

流域 TMDL 计划中的关键技术

徐宗学^{1,2}, 徐华山^{1,2,3}, 吴晓猛³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 北京中水新华国际工程咨询有限公司, 北京 100053)

摘要: 阐述了流域 TMDL 计划中的关键技术问题, 包括流域水环境特征识别、水污染现状分析、污染负荷估算、水文模型和点源污染物削减分配模型构建、非点源污染削减措施制定、点源和非点源削减措施实施效果评估等, 分析了这些技术的应用情况, 指出了我国制定和实施流域 TMDL 计划时应注意的相关问题。

关键词: 最大日负荷总量; 流域; 污染负荷分配; 水文水质模型; 关键技术; 综述

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)01-0008-06

Key technologies of total maximum daily load (TMDL) plan for river basin// XU Zongxue^{1,2}, XU Huashan^{1,2,3}, WU Xiaomeng³ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. China Water International Engineering Consulting Co. Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: The key technologies of the total maximum daily load (TMDL) plan for river basin are discussed. Those key technologies include feature recognition of water environment, analysis of water pollution status, estimation of pollution load, construction of hydrological model and model of point source pollution reduction and allocation, formulation of non-point source pollution reduction measures, and evaluation of the implementation effects of point source and non-point source pollution reduction measures, the applications of those key technologies were analyzed, and the relevant problems, which should be noted in the formulation and implementation of the TMDL plan for river basin are pointed out.

Key words: total maximum daily load; river basin; pollution load allocation; hydrological and water quality model; key technology; review

最大日负荷总量 (total maximum daily load, TMDL) 计划是国际上最具代表性的流域总量控制技术体系^[1]。1985 年, 美国在修订《清洁水法》时提出了 TMDL 计划, 制定并颁布了 TMDL 实施导则, 1997 年制定了 TMDL 技术指南, 2008 年出版了流域 TMDL 开发手册草稿, 明确了制定流域 TMDL 计划的步骤: ①分析流域特征。收集并分析流域水体数据, 描述流域状况和受损状态, 获取水体基本信息和流域受损因素, 确定河流水质标准及 TMDL 目标, 识别潜在污染源。②计算污染负荷容量。建立污染负荷和水质关联模型, 评估现有污染负荷, 计算最大容许污染负荷总量。③确定污染负荷分配。兼顾地理特征、时间序列和污染源, 选择最合适、最可行的污染负荷分配方案。④提交 TMDL 报告。起草 TMDL 报告, 准备 TMDL 文档, 编制 TMDL 报告。

流域 TMDL 计划的关键技术主要包括流域地表水水质受损水体和潜在污染源识别, 选择与构建污染负荷和水质关联技术模型, 计算最大容许污染负荷总量, 确定点源污染负荷和非点源污染负荷分配方案, 构建公平、合理、可行的点源污染负荷削减分配模型, 优化非点源污染控制措施。目前, 美国很多州都对其行政区域内的水质受限水体制定并实施了 TMDL 计划, 这对受限水体的水质改善发挥了明显作用^[2]。我国关于流域 TMDL 计划的研究起步较晚, 加上我国国情与欧美国家差别较大, 在制定实施流域 TMDL 计划时上述关键技术也有别于欧美国家。

1 水质受损水体识别

流域水质受损水体识别是制定流域 TMDL 计划

的前提和基础,一般需确定流域水体水质空间差异,识别污染源并分析污染源与受损河段之间的关系,同时通过时间序列分析评估受损水体、潜在污染源或其他水体受损条件随时间变化的趋势,分析水质参数与水文条件之间或者不同水质参数之间的关系。流域 TMDL 计划可能涉及不同的子流域、受损河段、特征污染物、可能污染源,这些都会影响流域水体水质。因此,详细识别受损水体对实施流域 TMDL 计划、最大限度利用水资源是非常重要的^[1]。我国水质受损水体识别多采用水质评价法,包括单因子指数法、综合指数法、模糊数学法等,这些方法对于分析流域尺度长时间序列的水质变化略显不足。多元统计分析方法包括系统聚类分析法、季节性 Kendall 法、因子-主成分分析法和多元线性回归分析法,在流域地表水水质时空变化、污染源定性识别及流域地表水水质监测断面布设合理性评估等方面均得到广泛的应用^[3]。国内研究者采用系统聚类分析法对我国陕西秦岭南坡金水河、三峡库区香溪河、汉江流域堵河、汉江上游、湘江^[4-9]等流域地表水水质进行评估,分析其时空变化规律;国外学者也采用该法分析了西班牙皮苏埃加河、马来群岛的河口、日本富士河、土耳其柏瑞马兹河、尼泊尔巴格马提河、阿根廷苏琪亚河、韩国洛东江以及印度的恒河、默哈纳迪河、高缇河、婆罗门河等流域地表水水质时空演变特征^[10-20]。季节性 Kendall 法常用于流域地表水水质非参数趋势分析^[21-28];因子-主成分分析法可对河流污染源进行定性识别^[11,14,17-18,29-33];多元线性回归分析法常与主成分分析法一起用于计算不同污染源对水体不同指标的贡献率^[5,17,29,31,34-35]。

