

流域水环境模型及应用

孙丽凤¹, 王玉番², 刘晓晖², 刘莹², 卢少勇³

1. 青岛理工大学计算机工程学院, 青岛 266033
2. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014
3. 中国环境科学研究院, 国家环境保护洞庭湖环境保护观测研究站, 北京 100012

摘要 流域水环境模型是研究流域水环境问题的重要工具。梳理了流域尺度水环境污染模型及水质风险评价方面的模型, 基于流域水环境的污染负荷、水质模拟对整个流域合理规划、管理管控的重要性, 从水环境污染负荷模型、水质模拟模型及水环境质量评价3个层面, 探讨了各类水环境模型的特征及适用性。结合农业非点源与城市非点源污染负荷模型、稳态与动态模拟水质模型、确定性与不确定性水质评价模型, 剖析了流域水环境模型的研究应用进展。

关键词 流域水环境; 污染负荷; 水质模拟; 风险评价

目前, 中国水资源面临严峻形势, 人均水资源量低, 且时空分布不均衡、循环利用率低^[1]; 此外, 水环境污染形式不容乐观, 由于污水排放量增大造成了水体污染负荷较大, 而水环境容量相对较小, 致使水质恶化趋势仍未得到根本转变, 水污染事故易发多发^[2-3]。因此, 为实现中国水资源对社会的可持续发展, 各流域水环境污染防治等问题亟待解决。近年来, 流域水环境污染、水体富营养化已成为全球性热点问题, 但是目前解决流域水环境污染问题的主要手段仍是通过工程技术途径^[4], 运用数理模型对流域水环境污染问题进行系统分析、预测、模拟及风险评估等方式研究仍存在不足^[5]。

在流域尺度上, 估算其污染负荷发生量与处理量、明确水环境污染负荷是流域水环境污染控制的前提; 判别水体污染物的来源与分布特征, 并对其贡献率进行定量解析, 是有效开展水环境污染控制的基础。综合应用流域水环境模型技术, 基于环境数理与计算机模拟定量描述流域系统及内部污染发生、传输及转化过程, 已成为国际上常用的有效解析污染源与管理决策支持工具^[6]。国内外已有一些关于流域尺度水环境污染模型的研究探讨了多种流域模型^[7-9]。本文对流域水环境模型进行归类, 介绍各类典型模型的结构原理、特点及优势与局限性, 探讨流域水环境模型的发展趋势与应用前景。

1 流域水环境污染负荷模型

目前, 在国家实施污染物总量控制的背景下, 对于流域

水环境污染负荷模型的研究尤为重要, 污染负荷模型用于描述与估算污染负荷发生量和处理量, 计算结果可作为水量水质模拟时的边界条件和数据源项^[10], 为流域规划与管理提供决策依据。流域水环境污染是点源和面源共同作用的结果, 其中点源污染已得到有效的控制^[11]。因此, 在流域污染总量控制中, 搞清非点源污染中各种污染源的发生、迁移及转化过程, 实现非点源污染负荷估算研究是非常关键的环节, 其中非点源污染负荷分为农业、城市2种类型, 分别选取其代表性模型对其功能进行描述。

1.1 农业非点源污染负荷模型

农业非点源污染是指在农业生产活动中, 农田中的土粒、氮素、磷素、农药及其他有机或无机污染物在降水或灌溉过程中通过农田地表径流、排水和地下渗漏进入水体造成的污染^[12]。目前关于农业非点源污染模型, 效果较为显著的模型包括AGNPS (agricultural non-point source pollution model) 模型及其优化版 AnnAGNPS 模型、SWAT 模型等^[13-14]; 国内农业非点源污染流域尺度模型研究起步较晚, 多依据国外模型进行应用。AGNPS 模型及 AnnAGNPS 模型主要适用于估算由农业生产、农村生活等方式带来的农业非点源污染, 现已成功应用于中国部分流域且效果显著, 表明该类模型具有很好的应用前景^[15]。

AGNPS 模型模型侧重于农业非点源污染物对地表水、地下水水质的潜在威胁, 适用于集水面积小于 200 km² 的流域, 用其定量估算农业非点源污染负荷, 并评价不同管理措施的

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408349); 教育部大学生创新创业训练计划项目 (201510445166)

作者简介: 孙丽凤, 副教授, 研究方向为水环境模拟分析, 电子信箱: slf6603@126.com

引用格式: 孙丽凤, 王玉番, 刘晓晖, 等. 流域水环境模型及应用[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 170-175; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.023

