过程建模框架, 以兼顾建模灵活性和高性能计算、高效实现流域系统模拟; ② 提出以坡位单元作为BMP空间配置单元、并在情景优化过程中可进行单元边界动态调整的BMP情景优化方法, 可有效考虑流域综合治理的经验知识, 保障优化结果合理性; ③ 提出考虑分阶段投资约束的BMP情景实施次序优化方法, 可推荐出符合实际落地需求的实施路线图; ④ 设计研发用户友好的参与式流域规划系统, 供各方利益相关者协商决策。通过典型小流域应用案例验证了上述新方法、工具和原型系统的有效性和实用价值。

关键词: 流域系统模拟; 流域管理措施; 情景分析; 智能优化; 决策支持

DOI: 10.11821/dlxb202401005

1 引言

随着区域资源开发利用强度的加大, 水土流失和非点源污染等生态环境问题日益突出, 造成生态安全、饮水安全、防洪安全和粮食安全等诸多威胁, 亟需以流域为单元进行精细治理^[1-2]。流域最佳管理措施(Best Management Practice, BMP)是通过控制径流、侵蚀及污染物的产生、输移、沉积等过程, 实现防治水土流失和非点源污染等流域生态环境问题的一系列工程措施和管理措施^[3-4]。面向美丽中国生态文明建设目标, 迫切需要实现流域精细治理的科学决策, 即根据流域综合治理的愿景目标, 优化确定BMP空间布

收稿日期: 2023-07-13; 修订日期: 2023-12-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23100503); 国家自然科学基金项目(42101480, 41871362); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(KPI003) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23100503; National Natural Science Foundation of China, No.42101480, No.41871362; Project of Innovation LREIS, No.KPI003]

作者简介: 秦承志(1977-), 男, 山东蒙阴人, 研究员, 中国地理学会会员(S110005928M), 研究方向为流域分析与模拟的智能化地理计算。E-mail: qincz@lreis.ac.cn

通讯作者: 朱良君(1990-), 男, 山东滕州人, 副研究员, 中国地理学会会员(S110014099M), 研究方向为流域系统综合模拟与情景分析。E-mail: zlj@lreis.ac.cn

局方案（即BMP情景），进而对所选情景制定出符合实际的实施路线图，以切实推动实现流域生态环境保护、社会经济效益等多因素相协调的最优化发展目标。

随着地理信息科学的发展进步，流域系统模拟与BMP情景分析方法框架逐渐兴起并被引入流域管理决策之中^[2]，该方法框架也称为“流域系统模拟—情景优化”（简称“模拟—优化”）框架（图1）。该框架基于流域系统的观念，利用能够精细模拟流域各地理过程的流域过程模型，对BMP在空间上的不同配置情景进行模拟，从而可在无需实地实施的情况下，对各种候选情景的生态环境、经济等多方面效益进行快速定量评估，通过与优化算法的结合进一步对BMP情景进行优化，优选出综合效益最大化的BMP情景集，以支持流域精细治理的科学决策制定^[2, 5]。

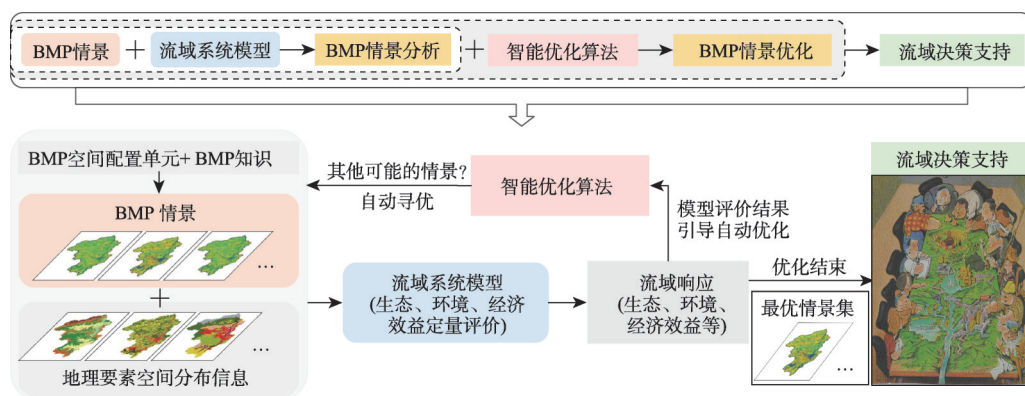


图1 “流域系统模拟—情景优化”方法框架

Fig. 1 Framework of the "watershed system simulation-scenario optimization" methodology

“模拟—优化”方法框架已展现出为流域精细治理需求提供科学决策支持能力的广阔前景^[2]，但其在实际应用落地时还存在一系列问题亟待解决，主要包括：① 如何高效实现流域系统模拟？② 如何有效得到符合实际治理经验的BMP情景（空间布局方案）？③ 如何基于优选出的BMP情景进一步确定符合实际落地需求的分阶段实施路线图？④ 如何有效辅助实际参与决策的各利益相关者针对备选实施路线图协商并达成共识？针对这些应用中的方法和技术问题，本文从GIS角度开展了一系列方法研究和工具研发工作，第2~5节将逐一对上述应用问题进行介绍，论述其研究现状与科学问题，提出方法思路与详细设计，研发工具软件和原型系统，第6节以一个完整的应用案例对上述新方法和新工具进行有效性验证，体现其实用价值，最后一节进行总结和展望。

2 高效流域系统模拟实现

用于BMP情景优化的流域系统模拟所需考虑的自然和人为过程日益要求因地制宜地建模和精细模拟，其应用场景因不同的区域、模拟目标、数据需求、考虑的BMP种类等因素而错综复杂。单一流域过程模型通常难以满足这些复杂的建模场景，亟需灵活可扩展的流域建模框架。同时，流域系统模拟的复杂性和建模数据日益精细的时空分辨率、以及情景优化大量运行流域模型的需求，对流域模型计算性能提出了更高要求。因此，如何高效实现流域系统模拟是有效支撑流域精细治理“模拟—优化”方法框架的一个亟待解决的应用问题。

2.1 研究现状

流域建模框架通过不同角度的模块化设计以支持流域系统模拟, 现有框架多从空间离散化和流域过程描述两方面实现模型结构的灵活可扩展性。空间离散化是指考虑地形、土地利用、土壤等因素, 划分流域过程模拟所用模拟单元的过程, 所划分单元包括子流域、坡面、格网、水文响应单元、河道等。流域过程描述是指基于统计、概念、物理等方法模拟某个或某些流域过程, 如降雨—径流关系法模拟整个流域的产汇流过程, 线性水库法模拟坡面汇流过程, 理查德斯方程模拟入渗产流过程, 运动波方程模拟坡面汇流和河道汇流过程等。现有建模框架多可利用多样的空间离散化方案和流域过程描述方法及其参数设置, 灵活地定制出能在特定应用场景下充分表征各类流域过程的模型^[6-10], 但对计算性能考虑尚有不足, 仅有少量框架引入了并行计算。如 OMS3^[6]和 ECHSE^[7]采用共享内存的多线程编程方法 (如 Open Multi-Processing, OpenMP), 支持同时执行不具有计算顺序依赖的流域子过程模块或空间模拟对象。而仅使用共享内存的并行技术限制了该类框架对具有更高扩展性的分布式内存并行计算平台 (如对称多处理器集群 Symmetric Multi-Processing, SMP) 的利用, 进而限制了其对流域过程模拟可并行性的更深入发掘^[11-12]。

已有研究针对特定的流域过程模型提出了多种可有效利用 SMP 集群和共享内存机器并行计算能力的并行化策略^[13-16], 但鲜见整合到流域建模框架中。这些并行策略涉及较多的并行编程细节, 如计算域划分、任务调度和数据通信等^[15], 对模型开发者的并行编程能力要求较高。同时, 这些并行化流域过程模型的实现通常将并行编程代码与特定的变量、模块等紧密结合, 不具备简洁的标准化接口供扩展新的流域子过程模块, 使得具有较少并行编程经验的研究者难以运用。

