

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?

朱阿兴^{1,2,3,4,5,6}, 朱良君^{3,6*}, 史亚星^{3,6}, 秦承志^{3,4,6}, 刘军志^{1,2,4}

- (1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023;
3. 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;
4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
5. 威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 美国 麦迪逊 WI 53706; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在全球环境变化和经济快速发展的背景下, 经济发展与资源环境保护之间的矛盾日益激化, 为解决或减弱这一矛盾, 管理者需要新的知识体系和科学的决策工具。自然地理综合研究以自然地理要素空间变化及交互过程为主要研究内容, 肩负着提供管理者所需新知识体系和科学决策工具的责任。流域作为空间上相对封闭的自然地理单元, 其相对独立性为管理者的决策提供了天然的空间单元。流域内各地理要素的空间分布及其过程的交互机理自然成为管理者解决日益激化的矛盾所需的新知识体系, 而流域系统综合模拟恰恰为建立这样的知识体系提供了极为有效的研究方式; 在管理者评价各种决策的成效时, 必须知道各种决策所产生的经济和环境效益, 基于流域系统综合模拟的情景分析为管理者提供了所需要的科学决策工具。因此, 从解决经济发展与资源环境保护之间矛盾的角度出发, 流域系统综合模拟与情景分析应该成为新时代背景下自然地理学综合研究的新范式。文章结合2个小流域情景分析的研究案例, 探讨了以流域系统综合模拟与情景分析为核心的现代自然地理综合研究需要解决的科学挑战, 即流域系统综合模拟的系统化、空间化、量化、易用化和决策化。

关键词:自然地理综合研究; 流域模拟; 流域系统综合模拟; 情景分析; 系统化; 易用化; 决策化

1 现代自然地理学的时代背景

1.1 现代自然地理学的挑战

自然地理学涉及气候、水文、地貌、土壤、生物等多个学科, 聚焦地球陆地表层及其外围的特征和形成过程, 重视地理要素的空间变化和各要素之间

的相互作用, 以认识地球自然环境怎样成为人类活动的基础并受人类活动的影响为目的(蔡运龙等, 2009; 蔡运龙, 2010), 在区域、国家、全球不同尺度下经济发展和环境变化的管理决策中发挥着重要作用(傅伯杰, 2017)。自然地理综合研究以上述各自然地理要素在某个区域范围内的相互作用及其

收稿日期: 2018-08-21; 修订日期: 2018-12-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(41431177, 41871362); 国家重点基础研究发展计划973项目(2015CB954102); 江苏高等学校优秀科技创新团队; 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家“千人计划”; 资源与环境信息系统国家重点实验室自由探索项目(O88RA20CYA)。[**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 41431177 and 41871362; National Basic Research Program of China, No. 2015CB954102; Outstanding Innovation Team in Colleges and Universities in Jiangsu Province; the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD); National “One-Thousand Talent Plan”; Innovation Project of State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System (LREIS), No. O88RA20CYA.]

第一作者简介:朱阿兴(1962—), 男, 浙江长兴人, 教授, 主要从事空间推测制图、流域系统综合模拟与情景分析、地学易计算等研究。E-mail: axing@njnu.edu.cn

***通信作者简介:**朱良君(1990—), 男, 山东滕州人, 助理研究员, 从事流域系统综合模拟与情景分析研究。

E-mail: zlj@lreis.ac.cn

引用格式: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? [J]. 地理科学进展, 38(8): 1111-1122. [Zhu A X, Zhu L J, Shi Y X, et al. 2019. Integrated watershed modeling and scenario analysis: A new paradigm for integrated study of physical geography? Progress in Geography, 38(8): 1111-1122.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.001

空间变化特征为主要研究内容,为解决区域经济发展和自然资源与环境保护之间的矛盾提供科学的决策工具。

人类活动与环境变化的相互影响是当今最为重要的科学问题和社会问题。比如,中国地大物博、经济发展迅速,但与此同时,由于中国人口基数大,使得人均资源占有量少,且经济的飞速发展也带来了各种各样的环境问题,如水资源短缺、洪涝灾害频繁、水体污染、土壤侵蚀、生态退化等(傅伯杰, 2017)。以土壤侵蚀为例,根据第一次全国水利普查中水力侵蚀普查的抽样调查,中国水力侵蚀总面积为 129.32 万 km^2 ,而侵蚀最为严重的黄土高原地区、比较严重的西南紫色土和石灰岩地区,以及东北黑土漫岗区等所在省份的水蚀面积占国土面积的比例可达 24%~44%(刘宝元等, 2013)。资源环境问题已成为制约社会经济可持续发展和人民生活质量提高的重大问题(蔡运龙等, 2004; 蔡运龙等, 2009)。

上述问题给人类可持续发展提出了重大挑战,亟需自然地理学提供科学的理论方法指引(即能解决这样问题的新的知识体系)和决策支持能力(即科学的决策工具)。新的知识体系是指定量刻画地理各要素间的相互作用及其空间变化机理的知识;科学的决策工具是指可以较准确地、定量地预测各可选管理决策各自所产生的经济效益和环境效益,以便管理者根据这些效益客观地选择解决上述矛盾的管理策略。近年来,自然地理学的研究范式也正经历着从知识描述、格局与过程耦合,向复杂人地系统的模拟与预测转变,为自然地理学服务于社会发展提供了更好的条件。因此,聚焦自然和社会的要素与过程综合,探索有效优化资源空间配置的方法,最终为管理决策提供基础科学支持,这是自然地理学发展的长期目标(宋长青, 2016; 傅伯杰, 2017; 刘焯序等, 2018)。

流域作为空间上相对封闭的自然地理单元,是由多种地理要素、多过程间的交互作用构成的“社会-经济-自然”复合系统(傅伯杰等, 2006),是资源环境问题发生的载体。以流域作为整体,研究其环境特征,探索环境问题,恢复生态环境,对促进流域可持续发展具有重要科学价值(王尚义等, 2015)。因此,流域作为区域资源环境问题的敏感区,是认识资源环境问题和应对挑战的最佳研究对象,也是管理者解决或缓解经济发展与资源环境保护之间