效果,但具有一定的局限性。AnnAGNPS模型是AGNPS模型的升级版,改善了原有模型无法对流域内非点源污染进行长期预测的缺点,成为以日为基本步进单位用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的连续型分布式参数模型,主要由数据输入和编辑模块、年污染物负荷计算模块、数据输出和显示模块3部分组成^[16-17]。AnnAGNPS模型可根据流域地形水文特征划分流域集水单元,达到模拟大尺度流域的目的,适宜尺度达2万 km²,其输出结果可用于评价流域内非点源污染的长期影响^[18-19]。AnnAGNPS模型逐渐得到广泛应用,田耀武等^[20]选择连续农业非点源污染模型 AnnAGNPS,构建该模型数据库,模拟了秭归县黑沟、兰陵溪、杉木溪等3个典型流域和县域径流、泥沙和营养物质的输出,结果表明径流模拟的误差在可接受范围,而泥沙和营养物质的误差较大。

1.2 城市非点源污染负荷模型

城市非点源污染是指城市屋面、路面及其他地面污染物在降雨径流淋溶冲刷作用下以广域、分散形式进入河湖引发的水体污染。利用城市非点源污染模型,可模拟不同时间、不同空间尺度的污染物,量化非点源污染负荷,从而识别非点源污染带来的风险,确定非点源污染重点治理区域,合理规划城市排水管网,制定科学合理的非点源污染治理措施^[21]。

目前,城市非点源污染模型历经经验模型、机制模型、与GIS耦合应用3个发展阶段,已逐渐发展成模型。与GIS的耦合应用使城市非点源污染模型的参数提取更加准确和方便,模型的模拟预测效果进一步改善,对机制型模型的发展起到了巨大的推动作用,通过大量实例应用,发现SWMM模型的应用最为广泛^[21-22]。

SWMM模型即暴雨雨水管理模型,是1971年美国EPA推出的城市暴雨水量水质预测和管理模型,其主要由径流模块、输送模块、扩展输送模块和贮存/处理模块等4个模块构成^[23]。SWMM模型的核心模拟流程包括:子流域概化、地表产流计算、地表汇流演算、管网汇流子系统演算,其中流量是通过联立求解曼宁公式和连续方程求得:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{sdh}{dt} = si - Q \quad (1)$$

$$Q = \frac{L1.49(h-h_p)^{\frac{5}{3}}}{n} S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, V 为地表集水量, m³; h 为水深, m; t 为时间, s; S 为地表面积, m²; i 为净雨强度, m³/s; L 为子流域宽度, m; n 为曼宁糙率系数; h_p 为地面蓄水水深, mm; S' 为子流域坡度, m/m。

管网汇流子系统演算采用圣维南方程组求解:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = q \quad (3)$$

$$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h_0}{\partial l} + S_f - S_0 = 0 \quad (4)$$

式中, A 为过水断面面积, m²; v 为管内流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; h_0 为管内水深, m; l 为距离, m; S_f 为摩阻坡度, m/m; S_0

为底坡坡度, m/m; q 为单位长度旁侧入流量, m³/s。

马晓宇等^[23]结合降雨径流实测数据构建了基于SWMM非点源污染负荷计算模拟,模拟数据与实测数据基本吻合,表明SWMM模型可用于模拟城市非点源污染负荷及辅助管网的设计。赵磊等^[24]从模型构建、参数敏感性分析、参数率定及模拟结果4个方面进行分析,表明SWMM模型水文水力模块中最灵敏参数为imperv,污染负荷总量误差在2%~17%,模拟与实测污染物浓度过程趋势基本一致。

2 流域水环境污染物归趋模型

污染物进入水体后,随水流扩散、迁移,迁移过程中受到水力水文、物理、化学、生物、生态等因素影响,引起污染物的混合、稀释和降解等过程^[25]。水质模型是应用物理、化学、数学等方面的知识,在监测和收集有关数据的基础上,借助编制的计算机软件系统等技术描述河流、湖泊等水体水质要素及定量描述污染物在水环境中迁移转化规律及其影响因素之间相互关系的数学描述。