因此, 当前仍亟需一个具有良好模块化结构且支持高性能计算的流域建模框架, 以促进多种并行计算平台上流域过程模型的快速开发, 满足 BMP 情景分析中多样化的建模需求。

2.2 高性能流域建模框架 SEIMS

针对上述问题, 设计实现了一个模块化、并行化的高性能流域建模框架 SEIMS (Spatially Explicit Integrated Modeling System)^[12, 17], 总体设计如图 2。SEIMS 主要关注于坡面/壤中流汇流和河道汇流均遵循上下游关系顺序执行的分布式流域过程模型 (图 2a), 并遵循两个基本假设^[12, 14-15, 18]: ① 流域在空间上可离散化为由粗到细不同层级的空

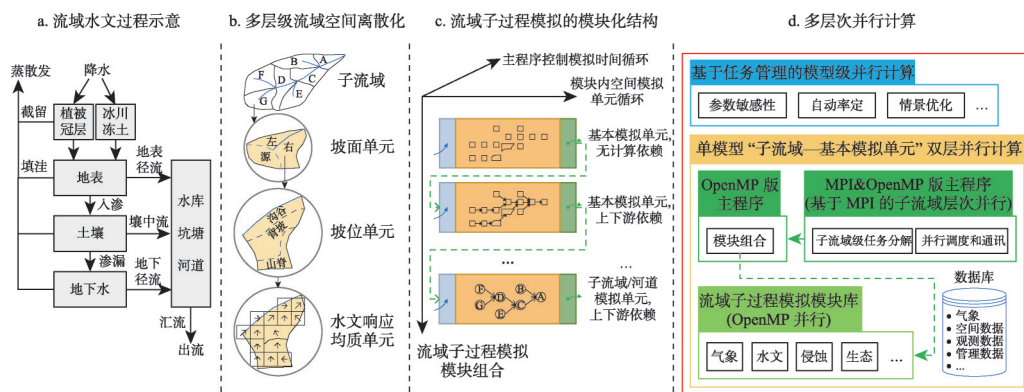


图 2 流域建模框架 SEIMS 的总体设计

Fig. 2 Overall design of the watershed modeling framework of Spatially Explicit Integrated Modeling System (SEIMS)

间单元, 如子流域 (对应河道)、坡面、坡位、水文响应特征相对均质的精细单元 (如栅格、不规则形状地块等) [16, 19-20] (图 2b), 不同流域过程及其模拟算法可在相应的空间单元上执行, 例如垂直和水平方向上的坡面过程可在栅格等精细单元上模拟 (统称基本模拟单元, 图 2c); ② 每类空间单元间均具有基于地形的流向, 流向决定了这些单元进行流域过程模拟的顺序依赖关系, 如坡面/壤中流汇流模拟在每个子流域内部遵循基本模拟单元间的上下游关系 [18] (图 2c), 河道汇流模拟遵循子流域间的上下游关系 [14] (图 2c)。

SEIMS 的设计特点主要包括如下两部分:

(1) 灵活的模块化结构 (图 2c): 基于 SEIMS 的流域过程模型由主程序和若干过程模拟模块构成, 主程序控制模拟过程的时间步长循环, 每个模块对应一种模拟一个或多个流域子过程的算法 (如采用 Penman-Monteith 方法的潜在蒸散发模块), 独立负责空间模拟单元的循环计算。所有流域子过程模块均继承于标准的模块接口, 并在模块元数据中保存输入和输出等信息, 用于校验模块列表是否可耦合为一个模型。

(2) 多层次并行计算中间件 (图 2d): SEIMS 主程序采用 MPI (Message Passing Interface) 和 OpenMP 实现 “子流域—基本模拟单元” 双层并行计算 [12, 18], 即 MPI 控制子流域模拟间的数据通信, 子流域模拟内部通过 OpenMP 实现基本模拟单元层次的并行计算。在模块化设计的支持下, SEIMS 隐藏基于 MPI 的并行编程细节, 模块内部基于 OpenMP 实现的并行计算仅需少量预处理指令, 因此模块开发者可用近乎串行编程的方式快速实现并行化流域过程模型的开发。SEIMS 在子流域层次的并行计算特征还使其可供支持不同子流域采用不同的模型结构 (即所考虑流域子过程组合及其模拟算法和相应的空间模拟单元)。同时, SEIMS 利用 Python 脚本实现模型层次的并行任务调度。

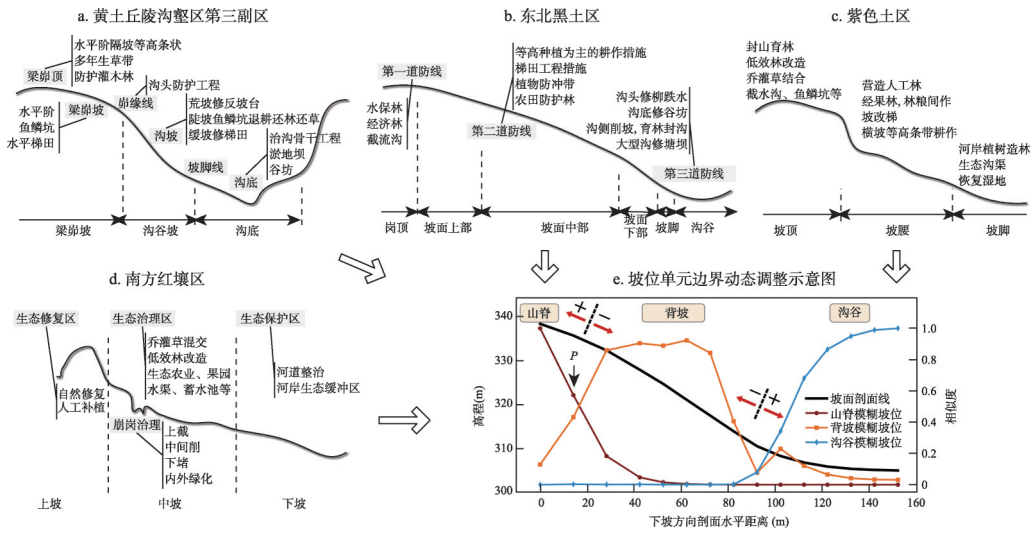
SEIMS 现有模块库多借鉴自 WetSpa (Water and Energy Transfer between Soil, plant, and atmosphere) [21]、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [22]、LISEM (Limburg Soil Erosion Model) [23]、DHSVM (Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model) [24]、RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System) [25] 等模型, 可构建次降水和日尺度流域过程模型。SEIMS 的具体实现已经代码开源 (<https://github.com/lreis2415/SEIMS>), 并在持续迭代研发。

3 符合实际治理经验的 BMP 情景有效获取

BMP 种类多样, 具有不同的生态环境效益产生机理, 所得效益通常具有空间差异和时间变化的特征。流域综合治理的长期实践中, 通过选取多种类型 BMP、布设在流域不同空间位置, 并考虑 BMP 之间的组合效应, 逐渐定性地形成各具地方特色的经验性治理知识, 并进一步总结为流域综合治理模式 [26] (如图 3a~d 所示的小流域水土保持综合治理模式)。在 “模拟—优化” 方法框架中, BMP 情景的设计通常是将选定的 BMP, 按照 BMP 知识和特定的配置策略 (如随机配置), 配置在流域离散化空间单元上 (如子流域、水文响应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU))。因此, 如何选取 BMP 空间配置单元、设计 BMP 配置策略及相应的情景优化方法, 是得到符合实际治理经验的 BMP 情景的关键。

3.1 研究现状

BMP 空间配置单元的选取, 直接影响 BMP 配置策略的设计, 进而影响 BMP 情景优化方法的设计、有效性和计算效率 [28]。现有研究常采用子流域、HRU (特指 SWAT [22] 模型