矛盾时决策制定的最佳自然体。

1.2 现代科学技术提供的机遇

模型是以观测、模拟实验为基础建立的数学模式,是定量化表达地理过程、探讨自然环境与人文过程耦合变化机制的有效途径(冷疏影等, 2005)。对流域模拟的研究正从单一水文过程的观测与模拟向气候、水文、生态、土壤侵蚀、非点源污染和人类社会活动等多过程耦合的流域系统综合模拟的方向发展(陈腊娇等, 2011; 朱阿兴等, 2012a; 杨大文等, 2018)。流域系统综合模拟为探索各地理要素在流域内的分布及其间的交互作用提供了定量的研究方法,为建立管理者解决经济发展与资源环境保护之间矛盾所需的新知识体系提供了可行的方式(朱阿兴等, 2012a)。

流域系统综合模拟为探索未来情景下的流域响应提供了可能。基于流域系统综合模拟的情景分析是将解决经济发展与资源环境保护之间矛盾的各种策略设计为流域空间管理措施情景,这些情景可以被表达为在流域中与管理措施对应的各地理要素分布的不同组合,利用流域系统综合模拟探索不同组合下流域的环境效益和社会经济效益,从而可以定量分析不同情景的利弊,为制定符合流域管理和发展的决策提供可操作的管理途径(朱阿兴等, 2012a; 傅伯杰, 2018)。因此,基于流域系统综合模拟的情景分析为管理者提供了解决经济发展与资源环境保护之间矛盾的有效科学工具。近年来,基于流域模拟的情景分析逐渐兴起,并被引入到流域管理决策制定中(朱阿兴等, 2012a),如美国农业部的 CEAP 项目(Durancik et al, 2008; Richardson et al, 2008)、加拿大农业部的 WEBs 项目(Liu et al, 2007; Yang et al, 2009)及欧盟的 AgriBMPWater 项目(Turpin et al, 2005)等。

同时,随着地理信息系统和遥感技术的发展,对影响流域过程的地形、植被、土壤等因子的空间变化数据获取日益方便,并且这些数据分辨率越来越高(Ran et al, 2010; Li D R et al, 2012; Li R K et al, 2012),为流域系统综合模拟与情景分析提供了丰富的数据。

计算机软硬件技术的快速发展使得并行计算的门槛不断降低,为开发并行化的流域系统综合模型和并行化的情景分析工具,为大范围、高时空分辨率的流域系统综合模拟与情景分析提供了良好的计算条件(Yalew et al, 2013; Liu et al, 2014; Liu et

al, 2016; 吴辉等, 2016)。同时, 基于 Web 服务和分布式计算的可视化建模工具也使建立易用的流域系统综合模拟与情景分析系统成为可能(Rajib et al, 2016; 江净超等, 2017)。

综上, 模型系统与综合的模拟方法、情景分析技术、数据获取途径和计算机软硬件的发展为自然地理综合研究提供了进一步发展的机遇, 推动自然地理综合研究范式的转变, 即从定性描述、单过程模拟为主转向以定量的、多过程耦合综合模拟与情景分析为核心的新范式。

2 流域系统综合模拟与情景分析

2.1 科学内涵

流域系统综合模拟(也称流域过程模拟、流域模拟)是以流域系统为研究对象, 以综合考虑流域各自然地理过程及过程之间相互作用为指导思想, 构建能够刻画流域内各自然地理过程之间相互作用的综合模型, 通过对流域特征参数(如地形、土壤、植被、气象等)空间分布的定量描述, 模拟流域系统对地理变量变化的响应。流域系统综合模拟是流域管理空间决策支持的核心部分, 包括刻画流域内自然地理过程的模型(流域过程模型)、驱动这个模型的地理要素空间分布信息和模型对这些空

间分布信息的响应(模拟结果)(朱阿兴等, 2012a)(图1)。

情景分析以流域系统综合模型(流域过程模型)为核心, 在利用流域系统综合模型对流域水文、侵蚀、生态等过程定量模拟的基础上, 利用自然地理要素空间分布各种组合代表各种管理措施(情景), 探索各种情景的经济效益(如产量和收入)和生态环境效益(如径流、泥沙、水质等), 通过多目标评价探讨各种措施情景(决策)的利弊, 从而辅助管理决策的制定。情景分析包括体现各管理决策的措施情景(即所涉及地理要素空间分布的不同组合)、根据流域特征率定的流域过程模型、对应不同情景的响应(环境效益和经济效益)以及各情景的环境效益和经济效益分析评价(朱阿兴等, 2012a)(图1)。

2.2 国内外研究进展

2.2.1 流域过程模型

流域过程模型是对流域水文、生态、侵蚀、养分循环等复杂自然地理过程的简化数学表达。从反映水流运动空间变化能力及流域离散化程度而言, 流域过程模型可分为集总式模型、半分布式模型和分布式模型。集总式模型忽略下垫面条件的空间异质性和输入数据空间分布及其不均匀性对流域产汇流的影响, 将整个流域当做一个整体来模拟其径流形成过程(芮孝芳, 2017)。半分布式模型在过