自1925年以来,水质模型的研究经历了3个阶段。第一阶段地表水质模型研究对象仅是水体水质本身,主要是简单的氧平衡模型和涉及一些非耗氧类物质,属于一维稳态模型。第二阶段研究了多维模拟、形态模拟、多介质模拟及动态模拟等特征模型,其主要特点是将河网水动力水质模型、湖泊水动力水质模型及底泥作用模型纳入水质模拟模型中,典型模型有一维动态模型LAKECO、WRMMS,动态水质模型WASP等。第三阶段水质模型研究不断深化、完善并广泛应用^[26]。地表水质模型依据数学表达式和输入条件随时间的变化情况分类,不变的为稳态模型,变化的为动态模型。本文分别选择QUAL2E和WASP作为典型的稳态和动态模型,对模型的结构、原理和功能进行描述。

2.1 稳态水流水质模型

当水流运动要素与系统的输入均不随时间而变化时,系统的物质量也不随时间变化,该类称为稳态模型。其中,QUAL2E是一个综合性、多用途的河流综合水质模型,由AQUAL2、QUAL2e及Q2PLOT3部分组成,分别作为数据的前处理器、数据运算、数据后处理器^[27]。QUAL2E假定平流与扩散混合都沿着河流的主流向,而在河流的横向与垂向角度水质组分是完全均匀混合的,允许河流沿程有多个污染源、取水口以及支流汇入。其基本方程为一维平流-扩散质量迁移方程:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_x D_1 \frac{\partial \rho}{\partial l} \right)}{\partial l} dl - \frac{\partial (A_x u \rho)}{\partial l} dl + (A_x dl) \frac{dc}{dt} + H \quad (5)$$

式中, m 为所考察物质的质量, kg; ρ 为所考察的物质在河水中的质量浓度, g/mL; A_x 为 x 坐标处河流横截面积, m²; D_1 为纵向扩散系数; u 为平均流速, m/s; H 为外部的源和漏。方程右边的4项分别为扩散、平流、组分反应和组分的外部源和漏。

QUAL2E 作为一维稳态水质模型,适用于模拟完全混合的枝状河流水质,它既可计算任何期望背景下稀释河流所需溶解氧水平,也可以研究污染负荷的量、发生地点及河流的水质。通过构建 QUAL2E,模拟溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD₅)、温度、叶绿素 a 等任意组合的 15 种参数,效果显著^[28]。张智等^[29]应用 QUAL2E 模型对长江重庆主城区河段水质进行模拟、验证,表明 DO 模拟与 DO 实测相关性较好,证明 QUAL2E 模型在长江的水质模拟有较好的应用前景。陈家军等^[30]建立了呼和浩特市的水质模型,选用 BOD₅、COD_{Mn} 作为模拟污染指标,给出模型关键参数的确定方法,应用 QUAL2E 模型进行河流水质模拟分析,检验 QUAL2E 模型参数,其模拟结果很好地描述了河流的水质状况。

2.2 动态水流水质模型

当水流为非恒定流动,不管输入是否随时间而变,系统内的物质量将随时间而变,这种模型叫动态模型。WASP 模型是美国 EPA 推荐使用的水质模型,适于对河流、湖泊、河口、水库及海岸的水质进行模拟,对在不同环境污染决策系统中的常规污染物和有毒污染物造成的各种水质状况进行分析和预测。WASP 7.3 的基本方程是基于质量守恒基本原则建立的,其水质模块的基本方程是一个平移、扩散质量迁移方程,对于任一有限小的水体,水质指标的质量平衡式为^[31]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x \rho) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y \rho) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z \rho) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) + S_L + S_B \quad (6)$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 坐标的流速, m/s; E_x 、 E_y 、 E_z 为三维扩散系数, m²/s; S_L 为点源或非点源负荷,正为源,负为流失, g/(m³·d); S_B 为边界负荷,包括上游、下游、底泥以及大气沉降, g/(m³·d); S_A 为动力转换量, g/(m³·d)。

最新 WASP 7.3 模型的使用包括以下 4 个步骤:1) 河网模型概化;2) 水动力研究、质量传输研究、水质转化研究和环境毒理学研究;3) 研究水流和底质中的物质转化;4) 研究污染物的影响。同时, WASP 7.3 是一个 Windows 加强版本,具有可视化的操作界面,运行速度较快。WASP 水质模型主要有 3 个方面的作用:描述水质现状,提供一般性水质预测和提供特定位置水质预测。郭旭等^[32]将 WASP 模型应用于曲江池的水质模拟取得了较满意的结果, NH₃-N、NO₃-N、DO 模拟值与实测值的平均误差在可接受范围内,表明 WASP 模型满足水质模拟的要求。姜毅等^[33]结合城市人工景观水体的水污染状况,基于 WASP 模型建立了城市人工景观水体富营养模型,并对模型中的参数进行了率定和验证。结果表明该模型对景观水体的水质变化模拟具有较好的适用性,可以为水系的优化管理和远期规划提供切实有效的理论支持。

