

流域最佳管理措施空间配置优化研究进展

吴 辉^{1,2}, 刘永波³, 朱阿兴^{1,4}, 杨典华⁵, 刘军志^{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, 北京 100049; 3. 加拿大圭尔夫大学地理系, 圭尔夫 N1G2W1, 加拿大; 4. 威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 麦迪逊 53706, 美国; 5. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘 要:最佳管理措施(BMPs)是保护流域水环境免受农业生产活动导致的污染的一系列措施。在进行流域尺度BMPs空间配置时,一方面要考虑BMPs的生态环境效益,另一方面要考虑农业经济效益,因此流域管理决策者需要对这些措施进行空间配置优化。最佳管理措施空间配置优化(简称BMPs空间优化)是基于专家经验或者利用优化算法而得出的方案,并通过流域模型和经济模型评价其环境和经济效益,最后选择效益最优的方案,这也是当前农业非点源污染和水环境保护研究的前沿和热点。本文在介绍BMPs及其评价模型的基础上,对当前BMPs空间优化研究中的两种方法进行了剖析,对当前国内外BMPs空间优化研究现状进行了回顾和总结,最后,指出了BMPs空间优化研究中现存的问题,指出了今后BMPs空间优化研究的方向。

关 键 词:最佳管理措施;优化算法;非点源污染;流域模型;空间配置

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.009

1 引言

随着人口增长和工农业发展,水环境恶化已成为许多国家和地区发展的瓶颈,其中由农业活动引起的非点源污染是流域水环境恶化难以得到有效遏制的重要原因(Chen et al, 2008)。近年来,在利用最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)对非点源污染进行治理方面,一些欧美国家和地区开展了许多深入的研究。例如美国的CEAP(Conservation Effect Assessment Project)项目(Gitau et al, 2010)、加拿大的WEBs(Watershed Evaluation of Beneficial Management Practices)项目(刘永波等, 2012),以及欧盟的AgriBMPWater(Systems Approach to Environmentally Acceptable Farming)项目(Turpin et al, 2005)。这些项目的开展,一方面促进了BMPs在这些国家和地区的广泛应用;另一方面,经过多年的研究,一些学者提出了BMPs在流域管理决策的新技术和新方法。

BMPs情景分析是利用流域模型对BMPs在空间上的不同配置情景进行模拟的方法,可以在不进行大范围实地观测的情况下对污染治理措施的有效

性进行评价,具有灵活性和预测性,因而逐渐成为农业非点源污染控制和辅助流域管理决策的重要手段(Duinker et al, 2007)。但是,BMPs情景分析方法主要关注于几个假想设计的情景对流域环境的有效性评价和分析,而无法解决如何对BMPs进行空间配置优化使其达到最优的环境和经济效益的问题。因此,如何进行最佳管理措施空间配置优化是当前流域管理和水环境保护研究的前沿和热点问题。最佳管理措施空间配置优化(简称BMPs空间优化)是基于专家经验或者利用优化算法而得出的BMPs空间配置方案,这些方案通过流域模型和经济模型评价其环境和经济效益,最后选择效益最优的方案(Srivastava et al, 2003),从而为流域管理决策提供技术支撑。目前,国内外对BMPs空间优化已开展了一定深度的研究,并取得了一些研究成果。

本文预期通过对当前流域BMPs空间优化研究进展进行综述,来发现现有研究中存在的问题及潜在的研究方向。为此首先对BMPs及其评价模型作简要介绍,然后综述现有BMPs空间优化方法,以及当前国内外的应用情况,最后对BMPs空间优化研究中存在的关键问题进行讨论。

收稿日期:2012-11; 修订日期:2013-01.

基金项目:国家863计划项目(2011AA120305);中德合作项目(GZ601);科技部国际科技合作项目(2010DFB24140)。

作者简介:吴辉(1983-),男,浙江平湖人,博士研究生,主要从事流域水文模拟与并行计算、BMPs空间优化研究。

E-mail: wuhui@lreis.ac.cn

2 BMPs及其评价模型

2.1 BMPs的含义及其效益评价

BMPs是对流域水文、土壤侵蚀、生态及养分循环等自然过程产生有益于环境的一些措施。一般来说,BMPs分为两类:工程措施和非工程措施(管理措施)。工程措施主要指用于减污、减沙、洪水排控等具有一定物理结构的措施,如沉沙池、过滤带、湿地缓冲区、植物篱等;非工程措施是一些新管理措施的操作程序或现有管理措施的改进,如耕作管理、养分管理、景观管理等。BMPs的实施,一方面,为达到非点源污染控制的环境目标(如N、P负荷削减30%),需要投入一定的建设费、管理费等经济成本;另一方面,相同经济成本但不同空间配置的方案具有不同的环境效益。因此,在实施前有必要对这些方案的效益进行定量评价,以选择效益最高(经济成本最小、污染负荷削减最大)的方案(Merri-man et al, 2009)。