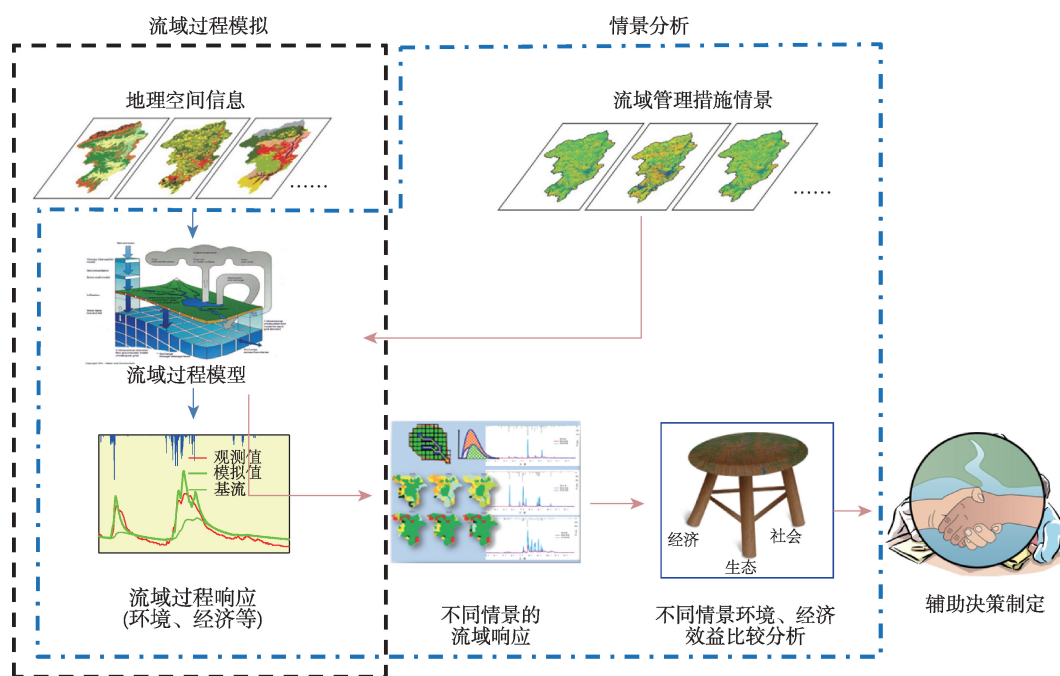


图1 流域过程模拟与情景分析

Fig.1 Integrated watershed modeling and scenario analysis

程模拟时一般只考虑坡面过程水流的纵向运动以及河道过程水流的横向运动,将流域划分成多个不同空间分布的模拟单元,通过河道连接各个模拟单元,最终汇总到流域出口,如 SWAT(Arnold et al, 1998)、AnnAGNPS(Bingner et al, 2001)。分布式模型将流域离散化为很多小的模拟单元(如栅格、地块),在模拟时同时考虑水流、泥沙、污染物等物质在每个单元内的纵向运动以及各个单元之间的横向交换,因此能够精细模拟水流、泥沙、污染物等物质产生和输移过程(芮孝芳, 2017),如 RHESSys(Tague et al, 2004)、LISEM(De Roo et al, 1996)、DHSVM(Wigmosta et al, 1994)、SWAT+(Bieger et al, 2017),是情景分析中所采用流域模型的趋势(Gaddis et al, 2014; Qin et al, 2018)。

随着模拟单元的细化、过程耦合的复杂化和情景的多样化,基于分布式流域模拟的计算量急剧增长,为应对流域综合模拟计算瓶颈,已有研究者利用多核 CPU(Central Processing Unit)、计算机集群等并行计算设备,针对特定模型设计了并行策略以提高计算效率(Li et al, 2011; Wang et al, 2011; Vivoni et al, 2011; Liu et al, 2014; Liu et al, 2016)。不同流域过程模型在模型结构和参数计算等方面虽存在多样性,但其模拟过程均遵循地理规律,因此在可并行性分析中存在共性思路和原则,刘军志等(2015)探讨了空间等级层次结构(如子流域-坡面-地块或栅格)、空间相互作用(如上下游汇流关系)、子过程间依赖关系(如入渗过程之后降雨在地表和地下的子过程计算相互独立)、时空动态变化(如降水的时空差异引起的计算强度分布不均)等地理规律对流域过程模型并行计算的指导作用,认为空间角度的可并行性最高且较容易实现。针对多过程耦合的流域系统综合模拟设计灵活、高效、易用的并行建模框架是需要进一步研究的问题(刘军志等, 2013)。

2.2.2 流域情景分析

流域最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)是针对流域综合治理实施的一系列能够有效控制土壤侵蚀、非点源污染等资源环境问题的有效措施(吴辉等, 2013),因此,现有的不同管理决策基本上是通过不同流域最佳管理措施(BMPs)的组合来体现。

基于 BMPs 的情景分析方法大致可以分为 3 类:一是在关键源区(流域中侵蚀、污染严重区域)识

别(Berry et al, 2005; Renschler et al, 2005; 周慧平等, 2005)的基础上,基于专家知识手动配置不同的 BMPs 情景,利用 BMPs 评价模型进行效益评价,从中选优(Parajuli et al, 2008);二是在 BMPs 配置单元划分的基础上,利用优化算法随机生成初始 BMPs 情景,结合 BMPs 评价模型进行多目标优化,得到最优解集(Srivastava et al, 2003; Gitau et al, 2004; Kalic et al, 2015);三是在第二类方法的基础上,加入专家知识的限制,如预先选定流域中适于 BMPs 实施的配置单元[有可能是地块、水文响应单元(hydrological response unit, HRU)等](Hsieh et al, 2010)或考虑 BMPs 适宜的地形条件(如坡度、地表状态、土地利用等)(Shen et al, 2013; Yang et al, 2015),利用优化算法随机生成 BMPs 配置方案,或者在优化算法中通过加入配置单元与相邻上下游单元的 BMPs 约束规则生成更具地学意义的情景(Qin et al, 2018; Wu et al, 2018; Zhu et al, 2019)。基于关键源区识别的方法需要具备较强的专业知识且配置情景个数有限,有可能错过最优解,因此基于智能优化算法的 BMPs 情景分析将成为主要的研究方向。

BMPs 空间配置(即情景设计)是 BMPs 情景分析中的核心问题,也是提高优化算法效率的有效切入点(Qin et al, 2018; Wu et al, 2018; Zhu et al, 2019)。学者们已经认识到简单地随机配置 BMPs 的方法虽然能够获得数值上的最优解集,但由于 BMPs 情景生成中没有考虑 BMPs 和空间配置单元间的空间关系以及相邻 BMPs 之间的组合关系,很可能产生不合理、不具操作性的解(Qin et al, 2018; Zhu et al, 2019)。因此在情景分析中采用能够体现坡面自然地理过程且具备空间连续变化能力的空间单元(如坡位单元)(Qin et al, 2018),并将流域综合治理经验知识形式化表达为 BMPs 空间配置知识,以提高情景优化效率和最优情景的地学含义是将来的重要研究内容。

2.3 案例分析

本文利用朱阿兴等(2012a; 2012b)中的 2 个案例来说明基于流域综合模拟与情景分析研究范式的基本特点,从而体现基于流域系统综合模拟与情景分析的现代自然地理综合研究范式在管理决策中的作用。所涉及的案例基本代表了管理者在解决经济发展与资源环境保护之间矛盾时需要回答的 2 类问题。第一类问题对应基于自定义管理措施

的情景分析:治理时需要采用什么样的管理措施(BMPs),这些措施应该配置在哪里,配置后它们各自的经济效益和环境效益应该是什么?第二类问题则是对应基于既定目标的管理措施情景分析:在给定的经济和环境治理目标下,所选措施应该在流域的什么部位部署,并且需要实施多大的空间范围?基于对这些问题的答案,管理者可以根据需求,科学地、定量地评价管理决策的利弊,支持决策的制定。