2 水文水质模型选择

水文水质模型是分析环境问题的重要工具,是辅助决策支持系统的有力支撑,协助管理者更好地理解流域系统的动态变化,比如人为污染源和土地管理活动污染源如何输入并影响接纳水体以及他们输入接纳水体的条件,如何通过改变这些条件来改变污染物输入负荷等,对所有这些复杂响应关系的描述主要依靠水文水质模型来实现。TMDL 计划的目标形式类似于我国流域总量控制,其核心思想是对污染负荷与水质的动态响应关系进行定量描述与表征,进行目标可控的管理情景分析,实现成本效益最大化。水文水质模型是制定实施 TMDL 计划的关键技术之一,在核定水环境容量、估算污染负荷输入、评估接纳水体水质、确定污染负荷分配等方面都得到广泛应用。TMDL 计划要求模型必须具备量化污染负荷变化的能力,因此具有物理机制的模型最

合适。如何正确合理地选择和使用模型是整个 TMDL 计划实施成败的关键。Depinto 等^[36]从哲学角度研究了选择模型的基本原则,指出不可能存在一种模型对所有的 TMDL 计划都适合,地表水环境管理的相关议题使期望的模型复杂化,但现实中可利用的数据却又限制了模型的复杂化,因此,在实际研究中只能选择符合管理目标的简易模型。选择模型时要考虑的因素如下:①管理目标,包括关注的污染物、合适的时空尺度、污染负荷类型和控制措施、描述水平的精度和准确度、利益相关者的接受水平、与其他流域规划的相容性等;②特定研究区特征,包括流域或接纳水体尺度和类型、污染物输移的复杂性、重要水文过程;③可利用资源,包括数据、时间、预算、计算机需求、工作人员技能等。

适合 TMDL 计划的模型一般具备以下特征:①基于流域尺度;②可以连续模拟;③考虑点源和非点源污染;④考虑地表和地下水的贡献;⑤考虑污染物的溶解态和颗粒态;⑥具备表征流域和陆地土地利用特征对污染物的影响能力。美国国家环保总局 (USEPA) 考虑到模型对于 TMDL 计划的重要性,兼顾州与州之间水质标准的差异、数据的可利用性以及使用者的偏好等因素,提供了几十种备选模型,但是它们当中没有一个能同时适应所有的流域。应用于 TMDL 计划的模型较多,如 AGNPS/AnnAGNPS、GWLF、HSPF、LSPC (HSPF 的升级版)、SWAT 和 SWMM 等。

Borah 等^[37]将 TMDL 计划中使用的模型分为负荷模型、接纳水体模型及流域模型。GWLF、PLOAD 等为负荷模型,用来估算从流域出口进入到接纳水体的沉积物或化学物质的污染负荷。AQUATOX、BATHTUB、CE-QUAL-W2 和 QUAL2E 等为接纳水体模型,用来分析接纳水体(如溪流、水坝蓄水、湖泊和河口)接受污染负荷后的水量和水质变化。AGNPS、AnnAGNPS、HSPF、LSPC 和 SWAT 等为流域模型,包含负荷模型和接纳水体模型。流域模型又可以进一步划分为两类,一类是长系列连续模拟模型,另外一类是暴雨事件模型。AnnAGNPS、HSPF、LSPC 和 SWAT 等是连续模拟模型,用来分析长序列气候变化、水文变化、管理措施变化对流域水量和水质的影响。AGNPS 是暴雨事件模型,常用来预测单场降雨事件(尤其是极端暴雨事件)过程中和降雨后洪水、大量泥沙以及营养元素对水质和水量的影响,并分析管理措施的效果。暴雨事件模型常被用来分析评估 TMDL 计划中最佳管理措施 (best management practices, BMPs) 的实施效果。另外还有一些模型也具备连续模拟和单场暴雨事件模拟的