BMPs效益评价包括两个方面:环境效益评价和经济效益评价。环境效益评价主要有定点观测和模型模拟两种方法。定点观测通过观测比较实施治理措施和未实施治理措施时的流域产出(泥沙、氮、磷等污染负荷)来评价措施有效性,但这种方法耗时长,资金、人力、技术投入大,在流域尺度的应用尤其困难(Srivastava et al, 2003)。利用模型模拟方法,在模型参数率定和验证的基础上,分别对未实施BMPs和实施BMPs的两种情景进行对照模拟,根据模拟结果评价措施的有效性;减污率越高,环境效益越好。这种方法耗时短,适合于流域尺度的应用,具有灵活性和预测性。因此,采用模型模拟方法对BMPs进行评价,是当前农业最佳管理措施和非点源污染控制研究中广泛采用的方法(Nendel, 2009)。BMPs经济效益评价包括BMPs成本(如建设费、维护费等)和农户实施BMPs后收益变化(经济收入的增加或减少)两方面。但由于农户收入经济数据难以获取,一般只考虑BMPs成本的计算,成本越小,则经济效益越高。

2.2 BMPs效益评价模型

BMPs的环境效益评价和经济效益评价分别涉及流域模型和经济模型。

流域模型是对流域水文、生态、侵蚀、养分循环等过程的数学表达。根据其建立的途径和所模拟的过程,通常可分为经验模型(empirical model)和物

理模型(physically-based model)或过程模型(process-based model)等。经验模型是在农业非点源污染研究中依据因果分析和统计分析方法建模,以此构建污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系,因而这类模型对数据的要求比较低,实用性较好,但由于其难以描述污染物迁移的路径和转化机理,致使模型的进一步应用受到了较大的限制。过程模型以降雨、蒸发、入渗、产汇流等水文过程为基础,以水为载体描述污染物的输移,同时模拟植被生长、土壤侵蚀、养分循环等过程。虽然过程模型能够较好的描述污染物迁移、转化过程,但是,由于过程模型在建模时需要的输入数据种类更多(如降水、气温、蒸发、地形、土壤、土地利用、农业管理等数据),对时间、空间分辨率要求更精细,参数的设置也需要一定的专业背景,因而它的广泛应用也受到了限制。

从反映水流运动空间变化的能力而言,流域水文模型又分为集总式模型(lumped model)、半分布式模型(semi-distributed model)和全分布式模型(fully distributed model)。集总式模型认为流域表面上各点的水力特征是均匀分布的,对流域表面任何一点上的降雨,其产流、下渗、渗漏等纵向水流运动是相同和平行的,不和周围的水流运动发生任何联系,因此整个流域被当做一个单元体,没有考虑水流在单元体内的横向水流运动。全分布式模型认为流域表面单元上各点的水力学特征是非均匀分布的,水流在流域表面上分布是非均一的,应将流域划分为很多个小单元,考虑水流在每个小单元体内的纵向运动时,也应考虑各个小单元之间水量的横向交换。半分布式模型介于集总式模型和全分布式模型之间,典型代表有TOPMODEL(Beven et al, 1979)、SWAT(Hormann et al, 2009)等模型。

但是,现有模型往往只侧重于对流域某一个或几个过程(如水文、土壤侵蚀、养分循环等)的模拟,而没有完整地对流域中的水文、生态、土壤侵蚀、养分循环和经济等过程及过程之间的相互作用进行详细刻画(陈腊娇等, 2011)。例如TOPMODEL(Beven et al, 1979)、WetSpa(Liu et al, 2003)主要关注流域水文过程的模拟,EPIC(Williams, 1984)、WEPP(Lane, 1987)重点在于土壤侵蚀的预测和模拟,AGNPS(Young et al, 1989)、ANSWERS(Beasley et al, 1980)侧重于水文和养分循环过程的模拟。尽管SWAT(Hormann et al, 2009)、HSPF(Lahlou, 2001)

等少量模型考虑了流域各个过程,但这些模型对流域各子过程之间广泛、复杂的交互作用的刻画有限,尤其对植被—生态—水文过程交互作用的刻画非常薄弱(Chen et al, 2007);同时,这些模型大多为半分布式,对空间单元间物质和能量的交互描述不够,限制了对流域系统的精细模拟。

BMPs经济模型是反映BMPs实施过程中的成本和收益的数学表达,一般借助经济投入(成本)函数和经济回馈(收益)函数来刻画BMPs的效益。成本的计算主要包括BMPs的建设费、维护费及其它杂费。BMPs从设计、投入实施到拆除具有一定的使用年限,因此成本计算函数是关于时间、流域当前状态(如农田景观、地形特征等)、货币利率、BMPs使用年限等的函数。BMPs收益函数反映了BMPs对侵蚀、氮磷污染物质削减功能。BMPs实施后的经济回馈计算主要考察侵蚀、氮磷污染物质在BMPs实施前后的削减量转化为一定数量的货币值。例如,侵蚀、氮磷污染负荷达到一定数量时能够造成当地农业生产的损失,这些损失由于实施了BMPs而被弥补或减少。BMPs实施在不同时间或不同流域空间单元上所获得的收益不同,因此,BMPs收益函数也是关于时间、流域特点等的函数。例如,Ribaud等(1989)计算了每减少1 t土壤侵蚀所获得的收益。Fang等(2003)在量化水质交易的成本—效益时利用一个社会价值(\$2.65/kg)作为削减磷污染的收益。BMPs空间优化研究中,经济评价是一个重要的组成部分,在不同的流域,其经济、社会发展状况不同,因此需要做大量的野外实地调查以获取BMPs经济方面的数据。