2.3.1 基于自定义管理措施的情景分析

在流域治理决策中,管理者往往首先需要知道各种治理决策的环境效益和经济效益,以便制定符合经济发展和资源环境保护双重目标的决策,自定义管理措施情景分析可以帮助管理者获取这些答案。基本流程是利用可借鉴的已有小流域治理经验,选择适当的管理措施和最适实施部位,人为设计多种治理措施情景,通过流域过程模型模拟和经济模型计算,考虑环境效益和经济效益,选出最佳情景。本案例以流域产沙量控制和经济效益的最大化为情景分析目标,选择坡耕地改水平梯田、坡耕地改等高植物篱、退耕还林等广泛实施的水土保持治理措施进行情景分析。

研究区为位于晋西黄土丘陵沟壑区第一副区的羊道沟小流域(图2),面积0.206 km²,流域内山高坡陡(平均坡度31°),沟壑纵横,水土流失非常严重。土地利用以坡耕地和荒地为主,植被稀少,土壤类型主要为黄绵土和红黏土,土壤抗蚀性差。年均降雨量505.7 mm,降雨集中在5—9月。

本案例选用基于物理过程的半分布式流域过程模型SWAT(Arnold et al, 1998)作为流域过程模型,进行长时段产流产沙过程模拟,以评估管理措施情景长期的环境效益和经济效益。利用1965—1970年的流域出口实测流量和产沙量数据对模型进行率定和验证,以保证模型较准确地刻画该流域内的过程。管理措施情景的经济效益评价采用投

入-产出模型,即通过实施管理措施情景的投入费用(包括一次性投入和逐年投入)和管理措施带来的增收增产的经济收入计算管理措施情景的投资回收年限和回收后年收益。

借鉴黄土区现有的水土保持治理理论和实践研究,本案例设计了4类管理措施情景(表1),情景类型1为全流域坡耕地配置梯田措施(全流域坡耕地改水平梯田),即将流域内的坡耕地全部改为水平梯田;情景类型2为全流域坡耕地配置等高植物篱措施(全流域坡耕地改植物篱);情景类型3为全流域综合治理,即从梁峁顶到沟底,不同部位有针对性地设置管理措施,如梁峁坡上部配置坡耕地改水平梯田,梁峁坡下部在坡度小于25°部位配置等高植物篱,而大于25°部位退耕还草,沟底则退耕还林等;情景类型4为根据流域土壤侵蚀模数图按照一定阈值提取侵蚀严重区域作为关键源区,并按照情景类型3的思路配置管理措施(关键源区综合治理)。

通过流域过程模型模拟和经济效益模型计算可得不同自定义管理措施情景的环境效益(减沙量)和经济效益(表1)。从表1可以看出,坡耕地改水平梯田环境效益高,但投资大且回收慢;坡耕地改等

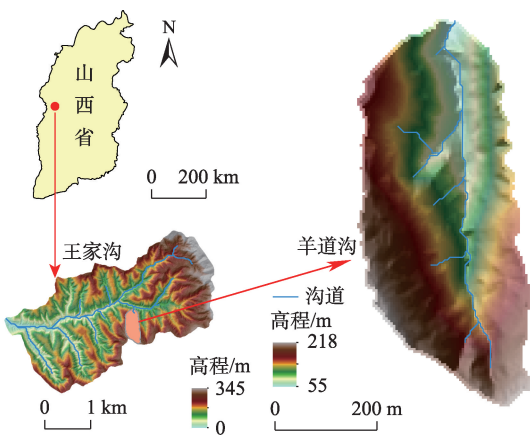


图2 羊道沟小流域空间位置
Fig.2 Location of the Yangdaogou Watershed

表1 羊道沟小流域不同自定义管理措施情景的环境-经济效益

Tab.1 Environmental-economic benefits of different user-defined management scenarios in the Yangdaogou Watershed

管理措施情景	环境效益(减沙)/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	经济效益	
		投资回收年限/a	回收后年收益/元
全流域坡耕地改水平梯田	23401	13	16500
全流域坡耕地改等高植物篱	19839	1	14456
全流域综合治理	20290	7	71122
关键源区综合治理	24025	7	32360

高植物篱投资较少且回收快,但环境效益和投资回收后收益较低;在关键源区配置综合治理管理措施的环境效益高于全流域综合治理,经济投入相当,但收益低于全流域综合治理。因此,环境效益和经济效益是此消彼涨的一对矛盾,管理者可根据这些信息在财政预算和环境治理效益之间进行权衡,做出选择。

2.3.2 基于既定目标的管理措施情景分析

在预期环境效益为主要目标的情况下,管理者往往需要知道达到这些目标时,所采用特定管理措施的空间位置和范围,也就是通过流域过程模型与情景分析回答在流域什么部位、多大面积配置这些管理措施的问题。本案例选用单一水土保持治理措施(即退耕还林),根据既定环境效益目标,确定管理措施的空间分布。

研究区为位于四川省南部县境内的李子口小流域(图 3),属嘉陵江西河流域的中游地区,面积 19.6 km²。土地利用类型主要为人工林地、坡耕地和梯田。土壤则为抗蚀性较差的紫色土。流域多年平均降雨量为 957 mm,暴雨集中的汛期(5—10

月)为土壤侵蚀高发期。

采用王平等(2009)和Zhu等(2013)提出的全分布式概念性土壤侵蚀过程模型模拟流域的产流产沙过程。经过次降水模拟的率定和验证,该模型在李子口小流域能够得到较合理的模拟结果(王平等, 2009; Zhu et al, 2013)。经济效益的计算则同样采用投入-产出模型。

以李子口小流域2004年的一次降雨为例,根据模型模拟的产沙量空间分布,分别提取不同既定环境效益目标下(如 10、20、30、40 和 50 t·km⁻²·a⁻¹)流域内退耕还林的区域,并计算经济效益(表2)。从表2可以看出,随着环境效益目标的提高,退耕还林的面积逐渐增加,相应地,经济投入、回收年限和回收后的年收益也有所提高。因此,管理者可根据既定目标对应选取管理措施情景。

3 自然地理综合研究的新范式

3.1 流域系统综合模拟和情景分析与自然地理综合研究的关系

流域综合管理是自然地理综合研究的重要内容,而流域系统综合模拟与情景分析则为流域综合管理中解决经济发展与资源环境保护之间的矛盾提供了新的知识框架体系和有效的科学工具。这个新的知识框架体系和科学工具与自然地理综合研究有着密切的关系(图4)。