能力,如 CASC2D/GSSHA、MIKE SHE 等。美国环境保护局^[38]总结了上述这些模型的特征、优势、局限性、应用历史、时空尺度、模拟能力、假设假定及支持的区域等,并对模型的界面能力进行了详细的描述和总结。

TMDL 计划另外一个关键技术是非点源污染负荷的定量化,流域农业非点源污染控制技术多借助分布式水文模型对流域非点源污染负荷进行估算,然后设置不同的最佳管理措施并对比其控制效果、环境效益和所需费用,为管理部门决策提供科学依据和技术支撑。SWAT 模型是 USEPA 实施 TMDL 计划的首选模型,被广泛应用于流域非点源污染关键区识别、非点源污染负荷定量化和 BMPs 实施效果模拟评估等方面。

3 点源污染负荷分配

制定和实施流域 TMDL 计划的核心问题是如何科学合理分配流域水体污染物削减量,即根据排污地点、数量和方式,结合污染源排污总量削减技术和优先削减污染物顺序、经济可行性等因素,在各控制区域分配环境资源,其实质是确定各排污方利用环境资源的权利和削减污染物的义务,即利益的分配和矛盾的协调。污染负荷分配实际上是利益最大化和污染最小化的矛盾统一体,涉及水体污染物的削减技术以及经济的可行性、负荷分配的公平性,污染负荷分配合理与否是 TMDL 计划能否成功实施的关键^[39]。

关于污染物总量的削减与分配研究在国外开展比较早,美国是最早实施污染物总量控制的国家,研究制定了污染负荷分配削减技术指南^[40];Ronald 等^[41]在 1985 年比较评价了 8 种比较流行的污染负荷分析方法;传统的 TMDL 计划在分配容许污染负荷时不考虑经济成本,而 Zaidi 等^[42]研究了在分配污染负荷时如何将经济分析纳入其中。

我国对水体污染物分配的研究主要以水环境容量或目标总量控制为基础,并考虑经济优化和公平合理的原则^[40],基尼系数法是我国最常用的一种分配方法。现行的基尼系数法分为单指标基尼系数法和综合指标基尼系数法,这些分配方法均存在一定的不足,如单项社会经济指标的选择不能充分反映各区域的社会、经济及资源状况;约束条件的设置过于苛刻,不能体现各单项指标重要性差异等。因此,在优选相关指标的基础上,归一化处理相关数据,引入权重系数,构建多维水环境基尼系数分配模型,并设置不同的约束条件,优化求解分配方案是今后一段时期点源污染负荷削减与分配的重要工作之一。

4 非点源污染负荷 BMPs 优化

非点源污染的控制可以从两个方面着手:一是控制污染源,即从源头上控制污染物进入水体;二是控制污染物迁移转化途径。由于认识问题的深浅不同,过去人们往往仅依靠一种措施来控制复杂的非点源污染问题,随着对非点源污染问题的深入研究,逐渐认识到依靠单一措施控制非点源污染的效果并不理想,需要根据特定流域的水文气候因素和地形要素制定适合该流域的管理措施^[43-44]。

由于非点源污染具有分布广、随机性强、潜伏期长、难以估算等特点,致使非点源污染的控制难度大、成本高^[45],各国在实践中提出过多种调控方法,涉及多个领域,归纳起来有以下 4 种系统管理措施:①农田系统管理措施,包括养分管理和家畜管理;②生态系统管理措施,包括河流、湖泊、海湾的地表水管理;③农作物系统管理措施,包括农作物管理和土壤管理;④水文系统管理措施,包括水资源管理、土地使用管理和景观管理。

高效、经济、科学的最佳管理措施 BMPs 在非点源污染控制中得到广泛应用^[46-47]。在欧洲、美国和其他一些国家,BMPs 优化常常借助于 SWAT 模型,许多研究专注于 BMPs 的环境效益评价^[48-52],也结合经济学理论进行 BMPs 的费用-效益分析研究^[53-56]。Qiu 等^[57]利用 SWAT 模型对农业流域的河岸缓冲带进行了经济评价,发现研究区的河岸缓冲带能有效消除农田带来的农药,强烈建议农民发展和保留临近水体的河岸缓冲带;Panagopoulos 等^[58]在 2007 年提出了 BMPs 费用-效益分析计算方法,并在 2011 年采用 SWAT 模型分析了不同的 BMPs 对流域非点源负荷削减的效果,进行了效益对比分析;Rabotyagov 等^[59]指出了不同种类的 BMPs 费用,为研究者选择经济合理的 BMPs 提供了参考;Maringanti 等^[60]发展了一种多目标优化方法来选择和实施 BMPs,成功地考虑了经济和生态效应。