3 BMPs空间优化研究现状

最佳管理措施最早应用于农业非点源污染的控制可以追溯到20世纪70年代后期,发展于80年代初期,成型于80年代中后期。主要表现为一些流域尺度的非点源污染模型的出现与应用,如ARM(Donigihan et al, 1978)、AGNPS、ANSWERS、SWRRB(Arnold et al, 1987)、GAMES(Cook et al, 1985)以及HSPF(Johanson, 1984)模型等。这些模型为BMPs在农业流域的有效性评价,以及流域管理决策、生态环境保护等提供支撑。利用流域模型和优化算法进行BMPs空间优化最早出现于1980年,但此时的研究还处于探索阶段,BMPs空间优化研

究的初步发展是在20世纪90年代末和本世纪初(Srivastava et al, 2002)。

3.1 BMPs空间配置优化方法

BMPs空间配置优化方法主要有两种:基于专家经验和关键源区识别的方法和基于优化算法的方法。

3.1.1 基于专家经验和关键源区识别的BMPs空间优化方法

基于专家经验和关键源区(污染物主要产生并具有高迁移风险的区域)识别的BMPs空间优化方法,在BMPs候选方案或情景的设计时,主要关注于那些非点源污染贡献最大的关键源区,而关键源区的识别一般基于专家经验和流域的实际情况,选择某些因子(如源因子、迁移因子等),由专家打分或赋予权重的方法计算出反映污染严重程度的指数,再根据该指数高低来识别关键源区在空间上的分布。专家根据关键源区空间分布,在空间上配置可选的BMPs,形成几个BMPs候选方案,然后利用流域模型对BMPs方案进行评价,根据评价结果择优选择。这种方法的前提是需要对流域特点和当前可选择的BMPs的效果有较深的理解或经验,才能进行BMPs候选方案的设计和制定(Chatterjee, 1997)。

在现有的研究中,一般根据流域特点、农业活动实际情况来设计BMPs空间配置方案。例如Heatwole等(1987)根据研究区的物理特性和农业管理特征,包括土壤水文分组(Hydrologic Soil Group),与河流的邻近程度,以及牲畜养殖密度等;Dickinson等(1990)采用了一种基于一个给定的土壤流失容许值,判断是否超过这个容许值来选择和配置BMPs;Gburek等(2000)利用改进的PI(Phosphorus Index)来识别关键源区,以控制来自农业流域的磷污染;Heathwaite等(2003)基于专家知识和过程模型设计了农业地区污染物模拟框架,来指导农业管理和农业流域污染治理。Strauss等(2007)意在大利的Vico湖流域和澳大利亚的Petzenkirchen小流域,采用基于关键源区识别方法来对BMPs进行优化,目的是为了减少泥沙和磷的流失。

基于专家经验和关键源区识别的BMPs空间优化方法,一方面由于该方法需要对流域的特点、BMPs在该流域的有效性有较深的理解和丰富经验,因此该方法只适合于小流域的BMPs空间优

化,而不适用于水文、侵蚀、生态等过程比较复杂的大流域;另一方面,由于从非常有限的几个候选方案中进行选择,有可能忽略了一些潜在的更好的方案。因此,有学者提出了基于智能优化算法来寻找这些潜在的更好的方案。

3.1.2 基于优化算法的BMPs空间优化方法

智能优化算法是人们受自然界或生物界规律的启发,例如模拟退火算法源于物理中固体物质的退火过程,遗传算法是基于优胜劣汰的自然选择原理(周明, 1999),蚁群算法其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为(段海滨等, 2004),从而设计、形成求解组合优化问题的算法。这些算法一般基于随机搜索算法,根据目标函数来引导搜索的方向。BMPs空间优化实际上也是一个关于空间管理单元(如地块、河道等)及其可选择的几种BMPs的组合优化问题。例如,在利用遗传算法进行BMPs空间优化时,将一定数量的BMPs空间配置方案作为一个种群,种群中的个体(染色体)基因序列代表BMPs在空间管理单元上的配置方案,每个方案利用流域模型等进行评价。例如,通过对方案减污效果的评价来引导整个种群的进化方向,如此逐代进化,当满足终止条件如达到最大进化代数或者某个预定目标时,停止进化,最终得到最优(或近似最优)方案。基于优化算法的BMPs空间优化方法按优化目标数的不同,可以分为单目标优化和多目标优化两种。

单目标BMPs空间优化方法简单地说是以一个优化目标结合约束条件,利用优化算法来搜索满足约束条件的最优方案。该方法建立在以下假设基础之上,即对于给定BMPs成本费用限制条件下,存在一个BMPs空间配置方案使得在流域出口的污染物负荷最小;反之,对于给定的流域出口污染物负荷的限制条件下,存在一个BMPs空间配置方案使得其所花费的成本最小。例如, Srivastava等(2002)以泥沙、氮、磷等污染物小于某个值为限制条件,利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和 AnnAGNPS模型及BMPs成本计算模型,评价每个BMPs方案,搜索净收益最大的BMPs方案; Gitau等(2004)在削减磷污染达60%的限制条件下,以最小化BMPs费用为优化目标,利用GA和SWAT模型及BMPs成本计算工具,优化搜索成本最小的BMPs方案。此外,还有一些研究也在污染物削减或水质条件限制下,利用优化算法和BMPs评价模