注：图a~d基于蔡强国等^[26]绘制；图e基于Zhu等^[27]绘制。

图3 中国不同水蚀区的小流域水土保持综合治理模式和模糊坡位信息及坡位单元边界动态调整示意图

Fig. 3 Integrated watershed management scheme for soil and water conservation in different water erosion regions in China and the schematic diagram of boundary adjustments of slope position units based on fuzzy slope positions along a hillslope

中的HRU)、农场或地块作为BMP空间配置单元^[29]。值得注意的是，BMP空间配置单元不必要与流域过程模拟所用的模拟单元一致^[28]。

子流域单元适用于所选BMP在子流域内部的潜在布设位置已预先定义的情形^[30]，由于单元较粗略而不易表达BMP之间的交互关系。子流域内部细分的HRU单元或具有明确空间位置的HRU单元^[31]虽然可方便地兼容SWAT模型的模拟单元，但难以显式定义其空间上下游关系，同样难以表达BMP间的相互影响^[32]。少数研究采用地块单元，通过定义流域全局的上下游关系可表达BMP间的相互影响^[33]，并对BMP情景的实施具有较强的可操作性，但是地块单元与坡面地形部位关系较弱，难于体现坡面自上而下多种BMP间的空间交互。

因此，现有BMP空间配置单元不易表达流域综合治理经验模式中定性的BMP间空间交互关系，且多数单元的划分受现有土地利用和土壤类型等边界的影响，难以从空间配置单元边界调整的角度来扩大情景优化的寻优解空间。

3.2 递进的BMP情景优化方法

解决上述问题的基本思路是：① 流域综合治理经验模式中的定性知识常采用坡面位置来表达，而坡位单元（如山脊、背坡、沟谷等）是自然坡面的基本地形部位单元，体现着地表过程在地形上的综合效应，影响坡面过程，进而影响BMP的环境有效性，同一坡面自上而下构成完整坡位序列，因此适宜表达BMP间交互关系或BMP组合关系、体现流域综合治理经验模式中的定性知识；② 基于数字高程模型（DEM）的地形分析方法可划分出坡位单元，如利用单一地形属性（如距最近河网的高差^[34]）设置划分阈值的方法、利用地形属性集进行聚类的方法^[35]、利用多种地形属性显式定义每类坡位的分类方法^[36]等；③ 坡位普遍具有空间渐变和边界模糊的特点，且已有数字地形分析方法将这种空间渐变信息定量化，如基于原型的模糊坡位方法^[37-38]，同一坡面上相邻两类坡位交替处

的模糊坡位值均较低, 据此将这些位置划为任一类坡位均具合理性, 由此可实现坡位单元边界的动态调整。

根据上述思路, 提出了一系列递进的BMP情景优化方法:

(1) 提出基于坡位单元、考虑沿坡面自上而下BMP间交互关系的BMP情景优化方法, 以体现流域治理经验知识(如下游坡位配置的BMP, 其综合环境效益在半定量的等级上应不小于其上游坡位配置的BMP)^[39], 通过与子流域单元、HRU单元、空间显式HRU单元、具有上下游关系地块单元进行对比, 验证了所提情景优化方法的有效性^[28]。

(2) 在用坡位单元表达坡面BMP组合的基础上, 提出将坡位单元与地块单元叠加生成坡位—地块单元, 用作BMP空间配置单元, 以体现同一地形部位内不同土地利用斑块间的BMP差异, 提高BMP情景设计的灵活性和精细程度^[29]。

(3) 提出基于模糊坡位信息实现BMP情景优化过程中坡位单元边界动态调整的方法, 可显著扩大寻优解空间、提升最优BMP情景集的综合效益^[27]。

4 从BMP空间布局方案到实施路线图

流域综合治理实践中, 通常无法一次性实施完成所选定的BMP情景(空间布局方案), 而是需要综合考虑可用投资、当地政策、人力物力资源等相关现实因素, 确定切实可行的分阶段流域治理计划(或称实施路线图)。因此, 如何针对选定的BMP情景确定出符合现实因素的实施路线, 是有效实现流域精细治理科学决策支持的一个亟待解决的重要应用需求问题。

4.1 研究现状

现有“模拟—优化”方法研究中通常遵循一个理想假设, 即一个BMP情景可以一次性实施完成, 且每个BMP均达到最佳的环境效益, 这导致在优化过程中忽略了一个关键的现实情况: BMP的实施次序。

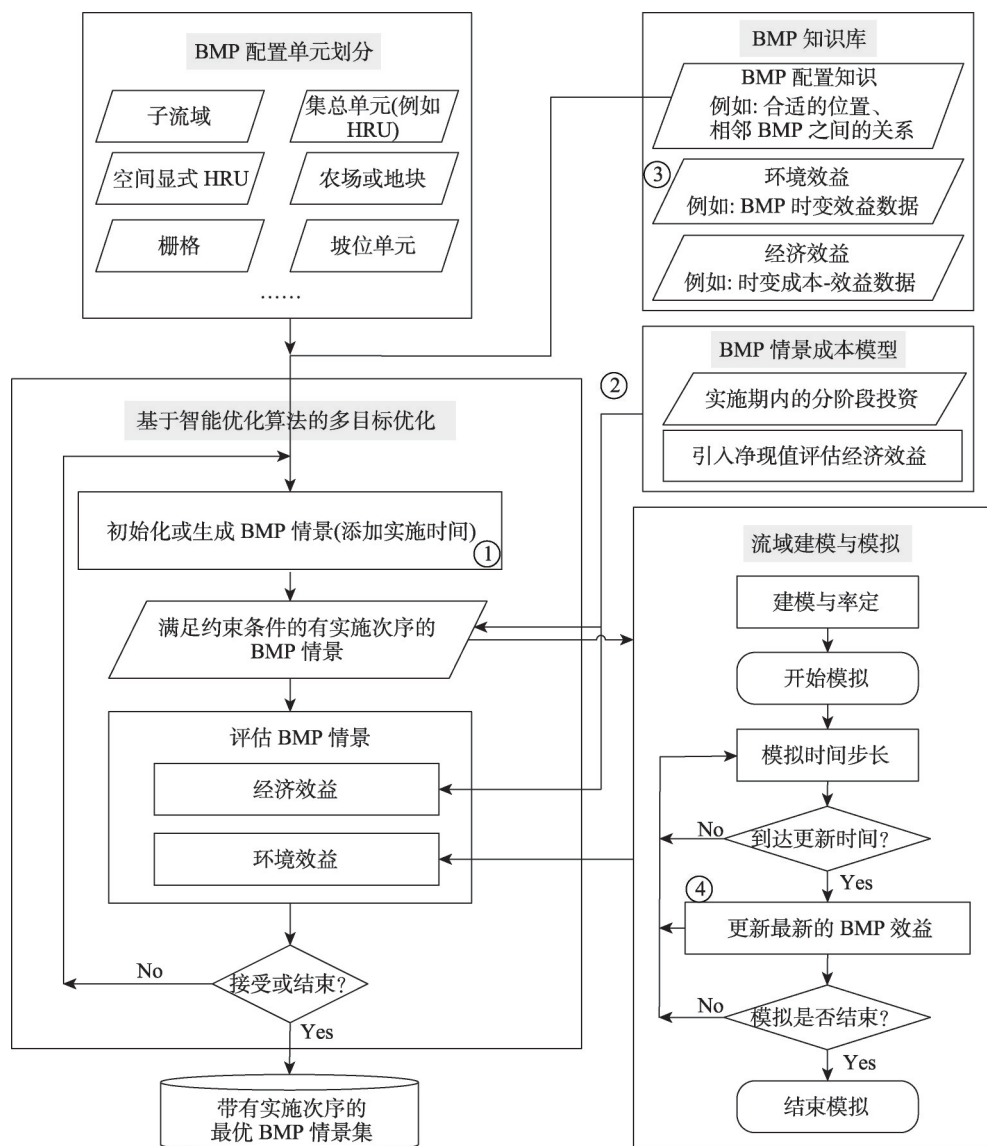
当前仅有少量研究考虑了BMP实施次序, 分两种思路: 一种是将某类空间配置单元(例如农田HRU)在特定决策期间所有可行的BMP实施次序组合, 作为决策变量的选项参与情景优化^[40]; 另一种思路是将不同投资时期内的BMP情景优化作为具有独立环境目标和经济约束的不同优化问题, 依次求解^[41]。前一思路的方法关注单个空间单元规划、主要适合农田轮作情景, 后一思路的方法注重单个投资期的BMP情景规划, 均未从时空整体角度优化BMP实施次序。