采用 SWAT 模型输出基准情景下 HRU 水平的污染负荷,同时将 SWAT 模型不同的运行结果、经济数据和等位基因序列输入 BMPs 优化模型。在优化过程中,首先在特定土地利用类型给出的等位基因序列中搜寻特定的管理措施,然后估算所选取的最佳管理措施费用,最后在流域尺度上加权平均 HRU 水平上的污染负荷和总费用。优化过程是使流域总污染负荷和总费用这两个目标函数最小,结合 SWAT 模型和优化模型采用多目标遗传算法求解。

5 结语与展望

我国流域 TMDL 计划的相关研究起步较晚,已有成果多停留在对流域 TMDL 计划关键技术的介绍以及对技术体系的理论探讨上,尚未开展具体的案例研究。同时,我国河流受到人类活动强烈干扰,TMDL 技术体系中的点源污染负荷削减与分配、非点源污染控制措施优化、水文模型构建等关键技术都有别于欧美国家,使得该技术体系在我国的应用受到限制。因此,我国流域 TMDL 计划的制定和实施要根据我国国情区别对待,概括起来需要注意以下问题:

- a. 流域水质时空演变分析需要借助流域管理机构多年的水质监测数据,采用多元统计方法分析水质在流域尺度上的空间差异和多年变化趋势,结合污染源调查,分析引起水体水质受损的原因,为制定流域 TMDL 计划提供基础数据。
- b. 根据流域的不同特点选择并修订模型,如在选择 SWAT 模型作为流域 TMDL 计划的模型时,对于我国部分流域闸坝较多、取水频繁等实际情况,对相应模块进行修改是可行的,也是必要的。
- c. 现阶段我国点源污染负荷依然是造成流域水体水质受损的主要因素,基于我国国情建立一套科学、公平、各排污方均能接受且能顺利推行实施的分配体系,是我国流域 TMDL 计划制定实施的重点,也是难点所在。
- d. 根据流域特点并配合必要的经济效益分析,制定适合流域非点源污染负荷的管理措施并付诸实施,是将来制定和实施流域 TMDL 计划必须考虑的关键问题之一。

参考文献:

[1] 张楠. 基于不确定性的流域 TMDL 及其安全余量研究 [D]. 北京:北京师范大学, 2009.

[2] 柯强,赵静,王少平,等. 最大日负荷总量(TMDL)技术在农业面源污染控制与管理中的应用与发展趋势[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(1):85-91. (KE Qiang, ZHAO Jing, WANG Shaoping, et al. Application of total maximum daily load (TMDL) in control of agricultural nonpoint source pollution and its developmental trend[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2009,25(1):85-91. (in Chinese))

[3] 周丰,郭怀成,黄凯,等. 基于多元统计方法的河流水质空间分析[J]. 水科学进展,2007,18(4):544-551. (ZHOU Feng, GUO Huaicheng, HUANG Kai, et al. Multivariate statistical technique for spatial variation in river water quality[J]. Advances in Water Science,2007,

18(4),544-551. (in Chinese))

[4] 卜红梅,刘文治,张全发. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用[J]. 资源科学,2009,31(3):429-434. (BU Hongmei, LIU Wenzhi, ZHANG Quanfa, et al. Application of multiple statistical analysis to spatial-temporal variations of water quality of the Jinshui River [J]. Resources Science, 2009, 31 (3), 429-434. (in Chinese))

[5] BU Hongmei, TAN Xiang, LI Siyue, et al. Water quality assessment of the Jinshui River (China) using multivariate statistical techniques [J]. Environmental Earth Sciences,2010,60(8):1631-1639.