型, BMPs费用最小化(Arabi et al, 2006; Chang et al, 2007; Hsieh et al, 2010)。

BMPs在空间上的选择与配置是一个高度复杂的非线性问题,受生态、经济、管理政策等多种因素相互作用的影响,而且在多数情况下,各个因素(目标)是相互冲突的,例如环境效益的改善往往引起BMPs成本的增加。为了达到总体目标的最优化,在BMPs空间优化时需要对各子目标进行折中。单目标优化方法只考虑某种约束条件下的单一目标优化,而没有体现这种多目标下的折中,因此,如何进行BMPs多目标优化是当前BMPs空间优化研究的重要问题。

多目标BMPs空间优化方法与单目标优化方法类似,都是基于优化算法和BMPs评价模型及成本计算模型,评价每个BMPs方案,从而搜索最优方案。它与单目标优化的区别在于:一方面,多目标优化是利用多目标优化算法,该算法能够对各子目标进行折中,使各个子目标都尽可能地达到最优;另一方面,单目标优化的解只有一个,而多目标优化的解并非唯一,它是由众多解组成的Pareto最优集(肖晓伟等, 2011)。Pareto最优集是在其目标函数空间中落在搜索区域的边界线(Pareto最优前沿)上的点集,如图1所示。在进行BMPs空间配置时,决策者可以根据BMPs多目标优化结果(Pareto最优前沿)与当前的经济承受能力、环境目标等相结合,选择最合适的BMPs空间配置方案。例如, Bekele等(2005)、Rabotyagov等(2010)利用多目标进化(SPEA2)算法和SWAT模型,以污染(N、P)负荷的削减量和农业经济收入的最大化为目标进行轮作

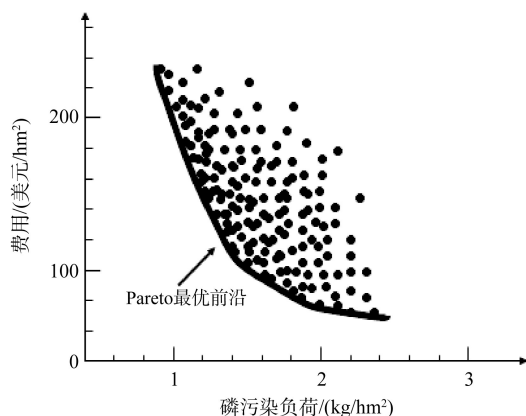


图1 BMPs空间优化Pareto示意图(Maringanti et al, 2011)

Fig.1 The concept of Pareto for BMPs optimization
(Maringanti et al, 2011)

方式、等高耕作等 BMPs 空间优化。Chaubey 等(2009)、Maringanti 等(2011)基于非支配遗传算法 II(NSGA-II)、SWAT 模型及 BMPs 成本计算模型,最小化污染物负荷和 BMPs 费用两个子目标,进行了养分管理、耕作方式、缓冲带等 BMPs 空间优化。

3.2 BMPs 空间配置优化方法的应用

3.2.1 国内应用现状

国内非点源污染研究始于 20 世纪 80 年代, BMPs 空间优化研究出现较晚。近年来,由于农业非点源污染问题越来越受到有关部门和当地政府的重视,一些学者也开始对 BMPs 选择和空间配置优化进行研究,并出现了一些应用案例。例如,刘建昌等(2004)对福建省九龙江西溪五川流域农业非点源污染控制的 BMPs 进行了优化设计,利用 AG-NP 模型模拟等高耕作、多塘系统、及养分管理、植被管理等措施对环境效益的影响,并给出了优化后的 BMP 经济成本和效果。王晓燕等(2009)在北京市密云水库上游流域设计了多种不同 BMPs 情景,在非点源污染控制效果的经济价值估算的基础上,综合考察 BMPs 的费用-效益关系,对其进行优选。王彤(2010)以辽河流域上游铁岭段为例,选取农业生产总值最大化和 COD 排放量最小化为优化目标,对该流域的农业非点源污染控制措施优化进行了研究,并提出了合理发展农业产业的建议。杨育红等(2011)研究了石头门水库莫家沟小流域的 5 种管理措施以削减磷元素污染,设计了 21 种 BMPs 的组合,并对这些组合以实施费用最小和水质目标约束条件建立优化模型,结果表明,化肥减施是最直接有效的农业非点源污染削减措施。研究表明, BMPs 在改善我国农业流域水环境方面具有重要作用;但从总体上来看, BMPs 空间优化研究还未形成理论或方法体系,在进行 BMPs 空间配置优化时, BMPs 评价的定量化及其应用研究仍然十分有限,特别是在流域尺度 BMPs 环境和经济综合评价的定量化的应用研究缺乏。

3.2.2 国外应用现状

相对于国内,国外的 BMPs 空间优化方法的研究及其应用起步较早,并初步形成了以优化算法和 BMPs 评价模型为核心的方法。本文对当前国外 BMPs 空间优化的应用案例,按照优化目标、优化算法、BMP 效益评价模型、管理单元、BMPs 类型,以及研究区(流域)面积进行了总结(表 1)。