3 水环境质量评价模型

水环境质量评价是按照一定的标准、指标和方法,根据

水的用途对水域的质量状况进行定性或定量的评定^[34]。按照水质级别的确定原则,可分为确定性方法和不确定性方法^[35]。不确定性方法结合数学理论和计算机技术,可进行大量运算并处理较复杂问题,评价结果更加真实客观,但不确定性方法的理论复杂,适用性不如确定性方法广泛^[36]。确定性方法主要有指数评价法,包括单因子污染指数法和综合污染指数法等;不确定性评价方法有模糊评价法、灰色评价法等。

3.1 确定性方法

确定性方法的特点是原理清晰、计算简便,确定性方法主要有单因子评价法、综合指数法及分级评分法等。

单因子评价法是每一个评价指标与水环境质量标准的比值,确定各个评价因子的水质类别,其中最高类别即为断面水质类别^[37]。单因子评价法可明确指出水质问题的所在,直接了解水质状况与评价标准之间的关系,有利于提出针对性的保护与治理措施,是一种操作简便、评价结果偏于安全且目前被广泛采用的综合评价方法,但评价结果过于严格,各评价指标没有联系,不能综合反映水环境质量状况^[38]。张宏宇等^[39]运用单因子标识指数法评价浑河抚顺段水环境质量,直观地看出浑河抚顺段各个监测指标是否达到相应水环境功能区标准,还可直观地看出未达标指标的超标程度。

综合指数法是考虑多种水质因子,并采用加权平均等方法来计算的水质评价法。综合指数法往往表现出不同的形式,其代表性方法有均值型多因子指数法、均方根法、加权平均指数法、普拉特水质指数法、内梅罗水质指数法等^[40]。其中内梅罗指数法是当前最常用的综合污染指数评价方法,该方法考虑最大值对水环境质量的影响,在一定程度上弥补算术平均模式的不足。内梅罗水质污染指数法的特点在于数学过程简捷、运算方便、物理概念清晰,在加权过程中避免了权重系数中主观因素的影响,是较为成熟、运用广泛的指数法之一。徐彬等^[41]利用内梅罗水污染指数法评价了太湖水质情况,通过与单因子法对比表明内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中具有较好的适用性,评价结果与太湖的宏观治理进程较为吻合。

分级评分法是将评价指标的代表值与各类水体分级标准分别进行对照比较,确定其单项的污染分级,然后进行等级指标的综合叠加,综合评价水体的类别或等级。典型的分级评分法有布朗水质指数法、罗斯指数法、W 值水质指数法以及百分制分级法等^[42]。

3.2 不确定性方法

水质类别的界定具有一定区间范围,指标浓度包含在同一级别内的不同水体,其真实污染状况可能有所不同,如浓度值靠近类别上限和下限的两类水体,仅以一个确定性指标进行归类。不确定理论方法的出现为水质评价新模式的产生提供了理论依据和技术支持^[43]。典型的不确定性方法有综合模糊评判法、灰色评价法等。

综合模糊评判法是基于模糊数学理论的一种不确定性评价方法,用模糊数学集中隶属函数来描述水质分级的界限,评价结果更接近于实际情况。其基本思路是由监测数据确立各因子指标对各级标准的隶属度集,形成隶属度矩阵,再把因子的权重集与隶属度矩阵相乘,得到综合评判集,表明评价水体水质对各级标准水质的隶属程度,其中值最大的元素所对应的类别即为水体评价类别^[44-45]。吴运敏等^[46]将模糊综合评价应用于小流域河道水质时空变化研究中,通过模糊综合评价法体系构建表明了河流水质时空变化情况,进一步证明了该方法的适用性。

灰色评价法以灰色理论分析方法为基础,把水质评价指标视为灰色系统的灰离散函数进行分析。基本原理为先计算水体水质各指标实测浓度与各级水质标准的关联度,再根据关联度来确定水体水质级别^[47]。张旭等^[48]利用灰色聚类分析研究重庆北碚区境内支流河流水质,评价结果证明与实测结果吻合,其为污染控制提供了科学依据。