[6] 叶麟,黎道丰,唐涛,等. 香溪河水质空间分布特性研究[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1959-1962. (YE Lin, LI Daofeng, TANG Tao, et al. Spatial distribution of water quality in Xiangxi River of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (11): 1959-1962. (in Chinese))

[7] 顾胜,李思悦,张全发. 汉江堵河流域地表水质时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(1):41-46. (GU Sheng, LI Siyue, ZHANG Quanfa. Spatital-temporal distribution of surface water quality in the Du River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009,18(1),41-46. (in Chinese))

[8] LI Siyue, ZHANG Quanfa. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,176(1/2/3):579-588.

[9] ZHANG Qi, LI Zhongwu, ZENG Guangming, et al. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in red soil hilly region:a case study of Xiangjiang watershed of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2009,152:123-131.

[10] VEGA M, PARDO R, BARRADO E, et al. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis[J]. Water Research,1998,32(12):3581-3592.

[11] ALKARKHI A F M, AHMAD A, EASA A M. Assessment of surface water quality of selected estuaries of Malaysia: multivariate statistical techniques [J]. Environmentalist, 2009,29(3):255-262.

[12] SHRESTHA S, KAZAMA F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji River Basin of Japan[J]. Environmental Modelling & Software,2007,22(4):464-475.

[13] VAROL M, SEN B. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Behrimaz Stream of Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2009,159:543-553.

[14] KANNEL P R, LEE S, KANEL S R, et al. Chemometric

- application in classification and assessment of monitoring locations of an urban river system[J]. *Analytica Chimica Acta*,2007,582(2):390-399.
- [15] SINGH K P, MALIK A, MOHAN D, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India): a case study [J]. *Water Research*, 2004, 38(18):3980-3992.
- [16] SUNDARAY S K, PANDA U C, NAYAK B B, et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi river-estuarine system (India): a case study [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28(4):317-330.
- [17] SINGH K P, MALIK A, SINHA S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques;a case study [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005,538(1/2):355-374.
- [18] SUNDARAY S K. Application of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies; a case study of Brahmani-Koel River (India) [J]. *Environ Monit Assess*, 2010,164:297-310.
- [19] ALBERTO W D, DEL PILAR D M, VALERIA A M, et al. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality;a case study of Suquia River Basin (Cordoba-Argentina) [J]. *Water Research*,2001,35(12):2881-2894.
- [20] HAN S, KIM E, KIM S. The water quality management in the Nakdong River Watershed using multivariate statistical techniques[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2009, 13(2):97-105.
- [21] ZHANG J, BURKE P, IRICANIN N, et al. Long-term water quality trends in the Lake Okeechobee Watershed of Florida [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(Sup1):548-575.
- [22] LEE H W, BHANG K J, PARK S S. Effective visualization for the spatiotemporal trend analysis of the water quality in the Nakdong River of Korea [J]. *Ecological Informatics*, 2010,5(4):281-292.
- [23] YIN X, HU G H, SOC I C. Trend analysis of surface water quality in Hunan Province [M]. Los Alamitos: Ieee Computer Society, 2009.
- [24] HIRONO Y, WATANABE I, NONAKA K. Trends in water quality around an intensive tea-growing area in Shizuoka, Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(6):783-792.
- [25] SUN Dong, LI Junfeng, SUN Feifei. Seasonal Kendall test and its application in water quality trend analysis [M]. Liverpool: World Acad Union-World Acad Press, 2008.
- [26] JOHNSON H O, GUPTA S C, VECCHIA A V, et al. Assessment of water quality trends in the Minnesota River using Non-Parametric and parametric methods[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(3):1018-1030.
- [27] BOUZA-DEANO R, TERNERO-RODRIGUEZ M, FERNANDE-AESPINOSA A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 361(3/4):227-239.
- [28] CHANG H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River Basin of South Korea [J]. *Water Research*, 2008, 42(13):3285-3304.
- [29] SIMEONOV V, STRATIS J A, SAMARA C, et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. *Water Research*, 2003, 37(17):4119-4124.
- [30] KAZI T G, ARAIN M B, JAMALI M K, et al. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques;a case study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(2):301-309.
- [31] PEKEY H, KARAKAS D, BAKOGLU M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(9/10):809-818.
- [32] OMO-IRABOR O O, OLOBANIYI S B, ODUYEMI K, et al. Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: a case study of the Western Niger Delta of Nigeria [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33:666-673.
- [33] AZZELLINO A, SALVETTI R, VISMARA R, et al. Combined use of the EPA-Qual2E simulation model and factor analysis to assess the source apportionment of point and non point loads of nutrients to surface waters [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1/2/3):214-222.
- [34] ZHOU Feng, HUANG G H, GUO Huaicheng, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, 41(15):3429-3439.
- [35] SU Sjiliang, ZHI Junjun, LOU Liping, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River (China) using neural-based modeling and multivariate statistical techniques [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36(9/10/11):379-386.
- [36] DEPINTO J V, FREEDMAN P L, DILKS D M, et al. Models quantify the total maximum daily load process [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2004, 130(6):703-713.
- [37] BORAH D K, YAGOW G, SALEH A, et al. Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation [J]. *Transactions of the Asabe*, 2006, 49(4):967-986.
- [38] 美国环境保护局. 美国 TMDL 计划管理模型实施实践 [M]. 王东, 赵越, 徐敏, 等, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