因此, 如何对研究区内所有空间配置单元的BMP实施次序在分阶段投资约束下进行整体性的优化, 目前仍缺乏有效的方法。

4.2 考虑分阶段投资和时变效益的BMP实施路线图优化

考虑分阶段投资进行BMP实施次序优化的关键问题是优化目标(如经济成本和环境效益)的合理量化。本文的基本思路是考虑实际经济活动和BMP的生效过程, 合理量化多阶段实施的BMP情景的经济净成本和环境效益。对于经济净成本, 引入“净现值”(Net Present Value, NPV)^[42-43]以更好地体现分阶段投资的动态经济特征; 对于环境效益, 采用BMP环境效益随时间变化理论曲线, 结合离散时间点实测BMP环境效益数据, 以合理确定BMP的时变效益、评估BMP情景的环境效益^[44]。

为实现上述基本思路, 基于前述“模拟—优化”方法框架, 从如下4个方面进行改进(图4), 为决策者提供多阶段的BMP实施方案^[44]: ①在初始化和生成BMP情景时,



注: 修改自 Shen 等^[40]; ①~④标注了对“流域系统模拟—情景优化”方法框架的改进。

图 4 考虑分阶段投资和时变效益的 BMP 实施次序优化方法框架

Fig. 4 Proposed framework for optimizing the implementation plan of best management practices (BMPs), considering stepwise investment and BMP's time-varying effectiveness

扩展了地理决策变量以表达 BMP 的实施时间; ② 将评估分阶段投资的净现值指标加入到 BMP 情景成本模型; ③ 在 BMP 知识库中增加对 BMP 时变效益的形式化表达; ④ 改进流域过程模型以支持 BMP 时变效益。

5 多方利益相关者对 BMP 实施路线图的协商决策

本文提出的 BMP 实施路线图优化方法在实际应用时, 对使用者的专业建模知识要求高, 应用过程复杂。但在实际流域管理规划中, 通常需要不同角色的利益相关者参与讨

论磋商,并最终达成意见一致的实施方案。这些利益相关者来自于各个领域、群体,且多为非建模专业人士。他们代表不同的立场,各自需求不同,甚至彼此需求之间还存在冲突。因此,需要构建流域BMP实施路线图规划工具,以有效降低优化方法对于非建模专业用户的使用门槛,辅助实际中的多方利益相关者更有效地磋商制定流域管理决策。

5.1 研究现状

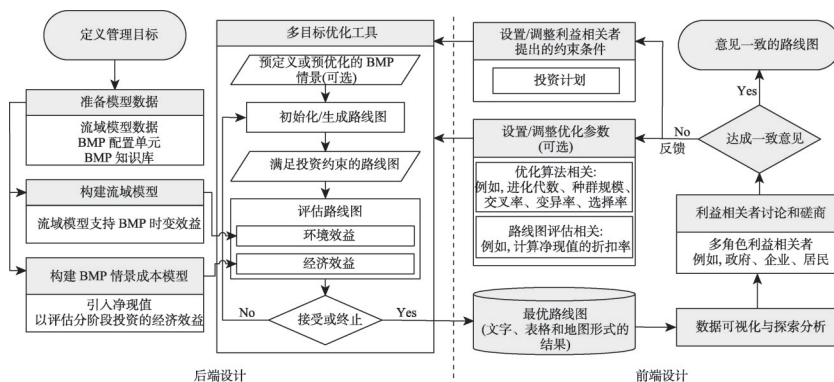
流域精细治理决策制定通常是一个迭代优化的规划过程,流域规划系统可以辅助不同角色的利益相关者(如投资者、农民、公民和当地政府)和专业建模者进行有效沟通,规划出综合最优的BMP情景集。

流域规划系统是在实现前述某种BMP情景优化方法基础上,根据应用需求设计用户交互界面以辅助决策制定。从支持利益相关者参与制定投资方案的角度,与前述BMP实施路线图优化方法的已有思路(第4.1节)类似,目前流域规划系统或将所有利益相关者视为一个角色、支持其提出整体投资约束条件,或是允许利益相关者为多个实施期设置分阶段投资约束^[41, 45-46]。但现有系统尚未支持由多方利益相关者共同参与设定分阶段投资计划、整体性地优化出多阶段实施方案。

5.2 多方参与式的流域BMP实施路线图规划系统

针对上述问题,设计并实现了一个基于网络的参与式流域规划系统,以迭代地辅助各利益相关者设定投资约束、优化路线图、分析结果并达成意见一致的方案^[47]。其设计上需解决两个关键问题:① 该系统应整合实现一种能在分阶段投资条件下整体优化BMP情景实施路线图的方法,同时通过减少需用户设定之处(例如,仅需输入投资约束、直接输出路线图),以简化非专业利益相关者的使用流程;② 该系统需有一个易于使用的交互界面,以方便不同角色的利益相关者参与到优化、分析路线图、并最终达成共识的全过程。

该系统所需的BMP实施路线图优化方法已在本文第4节中提出,其应用涉及高度专业化的建模过程,包括收集建模数据(例如流域建模和BMP知识数据)、针对应用区构建流域模型、对应耦合智能优化算法等(图5),一旦专业建模者根据应用区流域精细治理目标完成这些专业建模流程,系统加以集成后,系统便可只需非建模专业的利益相关者设定简单的输入参数(必需的投资约束、可选的优化参数),之后执行优化计算即可得出相应的路线图(图5)。



注:修改自Shen等^[47]。

图5 BMP情景多阶段实施方案的参与式流域规划系统整体设计

Fig. 5 Overall design of participatory watershed planning system for multistage implementation plans of the best management practices (BMPs) under stepwise investment

基于上述思路,本文采用分层浏览器/服务器(Browser/Server)架构进行流域规划系统的设计与示例实现(图6)。系统主要包括客户端的表现层以及服务器端的软件服务器、数据和硬件服务器层。表现层包括用于用户交互的图形界面、数据可视化和前端业务逻辑,其中前端业务逻辑主要用于通过超文本传输协议(HTTP)请求和接收数据,并调整数据结构,以便图形界面展示。不同用户通过浏览器访问应用程序,无需安装软件或配置环境。



图6 流域规划系统客户端图形界面设计

Fig. 6 Client-side graphic interface design for watershed planning system

6 应用案例

本节选择1个典型小流域坡面土壤侵蚀治理的应用问题进行案例研究, 基于第2节设计的流域建模框架SEIMS构建流域过程模型, 通过设计土壤侵蚀治理措施的情景优化实验对第3~5节提出的方法和系统进行有效性验证与评价。

6.1 研究区和数据来源

研究区位于福建省长汀县河田镇的游屋圳小流域(约5.39 km²)(图7), 以低山和丘陵地貌为主, 海拔295.0~556.5 m, 平均坡度为16.8°, 地形由东北向西南倾斜, 河谷相对平坦宽阔。研究区属中亚热带季风湿润气候, 年均气温为8.3 °C, 年均降水量为1697 mm^[48], 降水的特点是集中而强烈的暴雨, 3—8月总降水量占全年的75.4%。土地利用类型主要是森林(59.8%)、水田(20.6%)和果园(12.8%)。由于水土流失和经济发展对植被的破坏, 森林以次生林或人造林为主, 覆盖率较低^[48]。土壤类型为红壤(78.4%, 主要分布在丘陵地区)和水稻土(21.6%, 主要分布在宽阔的冲积谷地)。研究区地处南方水土流失重点治理县之一, 土壤侵蚀类型主要是重度和中度水蚀。