流域系统综合模拟与情景分析主要包括3个大部分:地理空间信息、流域过程模型和流域管理情景(图4),这3个部分其实是自然地理综合研究在流域层面上的具体体现。用于驱动流域过程模型的流域地理空间信息是指流域内地理要素的空间分布特征,这是各部门自然地理研究在流域上的体现,是自然地理综合研究的重要组成部分;而流域

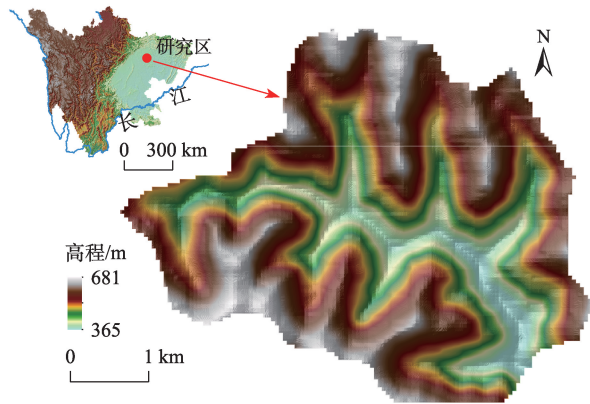


图3 李子口小流域空间位置
Fig.3 Location of the Lizikou Watershed

表2 李子口小流域不同既定目标下管理措施情景的环境-经济效益

Tab.2 Environmental-economic benefits of management scenarios under different stated objectives in the Lizikou Watershed

环境目标(减沙) /(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	退耕还林措施情景	经济效益		
		总投入/元	投资回收年限/a	回收后年收益/元
10	12%的坡耕地改林地	139500	6	1046
20	30%的坡耕地改林地	361500	6	2711
30	55%的坡耕地改林地	661500	6	4961
40	80%的坡耕地和12%的梯田改林地	1341000	9	10058
50	80%的坡耕地和54%的梯田改林地	2782500	9	20868

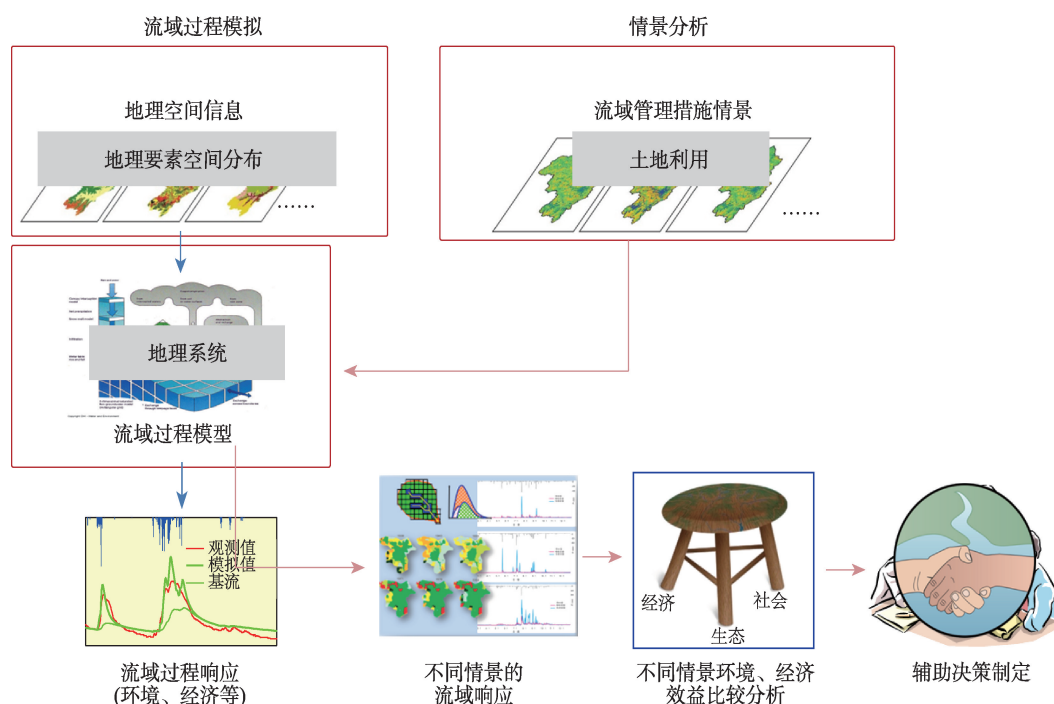


图4 流域系统综合模拟与情景分析和自然地理综合研究的关系

Fig.4 Connection between integrated watershed modeling/scenario analysis and the integrated study of physical geography

过程模型(流域系统综合模型)是指能体现各自然地理过程间相互作用的模型,其重点是各地理要素(过程)之间在流域层面上耦合与交互(地理系统),是自然地理综合研究的核心;情景策略实际上是地表改变策略(是各自然地理要素空间分布组合),往往以土地利用策略体现,这无疑是综合自然地理在社会经济层面的应用和体现。从上面的分析可知,流域系统综合模拟与情景分析是自然地理综合研究的现代延伸,也是自然地理综合研究在这个时代的体现。因此,流域系统综合模拟与情景分析应该是自然地理综合研究的核心部分,也可以说是现代自然地理综合研究的新范式。

3.2 新范式的内涵

以流域系统综合模拟与情景分析为核心的自然地理综合研究的新范式应具有如下几个鲜明的特点和发展方向:

(1) 系统化。流域是一个自然的复杂系统,它不仅包括了自然地理的各要素,而且包括改变这些自然地理要素的人为要素。在这个系统中,不仅各个自然地理要素(过程)间相互作用,而且与人文系统有着双向反馈作用(宋长青, 2016; 傅伯杰, 2017)。因此,流域系统模拟必须从系统的角度着眼,不仅描述各自然地理过程间相互作用(综合),而

且也要刻画自然系统与人文系统间的双向耦合。现有的流域过程模拟绝大部分只侧重单过程模拟,如何在综合考虑自然要素与过程之间交互作用的基础上,进一步考虑人类社会活动对流域系统的影响,构建流域系统综合模型,将是未来流域管理的重要研究内容。

(2) 空间化。在流域中物质和能量不仅在纵向上有交互和耦合,而且由于物质的横向移动产生空间单元之间的交互作用,使这些纵向上的交互和耦合变得带有空间规律的复杂多变(Arnold et al, 2010; 朱阿兴等, 2012a; Qin et al, 2018),这也是自然地理综合研究的核心。若要使基于情景分析的管理策略制定得更科学、更准确,流域系统综合模型必须尽可能地体现这种交互与耦合,特别是它们在空间上的变化(Wu et al, 2018)。现在用于流域情景分析的流域模型绝大部分对空间交互的考虑较为粗略,比如,在 SWAT 模型中水和沙是从每一个 HRU 直接流向流域出口的,因此人们往往说在 SWAT 中水沙是“在空间中飞到沟口的”,对流域内过程的空间交互作用的这种处理显然不够科学。因此,如何在综合模型中充分体现地理要素的空间交互,并且考虑空间单元间的相互作用以及各种管理措施在不同空间配置下的流域整体响应,是有待