从表 1 中可以看出:① BMPs 空间优化目标主

要包括环境目标和经济目标;② 遗传算法在 BMPs 空间优化中应用较多;③ SWAT 模型作为评价模型在 BMP 优化中应用最广;④ 在 BMP 管理单元方面,通常以地块或水文响应单元(HRU)为管理单元,HRU 是 SWAT 模型的计算单元,只有统计意义,没有空间位置信息;⑤ 常见的 BMPs 类型有轮作方式、耕作方式、养分管理、缓冲带等;⑥ BMPs 空间优化研究一般选择中小流域为对象。

研究表明,利用优化算法和模型进行 BMPs 空间优化方法较之基于专家经验的方法具有很多优点,例如,在相同的污染物削减目标下,前者能够找到的 BMPs 方案成本是后者的 1/3;而在相同 BMPs 成本条件下,前者能找到的 BMPs 方案对侵蚀和污染物的削减率约是后者的两倍(Arabi et al, 2006)。因此,从总体来说,基于优化算法的 BMPs 空间优化方法是当前 BMPs 空间配置选择研究中最前沿的方法。但是,由于优化算法本身的问题,如收敛性、参数敏感性及不确定性等问题,现有 BMPs 空间优化研究中鲜有对这些问题进行深入探讨。

综上所述,从国内外 BMPs 空间优化应用研究现状来看,由于数据难以获取、流域建模知识缺乏等限制,国内的研究主要关注于某些特定研究区,而且 BMPs 空间优化还未形成理论或方法体系,很多问题尚需进一步开展研究;而国外的 BMPs 定量化研究由于起步较早,模型和优化方法比较成熟,逐步形成了以优化算法和 BMPs 评价模型为核心的方法,但现有的方法也存在一些问题,有待进一步完善。

4 研究中存在的关键问题

现有的 BMPs 空间优化研究概括起来主要存在以下问题:① 在优化过程中没有考虑空间单元的相互作用(如上游排污对下游的影响);② 利用优化算法重复迭代运行流域模型和经济模型,需要大量的计算时间,导致无法在较大流域开展 BMPs 空间优化研究;③ BMPs 空间优化结果的不确定性问题。

4.1 没有考虑 BMPs 空间相互作用

在实际流域中,一个管理单元上通常有多种可选的 BMPs。在进行 BMPs 的空间配置时通常上游管理单元措施选择一定程度上决定其下游单元措施的选择。例如,如果上游管理单元增加了施肥

表1 国外BMPs空间优化研究案例
Tab.1 Study cases for BMPs optimization abroad

文献来源	优化目标	优化算法	BMP效益 评价模型	管理 单元	BMP类型	研究区面积/ km ²
Srivastava et al, 2002	在污染物限制条件下 最大化净收益	单目标适应打分的GA	AnnAGNPS、Cost model	地块	轮作方式	7.25
Gitau et al, 2004	在减磷目标下最小化 BMPs 费用	单目标适应打分的GA	SWAT、BMP Tool、 BMP Cost	农场	养分管理、河岸缓冲带	3
Arabi et al, 2006	污染物削减转化成经济收益, 与BMPs费用的比值最大化	多目标加权 and 的GA	SWAT、BMP Tool、 BMP Cost	HRU 河道	梯田、草地泄水道、 农田边界	6.23 和 7.3
Chang et al, 2007	在TSS削减目标下最小化 BMPs 费用	多目标加权 and 的分散搜索	WinVAST、BMP Cost	子流域	滞洪池、人工沼泽	20
Hsieh et al, 2010	水质目标限制下最小化 BMPs 费用	多目标加权 and 的GA	BMP 模型、河道模 型、水库水质模型	地块	滞洪池、人工沼泽、 缓冲带	303
Bekele et al, 2005	最大化污染物削减及 农业经济收入	多目标进化算法 SPEA2	SWAT	HRU	轮作方式	133
Chaubey et al, 2009	最小化总污染负荷和 BMPs 费用增加	多目标进化算法 NSGA-II	SWAT、BMP Tool、 BMP Cost	HRU	养分管理、耕作方式、 缓冲带	2520
Rabotyagov et al, 2010	最小化氮、磷削减 最大化及BMPs 费用	多目标进化算法 SPEA2	SWAT、BMP Cost	HRU	轮作方式、等高耕作等	492000
Qi et al, 2011	最小化污染物负荷、BMPs 费用及最大化农业收入	多目标适应打分 (Tabu Search)	AnnAGNPS、 CCHE1D、经济模块	地块	植被缓冲带(VBS)	21.3
Maringanti et al, 2011	最小化污染物负荷及 BMPs 费用	多目标进化算法 NSGA-II	SWAT、BMP Cost	HRU	缓冲带、耕作方式、养 分管理	1956

量,导致上游氮、磷等非点源污染物排放增加,则在下游单元需要采用对这些污染物拦截能力较强的措施,如草地过滤带、河岸缓冲带等;如果上游管理单元采用了退耕还林措施,使上游侵蚀小,则其下游管理单元可减少布设拦沙相关措施。因此,在流域中进行管理措施空间优化配置时应该考虑BMPs 空间的相互作用(Veith et al, 2003)。