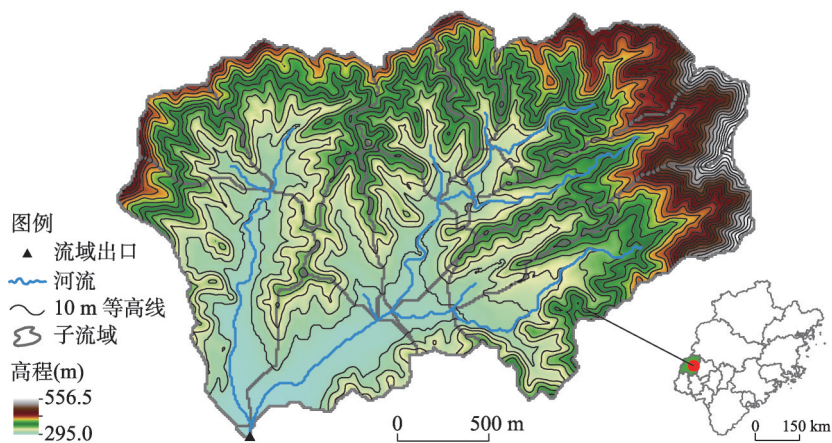


图7 福建省长汀县游屋圳小流域

Fig. 7 The Youwuzhen watershed in Changting county, Fujian province

为研究区流域建模所收集的基本空间数据包括栅格DEM、土壤类型图和土地利用类型图, 空间分辨率均为10 m, 其中DEM通过数字化1:1万地形图后插值得到^[39]。土壤属性通过实地采样(如土壤有机质和机械组成)^[48]以及土壤—植物—空气—水(SPAW)^[49]模型估算(如田间持水量和土壤水力传导率)得出。土地利用或土地覆盖相关参数参考SWAT数据库(如曼宁粗糙度系数)^[50]和研究区相关文献(如通用土壤流失方程USLE的覆盖管理系数^[51])。日尺度气象数据来自距研究区最近的国家气象站和地方监测站, 包括2011—2017年的温度、相对湿度、风速和日照时数、降水等数据。流域卡口站的径流和泥沙数据由长汀县水土保持局提供。

6.2 流域建模

本文采用Zhu等^[28]基于SEIMS构建和校准的日尺度流域模型模拟游屋圳流域的坡面土壤侵蚀量, 该模型以栅格单元作为基本模拟单元, 所考虑的流域过程主要包括水文(潜在蒸散发、冠层截流、土壤入渗、填洼、地表产流、渗漏、壤中流、坡面汇流、地下

水出流及河道汇流)、土壤侵蚀(坡面产沙、坡面及河道泥沙汇流)和作物生长等过程。所采用的流域子过程模拟算法包括 Penman-Monteith 公式模拟潜在蒸散发、WetSpa 中的经验公式和水量平衡法模拟入渗填洼及坡面产流、达西定律和运动波方程逐栅格模拟壤中流汇流、SWAT 中修正的通用土壤流失方程(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)模拟坡面片蚀和细沟侵蚀导致的产沙量等。更多关于模型构建、流域出口径流和泥沙的率定与验证等建模细节可参见 Zhu 等^[28], 模型计算效率情况见 Zhu 等^[17]。

6.3 BMP 的选取及相应数据和知识准备

本文选择研究区当地广泛实施的 4 种有代表性的水土保持 BMP: 封禁、生态林草、低效林改造和经济林果。所选 BMP 可通过长期或短期过程改善土壤性质, 进而促进水土保持、减轻土壤侵蚀, 相应介绍见 Qin 等^[39]。BMP 的环境效益可表现为流域内配置 BMP 区域的土壤性质的改善^[39], 如有机质含量增加、土壤饱和导水率增加等。结合 2000—2008 年间福建省水土保持监测站野外实测的实施不同 BMP 样地土壤性质变化(如有机质含量、容重、总孔隙度等)和 Liu 等^[52]提出的 BMP 时变效益变化理论曲线, 确定了 4 种 BMP 实施后 5 年间的时变环境效益。BMP 的成本—收益数据包括初始实施成本、年维护成本和年收益^[53]。具体的 BMP 环境和经济效益数据参见 Shen 等^[44]。

所考虑的 BMP 空间配置知识包括两方面: ① 每种 BMP 的空间配置知识, 即 BMP 适宜配置的坡位、土地利用类型等; ② 同一坡面上坡位之间配置 BMP 的空间关系, 即下游坡位所配置 BMP 的综合效益等级应不低于上游坡位所配置 BMP。

6.4 BMP 情景优化案例结果评价

为评价本文第 3 节所提新方法的有效性, 设计了两组对比实验:

(1) 采用相同的优化算法设置, 对比坡位单元与现有常用的 3 种 BMP 空间配置单元(水文响应单元 HRU、空间显式 HRU、具有上下游关系的地块)分别应用最佳配置策略的情景优化结果。针对某一类型 BMP 空间配置单元的最佳配置策略应是能够尽可能多地利用 BMP 空间配置知识的策略。对于 HRU 和空间显式 HRU, 由于缺乏显式定义的空间上下游关系, 其最佳配置策略是根据 BMP 适宜配置的土地利用类型进行随机选取配置(称为“适宜策略”), 对于具有上下游关系的地块, 则可在适宜策略的基础上应用上下游关系配置策略^[33](即如果一个空间配置单元已经配置有 BMP, 则其上游空间配置单元无需再配置 BMP, 反之则根据适宜策略随机配置), 对坡位单元则是在适宜策略的基础上考虑同一坡面的自上而下坡位单元之间的空间约束关系^[39]。

(2) 以边界固定的坡位单元 BMP 情景优化结果为初始情景, 应用坡位单元边界动态调整策略, 并与直接应用边界动态调整策略进行 BMP 情景初始化和优化的结果进行对比。详细实验设计参见 Zhu 等^[27-28]。

图 8 为上述实验得到的近似最优 Pareto 解集(即每个“经济净投入—坡面侵蚀减沙率”点对应一个 BMP 情景)和 Hypervolume 指数(即同时考虑解集收敛性和多样性的评价指数, 数值越大解集质量越高), 对比结果表明: ① HRU 单元在净投入较高时、坡位单元则在净投入较低时具有最优的 Pareto 解集, Hypervolume 指数表明坡位单元综合性能最优、HRU 单元最差; 适宜配置策略和上下游关系配置策略缺乏对坡面上 BMP 与地形部位空间关系的考虑, 可能导致不符合实际管理措施经验的 BMP 配置, 如山脊位置处配置低效林改造措施等, 而本文所提出的以坡位单元作为 BMP 空间配置单元, 可基于经验治理知识设定对应的配置策略, 所得到的 BMP 情景能够简洁且精确地配置 BMP, 具有最佳的可实施性, 且经济净投入最低; ② 基于坡位单元边界动态调整的 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, 而从优化之初即直接采用边界动态调整策略时可得到更多的 Pareto 解和最佳的优化效率。