深入探索的重要研究方向(朱阿兴等, 2012a)。

(3) 量化。对各种决策情景的分析评价需要量化, 因此决策情景的经济效益和环境效益必须是以定量的方式陈述, 这要求流域模拟不仅要系统化、空间化, 而且必须是对各自然地理过程及其交互和空间变化以定量的方式表达。地理信息系统和遥感技术的发展使得流域模拟所需的地理空间信息越来越丰富(Ran et al, 2010; Li D R et al, 2012; Li R K et al, 2012); 同时, 随着人们对自然过程认识的不断增加, 流域模型也越来越趋向量化。这些为流域系统综合模拟与情景分析的定量提供了条件, 但如何通过对地理信息的定量分析和流域过程的定量模拟, 定量评价各个治理措施的经济、环境效益, 是流域管理的重要研究问题。

(4) 易用化。成功地利用流域模型开展情景分析支持管理决策, 不仅需要应用者充分了解流域内各个过程, 从而为模型准确设置所需的参数和空间数据, 而且需要应用者能从计算技术层面理解模型所需空间数据的组织和模型的运行。但随着流域模型的系统化(综合化)、空间化和定量化, 流域模型变得越来越复杂(蔡运龙, 2010), 利用流域模型开展情景分析的用户绝大部分往往是只对流域的某个(或某些)过程了解, 而对其他过程了解较少, 而且其计算能力往往很难满足这些复杂模型的计算需要, 因此现有的流域模拟需要专业人员来运行, 这强烈限制了管理者或大众用户直接利用流域模型与情景分析的可能性, 阻碍了新范式的推广应用。随着计算机技术的发展, 基于Web服务的可视化建模环境使得用户能够充分利用分布式的计算资源, 增加了模型的重用性, 降低了用户的学习成本, 方便用户灵活操作, 同时用户之间的合作也更加方便, 为流域系统综合模拟与情景分析的发展提供了便捷。如Rajib等(2016)建立了基于SWAT的Web平台SWATShare, 实现了SWAT的在线共享、模拟和可视化, 不仅可以加强科研人员的相互合作, 还可以方便相关领域非专业人员(如决策部门)的使用。如何充分利用计算机技术, 使得流域系统综合模拟与情景分析的应用更加方便灵活, 成为重要的发展趋势。

(5) 决策化。情景分析的目的是辅助流域管理决策的制定。在系统化、空间化、量化的基础上, 情景分析所得的结果必须要回答管理者在解决经济发展与资源环境保护之间矛盾的问题, 使情景分析更好地支持决策; 在易用化的基础上, 基于流域系统综合模拟与情景分析的决策制定将不仅科学

可靠, 而且灵活方便。

4 总结

资源环境问题已成为制约社会经济可持续发展和人民生活质量提高的重大问题, 这些问题对自然地理学提出了综合化和决策化的双重挑战, 即聚焦自然和社会的要素与过程综合, 探索有效优化资源空间配置的方法, 最终为管理决策提供基础科学支持。

流域作为区域资源环境问题的敏感区, 是认识资源环境问题和应对挑战的最佳研究对象。流域系统综合模拟与情景分析以自然地理过程知识为基础, 发挥现代科研技术的优势, 为科学决策提供基础支持。同时, 流域系统综合模拟与情景分析作为相对成熟的研究范式为自然地理综合研究提供了可借鉴思路。随着研究范式不断地实践和发展, 流域系统综合模拟与情景分析显现出系统化、定量化、空间化、易用化和决策化的鲜明特点和发展方向, 将是未来自然地理综合研究的重要内容。

参考文献(References)

- 蔡运龙. 2010. 当代自然地理学态势 [J]. 地理研究, 29(1): 1-12. [Cai Y L. 2010. New perspectives on physical geography. *Geographical Research*, 29(1): 1-12.]
- 蔡运龙, 陆大道, 周一星, 等. 2004. 中国地理科学的国家需求与发展战略 [J]. 地理学报, 59(6): 811-819. [Cai Y L, Lu D D, Zhou Y X, et al. 2004. National demands for and development strategies of Chinese geography. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 811-819.]
- 蔡运龙, 宋长青, 冷疏影. 2009. 中国自然地理学的发展趋势与优先领域 [J]. 地理科学, 29(5): 619-626. [Cai Y L, Song C Q, Leng S Y. 2009. Future development trends and priority areas of physical geography in China. *Scientia Geographica Sinica*, 29(5): 619-626.]
- 陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2011. 流域生态水文模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 30(5): 535-544. [Chen L J, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2011. Review of eco-hydrological models of watershed scale. *Progress in Geography*, 30(5): 535-544.]
- 傅伯杰. 2017. 地理学: 从知识, 科学到决策 [J]. 地理学报, 72(11): 1923-1932. [Fu B J. 2017. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 72(11): 1923-1932.]