现有的BMPs空间优化配置方法,都是基于流域模型对BMPs方案的有效性评价后进行择优选择,通常采用半分布式流域模型作为BMPs方案评价模型(Arabi et al, 2006),鲜有考虑全部分布的流域模型。半分布式流域模型对坡面空间单元间物质和能量交流的描述能力不足,缺乏坡面空间单元之间的相互作用(上下游关系)的描述,无法模拟子流域内上游管理单元实施BMPs对下游管理单元的影响。例如,SWAT模型的HRU作为BMP管理单元在空间上是不连续的,而且每个HRU的水、沙等产量单独计算,最后求和得出整个子流域的总量,然后进行河道演算;因此,在子流域坡面上没有考虑空间单元间物质和能量的交互作用,无法模拟

BMPs空间的相互作用。由于模型忽略了BMPs在坡面空间上的相互作用(Wang et al, 2005),有可能导致优化结果的整体最优性不理想等问题。因此,在今后的研究中,应采用全分布式流域模型作为BMPs评价模型,并对BMPs空间相互作用进行深入研究。

4.2 BMPs空间优化的计算量瓶颈问题

BMPs空间优化的计算时间与流域面积、BMP类型数量、非点源污染模型模拟的精细程度、模拟的时间尺度和时间长短,以及计算机的硬件配置高低有关。例如,在Limbrunner(2008)的研究中,利用GA算法优化面积为64 km²流域的BMP,有32000~59000个BMP空间配置组合情景,普通台式机需要1~2周的计算时间。还有研究指出,利用SWAT模型评价32 km²流域的172个管理措施情景、250个气象预测情景,在单个台式计算机上(Intel Xeon 2.8~3.5GHz 双核,2.5GB 内存)计算需要2.5~3.3年(Gitau et al, 2011)。但是,随着模拟的流域面积逐渐增大、分布式流域模型模拟的时空尺度越来越精细、模拟的时间范围不断变大,BMP情景优化需要

更强的计算能力,普通计算机无法满足这一需求。并行计算、集群计算等高性能计算是解决上述需求的有效途径,在水文模型校正、环境模拟等研究中的应用广泛;但在BMPs空间优化并行化方面的研究还较少。Maringanti等(2009)利用高性能集群(4个计算节点,32个处理器),进行BMPs空间优化,与普通计算机(一个处理器)相比,计算时间减少了90%以上。今后应考虑利用高性能计算在较大流域开展BMPs的精细优化研究,以解决BMPs空间优化的计算量瓶颈问题。

4.3 优化结果不确定性问题

BMPs空间优化的目的是为流域管理政策制定提供决策服务。由于流域自然过程的不可预测性和空间高度异质性,以及缺乏可靠的观测数据,可能导致模型模拟结果的不确定性(Liu et al, 2007),因此有必要进行不确定性研究,以降低决策风险。BMPs选择的不确定性问题研究尚处于初步探索阶段。Parson等(1998)的研究指出,模型模拟中输入参数的不确定性,导致了污染控制的决策风险,通过降低模型输入参数的不确定性,可以指导决策者进行BMP选择,降低决策风险。Srivastava等(2002)的研究也指出,在BMP选择中应考虑不确定性因素,并利用Monte Carlo方法进行更深入的研究,以指导BMP选择。Rabotyagov等(2010)也指出,随着计算机计算能力能的逐渐增强,隐藏在输入数据或水质模型参数背后的不确定性将更好地被刻画。Balana等(2011)综述了当前农业管理的成本—效益分析研究,指出当前多数研究未考虑把成本和效益的不确定性整合在一起进行研究。因此,在今后的研究中,有必要展开BMPs空间优化的不确定性研究,以提高BMPs空间优化结果的置信度,降低决策风险。

5 结语

BMPs空间优化是为了控制与治理农业非点源污染而进行的在空间上优化BMPs配置方案的新方法,它能综合地考虑环境效益与经济效益,利用优化算法搜索最优或近似最优的BMP空间配置方案。BMPs空间优化结果能够为流域管理和决策提供科学依据,对流域的经济、社会与生态环境的可持续发展具有重要意义。本文主要在介绍BMPs及其评价模型的基础上,对当前BMPs空间优化的

方法以及其在国内外的应用现状进行了回顾,最后,并对BMPs空间优化现存的关键问题进行了讨论,提出了今后BMPs空间优化研究的建议和展望。农业BMPs空间优化的研究涉及到水文、生态、社会和经济等多学科交叉问题,需要以流域系统的观点,综合多学科知识进行考察和建模,并且利用最新的高性能计算技术,才能在理论和实际应用上实现新的突破。

参考文献(References)

- Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M. 2006. Cost-effective allocation of watershed management practices using a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 42(10): W10429.
- Arnold J G, Williams J R, Asce M. 1987. Validation of swrrb: Simulator for water-resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2): 243-256.
- Balana B B, Vinten A, Slee B. 2011. A review on cost-effectiveness analysis of agri-environmental measures related to the EU WFD: Key issues, methods, and applications. *Ecological Economics*, 70(6): 1021-1031.
- Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. 1980. Answers: A model for watershed planning. *Transactions of the Asae*, 23(4): 938-944.
- Bekele E G, Nicklow J W. 2005. Multiobjective management of ecosystem services by integrative watershed modeling and evolutionary algorithms. *Water Resources Research*, 41(10): W10406.
- Beven K J, Kirkby M. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24(1): 43-69.
- Chang C L, Chiueh P T, Lo S L. 2007. Effect of spatial variability of storm on the optimal placement of best management practices (BMPs). *Environmental Monitoring and Assessment*, 135(1-3): 383-389.
- Chatterjee A. 1997. Watershed optimization of BMP implementation schemes using genetic algorithms[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University.
- Chaubey I, Maringanti C, Popp J. 2009. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research*, 45: W06406.
- Chen J M, Chen X F, An S Q, et al. 2007. Effects of topography on simulated net primary productivity at landscape scale. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 485-495.

- 585-596.
- 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. [陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 2011. 流域生态水文模型研究进展. *地理科学进展*, 30(5): 535-544.]
- Chen M, Chen J, Sun F. 2008. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 405(1-3): 140-152.
- Cook D J, Dickinson W T, Rudra R P. 1985. GAMES: The Guelph model for evaluating effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation: User's manual. Ontario, Canada: School of Engineering, Ontario Agricultural College.
- Dickinson W T, Rudra R P, Wall G J. 1990. Targeting remedial measures to control nonpoint-source pollution. *Water Resources Bulletin*, 26(3): 499-507.
- Donigihan A S, Davis H H. 1978. User's manual for agricultural runoff management (ARM) model. Washington D.C.: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Duan H B, Wang D B, Zhu J Q, et al. 2004. Development on ant colony algorithm theory and its application. *Control and Decision*, 19(12): 1321-1326. [段海滨, 王道波, 朱家强, 等. 2004. 蚁群算法理论及应用研究的进展. *控制与决策*. 19(12): 1321-1326.]
- Duinker P N, Greig L A. 2007. Scenario analysis in environmental impact assessment: Improving explorations of the future. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(3): 206-219.
- Fang F, Easter K W. 2003. Pollution trading to offset new pollutant loadings: A case study in the minnesota river basin. American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Montreal, Canada: 27-30 July.
- Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. 2000. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, 29(1): 130-144.
- Gitau M W, Chaubey I, Gbur E, et al. 2010. Impacts of land-use change and best management practice implementation in a Conservation Effects Assessment Project watershed: Northwest Arkansas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(6): 353-368.
- Gitau M W, Chiang L C, Sayeed M, et al. 2011. Watershed modeling using large-scale distributed computing in Condor and the Soil and Water Assessment Tool model. *Simulation*, 88(3): 365-380.
- Gitau M W, Veith T L, Gburek W J. 2004. Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction. *Transactions of the Asae*, 47(6): 1923-1931.
- Heathwaite A L. 2003. Making process-based knowledge useable at the operational level: a framework for modelling diffuse pollution from agricultural land. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9): 753-760.
- Heatwole C D, Bottcher A B, Baldwin L B. 1987. Modeling cost-effectiveness of agricultural nonpoint pollution abatement programs on two Florida basins. *Water Resources Bulletin*, 23(1): 127-131.
- Hormann G, Koplin N, Cai Q, et al. 2009. Using a simple model as a tool to parameterise the SWAT model of the Xiangxi River in China. *Quaternary International*, 208(1-2): 116-120.
- Hsieh P H, Liu W C, Kuo J T, et al. 2010. Optimal best management practice placement strategies for nonpoint source pollution management in the Fei-tsui Reservoir watershed. *Environmental Engineering Science*, 27(6): 441-449.
- Johanson R C. 1984. Hydrological simulation program FORTRAN (HSPF): Users manual for release 8.0. Washington D.C.: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Lahlou M. 2001. Better assessment science integrating point and nonpoint sources: BASINS Version 3.0 user's manual. Washington D.C.: Exposure Assessment Branch, Standards and Applied Sciences Division, Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency.
- Lane L J. 1987. USDA, water erosion prediction project (WEPP): Overland flow profile version: User requirements. Washington D.C.: National Soil Erosion Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service.
- Limbrunner J F. 2008. Watershed models for nonpoint source pollution management decision support[D]. Medford, Massachusetts: Tufts University.
- Liu J C, Zhang L P, Zhang Y Z, et al. 2004. Optimal design of best management practices to control agricultural non-point source pollution in Chinese watershed. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 43(S1): 269-274. [刘建昌, 张璐平, 张玉珍, 等. 2004. 控制农业非点源污染的最佳管理措施的优化设计. *厦门大学学报: 自然科学版*, 43(S1): 269-274.]
- Liu Y, Yang W, Wang X. 2007. Gis-based integration of SWAT and REMM for estimating water quality benefits of riparian buffers in agricultural watersheds. *Transactions of the Asabe*, 50(5): 1549-1563.