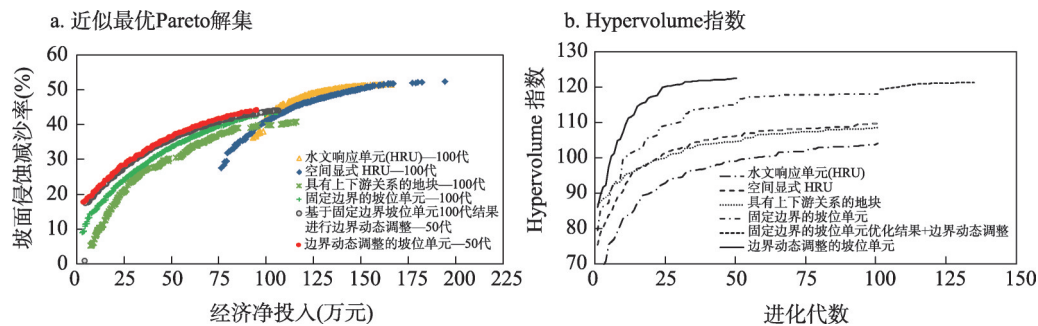
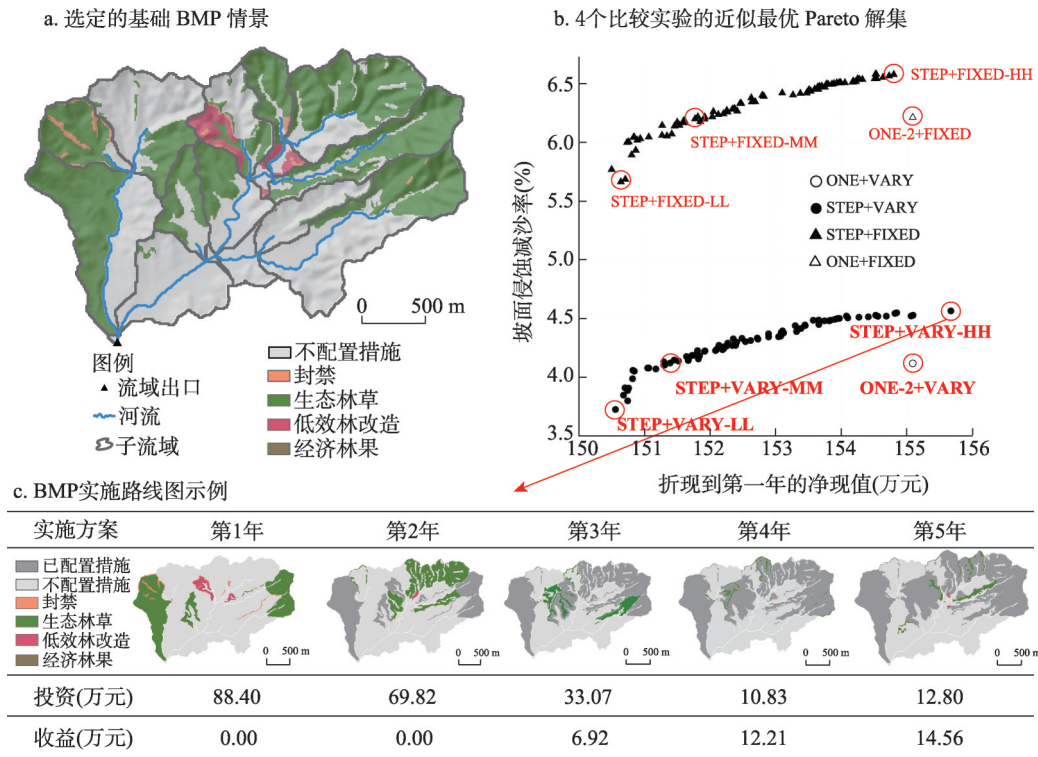


图8 4种BMP空间配置单元应用最优配置策略以及坡位单元应用边界动态调整策略的BMP情景优化结果

Fig. 8 BMP scenario optimization results of four types of BMP configuration units applying optimal configuration strategies and slope position units applying dynamic boundary adjusting strategies

6.5 考虑分阶段投资和BMP时变效益的BMP实施次序优化实验

假定决策者从上一小节所得优化情景集中选定一个BMP空间布局方案做重点考虑(图9a), 进一步应用考虑分阶段投资和BMP时变效益的方法(第4节)进行BMP实施路线图优化。本文设计了4个对比实验, 评估分阶段投资和BMP时变效益对优化实施路线图的影响^[44]: ① 分阶段投资和固定BMP效益 (STEP+FIXED); ② 一次性投资和固定的



注: STEP:分阶段投资;ONE-n:第n年执行一次性投资;FIXED:固定BMP效益;VARY:时变BMP效益;
LL:低NPV和低坡面侵蚀减沙率;MM:中—中;HH:高—高。

图9 考虑分阶段投资和时变效益的BMP实施路线图优化的对比实验结果

Fig. 9 Results of the four comparative experiments for BMP roadmaps considering stepwise investments and time-varying BMP effectiveness

BMP效益 (ONE+FIXED); ③ 分阶段投资和时变BMP效益 (STEP+VARY); ④ 一次性投资和时变BMP效益 (ONE+VARY)。

上述实验所得实施路线图的近似最优 Pareto 解集如图 9b 所示, 分阶段投资 (STEP) 的最佳坡面侵蚀减沙率比 ONE-1 情景 (即第一年做一次性投资) 低约 0.8%~0.9%, 净现值节省了约 7.7 万元, 比需要类似净现值的 ONE-2 情景 (即第二年做一次性投资) 的减沙率高约 0.4%。总的来说, 提出的考虑分阶段投资的 BMP 实施路线图优化方法更符合实际应用中的分阶段投资情况, 可有效提供更多选择, 较第一年投资总额全部到位并实施完成整个 BMP 空间布局的情况而言, 仅有环境效益的轻微损失。

6.6 多角色利益相关者商讨路线图规划模拟实验

为验证本文构建的流域规划系统能够辅助利益相关者参与商讨制定分步投资、切实可行的 BMP 情景实施路线图, 设计了一个不同角色利益相关者商讨路线图规划的模拟实验^[47], 即流域管理者、企业投资者和当地居民依次使用本文构建的系统 (第 5 节) 设置分阶段投资约束, 查看所得实施路线图, 通过讨论达成共识。

3 种角色的利益相关者在考虑投资约束设定和优化结果的基础上, 分别表达自己的意愿, 提出符合自身利益的投资约束条件, 得到了 3 个不同的 Pareto 解集, 很好地反映出利益相关者之间的需求差异, 其相交区域可认为是三方达成共识的区域 (图 10a 中的红框), 该区域内的实施路线图可以满足所有利益相关者的需求, 不同路线图之间存在的差异则体现了 Pareto 解集的多样性, 为决策提供了多种备选方案。

7 总结与展望

面向美丽中国生态文明建设对流域精细治理科学决策支持能力的迫切需求, 本文针对“流域系统模拟—情景优化”框架当前存在的一系列不足开展了系列方法和工具研究, 主要包括:

(1) 针对现有流域建模框架多关注建模灵活性、对计算效率考虑不足的方法问题, 提出了新的流域建模框架, 以兼顾建模灵活易用性和高性能计算, 满足高效实现流域系统模拟的应用需求。

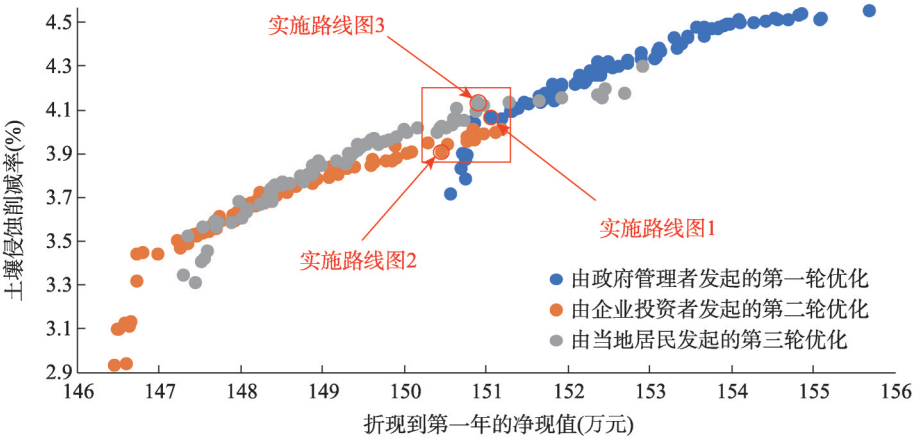
(2) 现有 BMP 情景优化中常用的 BMP 空间配置单元难于体现已有小流域综合治理经验模式中的定性经验知识, 且空间配置单元边界预先固定、在自动优化过程中不允许调整, 不符合实际治理经验, 针对这些不足, 提出以坡位单元作为 BMP 空间配置单元, 并设计了根据坡位空间渐变特征进行单元边界动态调整的 BMP 情景优化新方法, 可有效考虑流域综合治理的经验知识, 保障 BMP 情景优化结果的有效性。