- 傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考 [J]. 地理科学进展, 37(1): 1-7. [Fu B J. 2018. Thoughts on the recent development of physical geography. *Progress in Geography*, 37(1): 1-7.]
- 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 2006. 地理—生态过程研究的进展与展望 [J]. 地理学报, 61(11): 1123-1131. [Fu B J, Zhao W W, Chen L D. 2006. Progress and perspective of geographical-ecological processes. *Acta Geographica Sinica*, 61(11): 1123-1131.]
- 江净超, 余洁, 秦承志, 等. 2017. 知识驱动下的水文模型参数智能化设置方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 42(4): 525-530. [Jiang J C, Yu J, Qin C Z, et al. 2017. A knowledge-driven method for intelligent setting of parameters in hydrological modeling. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(4): 525-530.]
- 冷疏影, 宋长青. 2005. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 20(6): 600-606. [Leng S Y, Song C Q. 2005. Review of land surface geographical process study and prospects in China. *Advances in Earth Science*, 20(6): 600-606.]
- 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 2013. 中国水力侵蚀抽样调查 [J]. 中国水土保持, 34(10): 26-34. [Liu B Y, Guo S Y, Li Z G, et al. 2013. Sampling survey of water erosion in China. *Soil and Water Conservation in China*, 34(10): 26-34.]
- 刘军志, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2013. 分布式水文模型的并行计算研究进展 [J]. 地理科学进展, 32(4): 538-547. [Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2013. Review on parallel computing of distributed hydrological models. *Progress in Geography*, 32(4): 538-547.]
- 刘军志, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2015. 论地理规律对流域过程模拟并行计算的指导作用 [J]. 地球信息科学学报, 17(5): 506-514. [Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2015. Parallel computing of watershed process simulation guided by geographical laws. *Journal of Geo-information Science*, 17(5): 506-514.]
- 刘焱序, 杨思琪, 赵文武, 等. 2018. 变化背景下的当代中国自然地理学: 2017全国自然地理学大会述评 [J]. 地理科学进展, 37(1): 163-171. [Liu Y X, Yang S Q, Zhao W W, et al. 2018. Contemporary Chinese physical geography in the context of change: Review of the 2017 National Physical Geography Conference. *Progress in Geography*, 37(1): 163-171.]
- 芮孝芳. 2017. 论流域水文模型 [J]. 水利水电科技进展, 37(4): 1-7, 58. [Rui X F. 2017. Discussion of watershed hydrological model. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 37(4): 1-7, 58.]
- 宋长青. 2016. 地理学研究范式的思考 [J]. 地理科学进展, 35(1): 1-3. [Song C Q. 2016. On paradigms of geographical research. *Progress in Geography*, 35(1): 1-3.]
- 王平, 朱阿兴, 蔡强国, 等. 2009. 概念性土壤侵蚀模型的建立及在紫色土小流域的应用 [J]. 农业工程学报, 25(12): 80-87, 401. [Wang P, Zhu A X, Cai Q G, et al. 2009. Establishment of conceptual soil erosion model and application in purple soil watershed. *Transactions of the CSAE*, 25(12): 80-87, 401.]
- 王尚义, 李玉轩, 马义娟. 2015. 地理学发展视角下的历史流域研究 [J]. 地理研究, 34(1): 27-38. [Wang S Y, Li Y X, Ma Y J. 2015. Historical river basin study under the perspective of developmental geography. *Geographical Research*, 34(1): 27-38.]
- 吴辉, 刘永波, 秦承志, 等. 2016. 流域最佳管理措施情景优化算法的并行化 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 41(2): 202-207. [Wu H, Liu Y B, Qin C Z, et al. 2016. Parallelization of an optimization algorithm for beneficial watershed management practices. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 41(2): 202-207.]
- 吴辉, 刘永波, 朱阿兴, 等. 2013. 流域最佳管理措施空间配置优化研究进展 [J]. 地理科学进展, 32(4): 570-579. [Wu H, Liu Y B, Zhu A X, et al. 2013. Review of spatial optimization algorithms in BMPs placement at watershed scale. *Progress in Geography*, 32(4): 570-579.]
- 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 2018. 水文学研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 37(1): 36-45. [Yang D W, Xu Z X, Li Z, et al. 2018. Progress and prospect of hydrological sciences. *Progress in Geography*, 37(1): 36-45.]
- 周慧平, 高超, 朱晓东. 2005. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法 [J]. 生态学报, 25(12): 3368-3374. [Zhou H P, Gao C, Zhu X D. 2005. Identification of critical source areas: an efficient way for agricultural non-point source pollution control. *Acta Ecologica Sinica*, 25(12): 3368-3374.]
- 朱阿兴, 陈腊娇, 秦承志, 等. 2012a. 水土流失治理新范式: 基于流域过程模拟和情景分析的方法 [J]. 应用生态学报, 23(7): 1883-1890. [Zhu A X, Chen L J, Qin C Z, et al. 2012a. New paradigm for soil and water conservation: A method based on watershed process modeling and scenario analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(7): 1883-1890.]
- 朱阿兴, 陈腊娇, 秦承志, 等. 2012b. 土壤性状空间变化的定量推测和水土流失治理的新范式 [M]// 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: 267-286. [Zhu A X, Chen L J, Qin C Z, et al. 2012b. Prediction of spatial distri-

- bution of soil properties and the new paradigm for integrated soil and water conservation // Cai Q G, Zhu A X, Bi H X, et al. Paradigms for integrated soil and water conservation over main water erosion regions in China. Beijing, China: Water & Power Press: 267-286.]
- Arnold J G, Allen P M, Volk M, et al. 2010. Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance [J]. Transactions of the ASABE, 53(5): 1433-1443.
- Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 34(1): 73-89.
- Berry J K, Delgado J A, Pierce F J, et al. 2005. Applying spatial analysis for precision conservation across the landscape [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 60(6): 363-370.
- Bieger K, Arnold J G, Rathjens H, et al. 2017. Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool [J]. Journal of the American Water Resources Association, 53(1): 115-130.
- Bingner R L, Theurer F D. 2001. AnnAGNPS: Estimating sediment yield by particle size for sheet and rill erosion [C]// Proceedings of the 7th Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada, USA: Subcommittee on Sedimentation Interagency Advisory Committee on Water Data.
- De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J. 1996. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output [J]. Hydrological Processes, 10(8): 1107-1117.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2): 182-197.
- Durancik L F, Bucks D, Dobrowolski J P, et al. 2008. The first five years of the conservation effects assessment project [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 63(6): 185A-197A.
- Fink A, Schlake O. 2000. Scenario management: An approach for strategic foresight [J]. Competitive Intelligence Review, 11(1): 37-45.
- Gaddis E J B, Voinov A, Seppelt R, et al. 2014. Spatial optimization of best management practices to attain water quality targets [J]. Water Resources Management, 28(6): 1485-1499.
- Gitau M W, Veith T L, Gburek W J. 2004. Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction [J]. Transactions of the ASAE, 47(6): 1923-1931.
- Hsieh P H, Kuo J T, Wu E M Y, et al. 2010. Optimal best management practice placement strategies for nonpoint source pollution management in the Fei-Tsui Reservoir Watershed [J]. Environmental Engineering Science, 27(6): 441-449.
- Kalcic M M, Frankenberger J, Chaubey I. 2015. Spatial optimization of six conservation practices using swat in tile-drained agricultural watersheds [J]. Journal of the American Water Resources Association, 51(4): 956-972.
- Li D R, Tong Q X, Li R X, et al. 2012. Current issues in high-resolution earth observation technology [J]. Science China Earth Sciences, 55(7): 1043-1051.
- Li R K, Zhu A X, Song X, et al. 2012. Effects of spatial aggregation of soil spatial information on watershed hydrological modelling [J]. Hydrological Processes, 26(9): 1390-1404.
- Li T J, Wang G Q, Chen J, et al. 2011. Dynamic parallelization of hydrological model simulations [J]. Environmental Modelling & Software, 26(12): 1736-1746.
- Liu J Z, Zhu A X, Liu Y B, et al. 2014. A layered approach to parallel computing for spatially distributed hydrological modeling [J]. Environmental Modelling & Software, 51: 221-227.
- Liu J Z, Zhu A X, Qin C Z, et al. 2016. A two-level parallelization method for distributed hydrological models [J]. Environmental Modelling & Software, 80: 175-184.
- Liu Y, Guo H C, Zhang Z X, et al. 2007. An optimization method based on scenario analysis for watershed management under uncertainty [J]. Environmental Management, 39(5): 678-690.
- Parajuli P B, Mankin K R, Barnes P L. 2008. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT [J]. Agricultural Water Management, 95(10): 1189-1200.
- Qin C Z, Gao H R, Zhu L J, et al. 2018. Spatial optimization of watershed best management practices based on slope position units [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 73(5): 504-517.
- Rajib M A, Merwade V, Kim I L, et al. 2016. SWAT Share - A web platform for collaborative research and education through online sharing, simulation and visualization of SWAT models [J]. Environmental Modelling & Software, 75: 498-512.
- Ran Y, Li X, Lu L. 2010. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China [J]. International Journal of Remote Sensing, 31(2): 391-401.