- 版社,2012.
- [39] 刘赣明. 最大日负荷总量 (TMDL) 模式下的污染负荷分配[D]. 广州: 中山大学, 2005
- [40] 张杏杏, 彭晓春, 贺涛, 等. 水污染物总量分配方法研究进展[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(4): 3-7. (ZHANG Xingxing, PEN Xiaochun, HE Tao, et al. Advances in the research of total pollutant load allocation for surface water [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(4): 3-7. (in Chinese))
- [41] RONALD C, IRENE K. An evaluation of eight waste-load allocation methods[J]. Water Resources Bulletin, 1985, 21(5): 833-839.
- [42] ZAIDI A Z, DEMONSABERT S M, EL-FARHAN R. How to include economic analysis in TMDL allocation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 2008, 134(3): 214-223.
- [43] PANAGOPOULOS Y, MAKROPOULOS C, MIMIKOU M. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2823-2835.
- [44] RAO N S, EASTON Z M, SCHNEIDERMAN E M, et al. Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(3): 1385-1395.
- [45] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制的方法[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374. (ZHOU Huiping, GAO Chao, ZHU Xiaodong. Identification of critical source areas: an efficient way for agricultural nonpoint source pollution control[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3368-3374. (in Chinese))
- [46] 王晓燕. 非点源污染与管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [47] MCKISSOCK G, JEFFERIES C, DARCY B J. An assessment of drainage best management practices in Scotland[J]. J Chart Inst Water Environ Manage, 1999, 13(1): 47-51.
- [48] ARABI M, GOVINDARAJU R S, HANTUSH M M, et al. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with swat[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(2): 513-528.
- [49] BARLUND I, KIRKKALA T, MALVE O, et al. Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the water framework directive in a finnish catchment [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(5): 719-724.
- [50] SAHU M, GU R R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(8): 1167-1177.
- [51] SANTHI C, SRINIVASAN R, ARNOLD J, et al. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(8): 1141-1157.
- [52] WHITE M J, ARNOLD J G. Development of a simplistic vegetative filter strip model for sediment and nutrient retention at the field scale [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(11): 1602-1616.
- [53] COOLS J, BROEKX S, VANDENBERGHE V, et al. Coupling a hydrological water quality model and an economic optimization model to set up a cost-effective emission reduction scenario for nitrogen [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(1): 44-51.
- [54] GASSMAN P W, OSEI E, SALEH A, et al. Application of an environmental and economic modeling system for watershed assessments[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2002, 38(2): 423-438.
- [55] GASSMAN P W, OSEI E, SALEH A, et al. Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 117(2/3): 135-144.
- [56] OSEI E, GASSMAN P, HAUCK L, et al. Environmental benefits and economic costs of manure incorporation on dairy waste application fields [J]. Journal of Environmental Management, 2003, 68(1): 1-11.
- [57] QIU Z Y, PRATO T. Economic evaluation of riparian buffers in an agricultural watershed [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(4): 877-890.
- [58] PANAGOPOULOS I, MIMIKOU M, KAPETANAKI M. Estimation of nitrogen and phosphorus losses to surface water and groundwater through the implementation of the SWAT model for Norwegian soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(4): 223-231.
- [59] RABOTYAGOV S S, JHA M, CAMPBELL T D. Nonpoint-source pollution reduction for an Iowa Watershed: an application of evolutionary algorithms [J]. Canadian Journal of Agricultural Economics-Revue Canadienne D Agroeconomie, 2010, 58(4): 411-431.
- [60] MARINGANTI C, CHAUBEY I, POPP J. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): W06406.

(收稿日期: 2013-02-27 编辑: 周红梅)