(3) 已有的优化方法常默认所得 BMP 空间布局方案可一次性实施完成, 无法考虑分阶段实施的实际情况推荐切实可行的实施路线图, 针对该问题, 提出根据分阶段投资约束优化 BMP 实施次序的新方法, 可为决策者推荐出符合需求、可落地的实施路线图。

(4) 基于上述方法研究成果研发了多方参与式的流域 BMP 实施路线图规划系统, 以降低实际应用中广大非建模专业用户的使用门槛, 辅助多方利益相关者更有效地参与流域管理决策制定。

本文通过在福建典型小流域中的应用案例, 验证了新方法、新工具的有效性和实用价值, 为有效实现流域精细治理科学决策支持贡献方法、技术和工具研发成果。本文所提的基于坡位单元的 BMP 情景优化系列方法是通用方法, 在应用时不依赖本文所采用的流域过程模型、所考虑的 BMP 类型、所设计的 BMP 空间配置策略等具体实现。

a. 由三方利益相关者依次发起优化所得到的Pareto解集(红框内为三方达成共识的区域)



b. 流域规划系统辅助决策的可视化分析界面

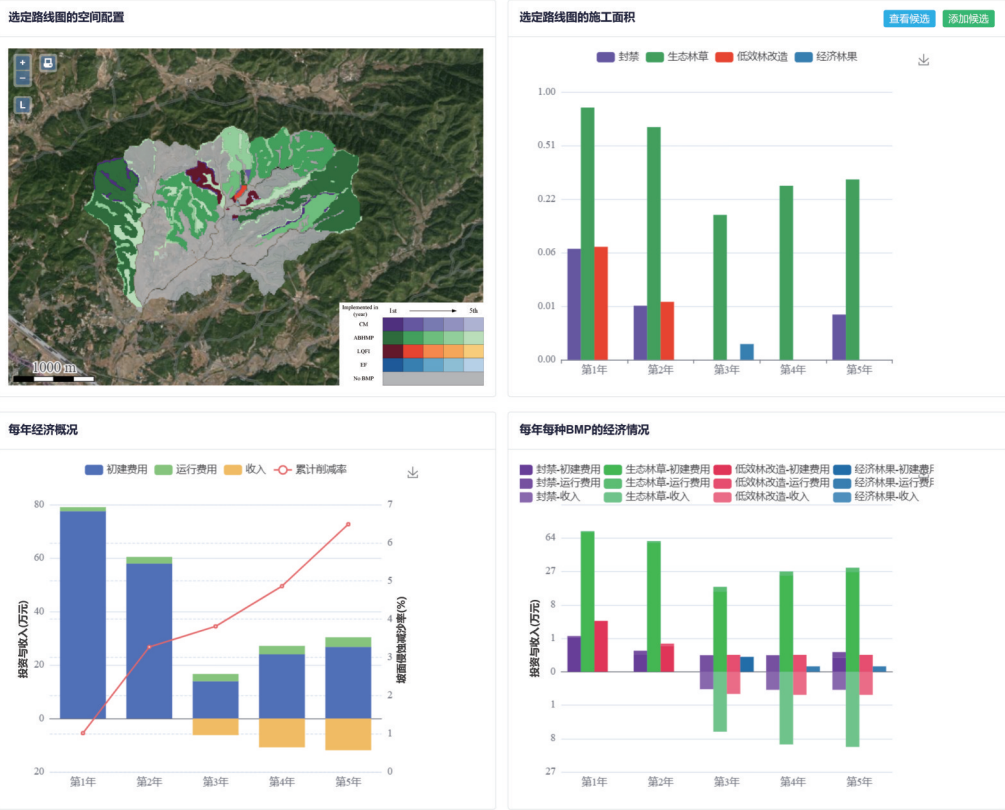


图 10 由三方利益相关者依次发起优化所得到的 Pareto 解集和流域规划系统辅助决策的可视化分析界面

Fig. 10 Pareto solutions of the three optimization rounds launched by three stakeholder groups and the client-side graphical user interface of the watershed planning system

下一步除了继续深化方法研究，还需强化推广应用，包括丰富 SEIMS 可耦合的流域子过程模块和算法、BMP 类型及相应知识，以及不同流域治理需求的应用案例示范等，也包括将本文所提的系列 BMP 情景优化方法与其他流域过程模型和优化算法相结合，以在广泛实际应用中全面检验并推动完善“模拟—优化”方法与技术体系。

参考文献(References)

- [1] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [2] Zhu Axing, Zhu Liangjun, Shi Yaxing, et al. Integrated watershed modeling and scenario analysis: A new paradigm for integrated study of physical geography? *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1111-1122. [朱阿兴, 朱良君, 史亚星, 等. 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.]
- [3] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M. Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 2006, 42(10): W10429. DOI: 10.1029/2006WR004931.
- [4] Meng Fande, Geng Runzhe, Ou Yang, et al. A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1357-1366. [孟凡德, 耿润哲, 欧洋, 等. 最佳管理措施评估方法研究进展. *生态学报*, 2013, 33(5): 1357-1366.]
- [5] Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D, et al. Watershed optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 2002, 38(3): 1021. DOI: 10.1029/2001WR000365.
- [6] David O, Ascough II J C, Lloyd W, et al. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The object modeling system. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 39: 201-213.
- [7] Kneis D. A lightweight framework for rapid development of object-based hydrological model engines. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 68: 110-121.
- [8] Craig J R, Brown G, Chlumsky R, et al. Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 129: 104728. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104728.
- [9] Fenicia F, Kavetski D, Savenije H H G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. *Water Resources Research*, 2011, 47(11): W11510. DOI: 10.1029/2010WR010174.
- [10] Gao H K, Hrachowitz M, Fenicia F, et al. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(5): 1895-1915.
- [11] Liu Junzhi, Zhu Axing, Qin Chengzhi, et al. Parallel computing of watershed process simulation guided by geographical laws. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(5): 506-514. [刘军志, 朱阿兴, 秦承志, 等. 论地理规律对流域过程模拟并行计算的指导作用. *地球信息科学学报*, 2015, 17(5): 506-514.]
- [12] Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. A two-level parallelization method for distributed hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80: 175-184.
- [13] Yalew S, van Griensven A, Ray N, et al. Distributed computation of large scale SWAT models on the grid. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 41: 223-230.
- [14] Wang H, Fu X D, Wang G Q, et al. A common parallel computing framework for modeling hydrological processes of river basins. *Parallel Computing*, 2011, 37(6): 302-315.
- [15] Wang H, Fu X D, Wang Y J, et al. A high-performance temporal-spatial discretization method for the parallel computing of river basins. *Computers & Geosciences*, 2013, 58: 62-68.
- [16] Vivoni E R, Mascaró G, Mniszewski S, et al. Real-world hydrologic assessment of a fully-distributed hydrological model in a parallel computing environment. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 483-496.
- [17] Zhu L J, Liu J Z, Qin C Z, et al. A modular and parallelized watershed modeling framework. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 122: 104526. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104526.
- [18] Liu J Z, Zhu A X, Liu Y B et al. A layered approach to parallel computing for spatially distributed hydrological modeling. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 51: 221-227.
- [19] Bieger K, Arnold J G, Rathjens H, et al. Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(1): 115-130.
- [20] Band L E, Tague C L, Brun S E, et al. Modelling watersheds as spatial object hierarchies: Structure and dynamics. *Transactions in GIS*, 2000, 4(3): 181-196.
- [21] Liu Y B, Gebremeskel S, de Smedt F, et al. Predicting storm runoff from different landuse classes using a geographical information system-based distributed model. *Hydrological Processes*, 2006, 20(3): 533-548.
- [22] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1988, 34(1): 73-89.