- Renschler C S, Lee T. 2005. Spatially distributed assessment of short- and long-term impacts of multiple best management practices in agricultural watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6): 446-456.
- Richardson C W, Bucks D A, Sadler E J. 2008. The conservation effects assessment project benchmark watersheds: Synthesis of preliminary findings [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63(6): 590-604.
- Shen Z Y, Chen L, Xu L. 2013. A topography analysis incorporated optimization method for the selection and placement of best management practices [J]. *PLoS One*, 8(1): e54520. doi: 10.1371/journal.pone.0054520.
- Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D. 2003. Watershed optimization of agricultural best management practices: Continuous simulation versus design storms [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 39: 1043-1054.
- Tague C L, Band L E. 2004. RHESSys: Regional hydro-ecologic simulation system-an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling [J]. *Earth Interactions*, 8(19): 1-42.
- Turpin N, Bontems P, Rotillon G, et al. 2005. AgriBMPWater: Systems approach to environmentally acceptable farming [J]. *Environmental Modelling & Software*, 20: 187-196.
- Vivoni E R, Mascaro G, Mniszewski S, et al. 2011. Real-world hydrologic assessment of a fully-distributed hydrological model in a parallel computing environment [J]. *Journal of Hydrology*, 409(1): 483-496.
- Wang H, Fu X, Wang G, et al. 2011. A common parallel computing framework for modeling hydrological processes of river basins [J]. *Parallel Computing*, 37(6): 302-315.
- Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. *Water Resources Research*, 30(6): 1665-1680.
- Wu H, Zhu A X, Liu J Z, et al. 2018. Best management practices optimization at watershed scale: Incorporating spatial topology among fields [J]. *Water Resources Management*, 32(1): 155-177.
- Yalew S, van Griensven A, Ray N, et al. 2013. Distributed computation of large scale SWAT models on the grid [J]. *Environmental Modelling & Software*, 41: 223-230.
- Yang G X, Best E P H. 2015. Spatial optimization of watershed management practices for nitrogen load reduction using a modeling-optimization framework [J]. *Journal of Environmental Management*, 161: 252-260.
- Yang Q, Meng F R, Zhao Z, et al. 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 132(1-2): 23-31.
- Zhu A X, Wang P, Zhu T X, et al. 2013. Modeling runoff and soil erosion in the Three-Gorge Reservoir drainage area of China using limited plot data [J]. *Journal of Hydrology*, 492: 163-175.
- Zhu L J, Qin C Z, Zhu A X, et al. 2019. Effects of different spatial configuration units for spatial optimization of watershed best management practices scenarios [J]. *Water*, 2019, 11(2): 262. doi: 10.3390/w11020262.

Integrated watershed modeling and scenario analysis: A new paradigm for integrated study of physical geography?

ZHU A-Xing^{1,2,3,4,5,6}, ZHU Liangjun^{3,6*}, SHI Yaxing^{3,6}, QIN Chengzhi^{3,4,6}, LIU Junzhi^{1,2,4}

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 5. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the context of the changing global environment and rapidly developing economies, the conflict between economic development and resource/environmental conservation is becoming severe. To resolve or relieve the conflict, decision makers need a new knowledge system and scientific decision-making tools. The integrated study of physical geography, which takes the spatial variation and interaction processes of natural geographic elements as main research contents, has the responsibility of providing the new knowledge system and scientific decision-making tools for decision makers. As a relatively closed and independent spatial unit, the watershed provides a natural spatial unit for decision making. The spatial distribution of geographic elements and the mechanism of their interaction processes inside a watershed become the new knowledge system to resolve or relieve this increasingly intensified conflict. Integrated watershed modeling has become an effective way to build this new knowledge system. The effectiveness of different decisions considering the economic and environmental benefits should be evaluated for decision makers before a final decision, which can be provided by a scenario analysis based on integrated watershed modeling. Therefore, from the perspective of resolving or relieving the conflict between economic development and resource/environmental conservation, integrated watershed modeling and scenario analysis is developing into a new paradigm for the integrated study of physical geography in the new era. In this article, the scientific challenges of the integrated study of physical geography based on integrated watershed modeling and scenario analysis were discussed through two case studies of scenario analysis for watershed management, which basically represent two types of questions that decision makers are concerned with. The first type of questions is which kinds of best management practices (BMPs) should be selected, where these BMPs should be allocated, and what economic and environmental benefits are after the implementation of these BMPs. The second type of questions is that under the given objectives of economic and environmental benefits, where the selected BMPs should be allocated and how large spatial extents they should occupy. In conclusion, the integrated study of physical geography based on integrated watershed modeling and scenario analysis should have the characteristics of systematization, spatialization, quantification, ease of use, and decision-making friendly.

Keywords: integrated study of physical geography; watershed simulation; integrated watershed modeling; scenario analysis; systematization; ease of use; decision-making friendly