- Liu Y B, Gebremeskel S, De Smedt F, et al. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*, 283(1): 91-106.
- Liu Y B, Wu H, Liu J Z. 2012. A review of the Canadian WEBs Project. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28(4): 337-342. [刘永波, 吴辉, 刘军志. 2012. 加拿大最佳管理措施流域评价项目评述. *生态与农村环境学报*, 28(4): 337-342.]
- Maringanti C, Chaubey I. 2009. High performance computing application to address non-point source pollution at a watershed level. Reno, NV, United States: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Maringanti C, Chaubey I, Arabi M, et al. 2011. Application of a multi-objective optimization method to provide least cost alternatives for NPS pollution control. *Environmental Management*, 48(3): 448-461.
- Merriman K R, Gitau M W, Chaubey I. 2009. A tool for estimating best management practice effectiveness in Arkansas. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(2): 199-213.
- Nendel C. 2009. Evaluation of Best Management Practices for N fertilisation in regional field vegetable production with a small-scale simulation model. *European Journal of Agronomy*, 30(2): 110-118.
- Parson S C, Hamlett J M, Robillard P D, et al. 1998. Determining the decision-making risk from AGNPS simulations. *Transactions of the Asae*, 41(6): 1679-1688.
- Qi H H, Altinakar M S. 2011. Vegetation buffer strips design using an optimization approach for non-point source pollutant control of an agricultural watershed. *Water Resources Management*, 25(2): 565-578.
- Rabotyagov S, Campbell T, Jha M, et al. 2010. Least-cost control of agricultural nutrient contributions to the Gulf of Mexico hypoxic zone. *Ecological Applications*, 20(6): 1542-1555.
- Ribaudo M O, Colacicco D, Barbarika A, et al. 1989. The economic-efficiency of voluntary soil conservation programs. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(1): 40-43.
- Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D. 2003. Watershed optimization of agricultural best management practices: Continuous simulation versus design storms. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5): 1043-1054.
- Srivastava P, Hamlett J M, Robillard P D, et al. 2002. Watershed optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 38(3): 1021.
- Strauss P, Leone A, Ripa M N, et al. 2007. Using critical source areas for targeting cost-effective best management practices to mitigate phosphorus and sediment transfer at the watershed scale. *Soil Use and Management*, 23(S1): 144-153.
- Turpin N, Bontems P, Rotillon G, et al. 2005. AgriBMPWater: systems approach to environmentally acceptable farming. *Environmental Modelling & Software*, 20(2): 187-196.
- Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. 2003. Optimization procedure for cost effective BMP placement at a watershed scale. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6): 1331-1343.
- Wang X Y, Zhang Y F, Ou Y, et al. 2009. Optimization and economic evaluation on cost-benefit of Best Management Practices in nonpoint source pollution control. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(2): 540-548. [王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 2009. 流域非点源污染控制管理措施的成本效益评价与优选. *生态环境学报*, 18(2): 540-548.]
- Wang S H, Huggins D G, Frees L, et al. 2005. An integrated modeling approach to total watershed management: Water quality and watershed assessment of Cheney Reservoir, Kansas, USA. *Water Air and Soil Pollution*, 164(1-4): 1-19.
- Wang T. 2010. Study on optimized control measures of agricultural non-point source pollution. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(7): 3694-3696. [王彤. 2010. 农业面源污染控制措施优化研究: 以辽河流域上游铁岭段为例. *安徽农业科学*, 38(7): 3694-3696.]
- Williams J R. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 27(1): 129-144.
- Xiao X W, Xiao D, Lin J G, et al. 2011. Overview on multi-objective optimization problem research. *Application Research of Computers*, 28(3): 805-808. [肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 2011. 多目标优化问题的研究概述. *计算机应用研究*, 28(3): 805-808.]
- Yang Y H, Yan B X. 2011. Optimal non-point source pollution control practices for a small watershed, 27(2): 11-15. [杨育红, 阎百兴. 2011. 小流域面源污染减控措施优化管理. *生态与农村环境学报*, 27(2): 11-15.]
- Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2): 168-173.
- Zhou M, Sun S D. 1999. The principle and application of genetic algorithm. Beijing, China: National Defense Industry Press. [周明, 孙树栋. 1999. 遗传算法原理及应用. 北京: 国防工业出版社.]

Review of spatial optimization algorithms in BMPs placement at watershed scale

WU Hui^{1,2}, LIU Yongbo³, ZHU A-Xing^{1,4}, YANG Dianhua⁵, LIU Junzhi^{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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Geography, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G2W1, Canada; 4. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA; 5. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Best Management Practices (BMPs) are practical, cost-effective for reducing nutrients, pesticides, animal waste, and other pollutant loadings from their source area to receiving water bodies. It is essential to combine environmental benefits and economic cost in the design of BMPs placement within a watershed, and the optimization of BMPs placement has become one of the forefront and hot spot of current agricultural environment studies. The optimal BMP selection is, therefore, to utilize watershed modeling techniques and optimization algorithms for obtaining a cost-effective BMP placement within a watershed. This paper provides a systematic review on the current BMPs optimization studies. Firstly, we briefly introduce the BMPs and hydrologic models for BMPs assessment. Next, the current methods of BMPs optimization both in China and abroad are summarized. Finally, the key problems and future perspectives in the field of BMPs optimization, including BMPs interactions in space, computational bottlenecks, and uncertainties, are discussed.

Key words: agricultural BMPs; optimization algorithm; NPS pollution; watershed model; spatial management