- [23] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins (I): Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 1996, 10(8): 1107-1117.
- [24] Wigmosta M S, Nijssen B, Storck P, et al. The distributed hydrology soil vegetation model//Singh V P, Frevert D K. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Littleton: Water Resources Publications LLC, 2002: 7-42.
- [25] Tague C L, Band L E. RHESSys: Regional hydro-ecologic simulation system: An object oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. *Earth Interactions*, 2004, 8(19): 1-42.
- [26] Cai Qiangguo, Zhu Axing, Bi Huaxing, et al. *Paradigms for Integrated Soil and Water Conservation over Main Water Erosions in China*. Beijing: China Water Power Press, 2012. [蔡强国, 朱阿兴, 毕华兴, 等. 中国主要水蚀区水土流失综合调控与治理范式. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [27] 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.
- [28] Zhu L J, Qin C Z, Zhu A X, et al. Effects of different spatial configuration units for spatial optimization of watershed best management practice scenarios. *Water*, 2019, 11(2): 262. DOI: 10.3390/w11020262.
- [29] Shi Yaxing, Zhu Liangjun, Qin Chengzhi, et al. Spatial optimization of watershed best management practices based on slope position-field units. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(4): 564-575. [史亚星, 朱良君, 秦承志, 等. 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.]
- [30] Yang G X, Best E P H. Spatial optimization of watershed management practices for nitrogen load reduction using a modeling-optimization framework. *Journal of Environmental Management*, 2015, 161: 252-260.
- [31] Teshager A D, Gassman P W, Secchi S, et al. Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): Calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit HRUs. *Environmental Management*, 2016, 57(4): 894-911.
- [32] Arnold J G, Allen P M, Volk M, et al. Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(5): 1433-1443.
- [33] Wu H, Zhu A X, Liu J Z, et al. Best management practices optimization at watershed scale: Incorporating spatial topology among fields. *Water Resources Management*, 2018, 32(1): 155-177.
- [34] Nobre A D, Cuartas L A, Hodnett M, et al. Height above the nearest drainage: A hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 2011, 404: 13-29.
- [35] Drăguț L, Blaschke T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 2006, 81(3/4): 330-344.
- [36] MacMillan R A, Pettapiece W W, Nolan S C, et al. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 113(1): 81-109.
- [37] Qin C Z, Zhu A X, Shi X, et al. Quantification of spatial gradation of slope positions. *Geomorphology*, 2009, 110: 152-161.
- [38] Zhu L J, Zhu A X, Qin C Z, et al. Automatic approach to deriving fuzzy slope positions. *Geomorphology*, 2018, 304: 173-183.
- [39] Qin C Z, Gao H R, Zhu L J, et al. Spatial optimization of watershed best management practices based on slope position units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(5): 504-517.
- [40] Bekele E G, Nicklow J W. Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research*, 2005, 41(10): W10406. DOI: 10.1029/2005WR004090.
- [41] Hou J W, Zhu M Y, Wang Y J, et al. Optimal spatial priority scheme of urban LID-BMPs under different investment periods. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103858. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103858.
- [42] Khan M Y, Jain P K. *Theory and Problems in Financial Management*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 1999.
- [43] Žižlavský O. Net present value approach: Method for economic assessment of innovation projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, 156: 506-512.
- [44] Shen S, Qin C Z, Zhu L J, et al. Optimizing the implementation plan of watershed best management practices with time-varying effectiveness under stepwise investment. *Water Resources Research*, 2023, 59(6): e2022WR032986. DOI: 10.1029/2022WR032986.
- [45] Podolak K, Lowe E, Wolny S, et al. Informing watershed planning and policy in the Truckee River basin through stakeholder engagement, scenario development, and impact evaluation. *Environmental Science & Policy*, 2017, 69: 124-

135.

- [46] Vogl A L, Bryant B P, Hunink J E, et al. Valuing investments in sustainable land management in the Upper Tana River basin, Kenya. *Journal of Environmental Management*, 2017, 195: 78-91.
- [47] Shen S, Qin C Z, Zhu L J, et al. 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*, 2023, 342: 118280. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118280.
- [48] Chen Zhibiao, Chen Zhiqiang, Yue Hui. Comprehensive Research on Soil and Water Conservation in Granite Red Soil Region: A case study of Zhuxi watershed, Changting county, Fujian province. Beijing: Science Press, 2013. [陈志彪, 陈志强, 岳辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究: 以福建省长汀朱溪小流域为例. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [49] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569-1578.
- [50] Arnold J G, Kiniry J R, Srinivasan R, et al. Soil and water assessment tool input/output documentation version 2012. Texas Water Resources Institute, 2012.
- [51] Chen S F, Zha X, Bai Y H, et al. Evaluation of soil erosion vulnerability on the basis of exposure, sensitivity, and adaptive capacity: A case study in the Zhuxi watershed, Changting, Fujian province, Southern China. *CATENA*, 2019, 177: 57-69.
- [52] Liu Y, Engel B A, Flanagan D C, et al. Modeling framework for representing long-term effectiveness of best management practices in addressing hydrology and water quality problems: Framework development and demonstration using a Bayesian method. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 530-545.
- [53] Wang Xueqiang. Comprehensive benefits evaluation of soil erosion control models and establishing the control paradigm in red soil region [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. [王学强. 红壤地区水土流失治理模式效益评价及其治理范式的建立[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.]

Methods for supporting decision-making of precision watershed management based on watershed system simulation and scenario optimization

QIN Chengzhi^{1,2}, ZHU Liangjun^{1,2}, SHEN Shen¹, WU Tong^{1,2}, XIAO Guirong^{3,4}, WU Sheng^{3,4}, CHEN Yunzhi^{3,4}, WANG Xiaoqin^{3,4}, FENG Xianfeng^{1,2}, ZHU Axing^{1,2,5,6}, LU Feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350108, China; 4. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of MOE, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 5. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 6. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison WI 53706, USA)

Abstract: The construction of China's ecological civilization, known as "Beautiful China", necessitates implementing precision watershed management through scientifically informed decision-making. This entails optimizing the spatial distribution of watershed best management practices (the so-called BMP scenario) and proposing multistage implementation plans, or roadmaps that align with practical requirements based on the overarching vision of comprehensive watershed management. The "watershed system simulation-scenario optimization" method framework (the simulation-and-optimization-based framework for short) has demonstrated considerable potential in recent years. To address challenges arising from practical applications of this framework, this study systematically conducted the methodological research: (1) proposing a novel watershed process modeling framework that strikes a balance between modeling flexibility and high-performance computing to model and simulate watershed systems efficiently; (2) introducing slope position units as BMP configuration units and enabling dynamic boundary adjustments during scenario optimization, effectively incorporating practical knowledge of watershed management to ensure reasonable outcomes; (3) presenting an optimization method for determining the implementation orders of BMPs that considers stepwise investment constraints, thereby recommending feasible roadmaps that meet practical needs; and (4) designing a user-friendly participatory watershed planning system to facilitate collaborative decision-making among stakeholders. The effectiveness and practical value of these new methods, tools, and prototype systems are validated through application cases in a representative small watershed. This research contributes to advancing precision watershed management and provides valuable insights for sustainable ecological conservation. The methods proposed within the simulation-and-optimization-based framework in this study are universal methods, which means their application does not depend on the specific implementation, such as the watershed process model, the BMP types considered, the designed BMP configuration strategy, and so on. Further studies should be conducted not only to deepen related theory and method research but also to strengthen promotion and application, especially cooperating with local watershed management agents to provide valuable insights for their sustainable ecological conservation.

Keywords: watershed system simulation; watershed management practice; scenario analysis; intelligent optimization; decision support