4 结论

流域水环境模型的应用,使得对流域污染负荷等问题有了进一步的把握,同时可较好地研究水环境中污染物的产生、迁移、转化等复杂过程,识别污染物来源与迁移规律、估算污染负荷及判别水质风险,为流域规划与管理提供决策依据。由于流域水环境的区域、特征等的差异性,开发应用综合性较好、实用性较强的水质模型,才能为流域水环境规划、管理过程提供更加准确的依据。

随着计算机、网络通信和自动化等应用技术进步,运用地理信息系统实现评价模型查询和运算的自动化、智能化,以及评价结果的直观可视化,是流域水环境污染、水质评价模型的发展趋势。结合流域尺度管理管控需求,开发能够应用于不同条件、不同目的以及稳态与动态模型结合、定性与定量结合的数学模型有望成为进一步研究的重点。

参考文献(References)

- [1] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 712-716.
Meng Wei. The strategy of comprehensive pollution prevention and cure of water environment in Chinese watershed[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 712-716.
- [2] 王夏晖, 陆军, 张庆忠, 等. 基于流域尺度的农业非点源污染物空间排放特征与总量控制研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2554-2561.
Wang Xiahui, Lu Jun, Zhang Qingzhong, et al. Spatial discharge and total load control of Non-point source pollutants based on the catchment scale[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2554-2561.
- [3] 董文平, 马涛, 刘强, 等. 流域水环境风险评估进展及其调控研究[J]. 环境工程, 2015, 1(12): 111-115.
Dong Wenping, Ma Tao, Liu Qiang, et al. Research on risk assessment and control of based on water environment[J]. Environmental Engineering, 2015, 1(12): 111-115.
- [4] 方玉杰, 王金保, 罗定贵, 等. 流域总量控制下赣江流域控制单元划

分技术[J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 540-549.

- Fang Yujie, Wan Jinbao, Luo Dinggui, et al. Study on control unit division technology for total amount control in Gangjiang Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(4): 540-549.
- [5] 朱瑶, 梁志伟, 李伟. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018.
Zhu Yao, Liang Zhiwei, Li Wei, et al. Watershed water environment pollution models and their applications: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [6] Soares-Filho B S, Nepstad D C, Curran L M, et al. Modelling conservation in the Amazon basin[J]. Nature, 2006, 440(7083): 520-523.
- [7] Wang W, Dong C, Dong W, et al. The design and implementation of risk assessment model for hazard installations based on AHP - FCE method: A case study of Nansi Lake Basin[J]. Ecological Informatics, 2015(2015): 1-10.
- [8] Hartnett M, Nash S. An integrated measurement and modeling methodology for estuarine water quality management[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(1): 9-19.
- [9] 曾思育, 杜鹏飞, 陈吉宁. 流域污染负荷模型的比较研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 108-112.
Zeng Siyu, Du Pengfei, Chen Jining, et al. Capability comparison among watershed pollution loading models[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(1): 108-112.
- [10] 胡锋平, 侯娟, 罗健文, 等. 赣江南昌段污染负荷及水环境容量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 192-195.
Hu Fengping, Hou Juan, Luo Jianwen, et al. Analysis of pollution loading and water environmental capacity of Gan river in Nanchang[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(12): 192-195.
- [11] Wang W, Liu X, Wang Y, et al. Analysis of point source pollution and water environmental quality variation trends in the Nansi Lake basin from 2002 to 2012[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(5): 4886-4897.
- [12] 黄国如, 姚锡良, 胡海英. 农业非点源污染负荷核算方法研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 28-32.
Huang Guoru, Yao Xiliang, Huang Haiying, et al. Research on methods of agricultural non point source pollution load calculation[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 28-32.
- [13] 耿润哲, 王晓燕, 赵雪松, 等. 基于模型的农业非点源污染最佳管理措施效率评估研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6397-6408.
Geng Runzhe, Wang Xiaoyan, Zhao Xuesong, et al. A review: Model estimations on effectiveness of best management practices for agricultural non-point source pollution control[J]. Acta Ecologica Sinca, 2014, 34(22): 6397-6408.
- [14] 胡文慧, 李光永, 孟国霞, 等. 基于SWAT模型的汾河灌区非点源污染负荷评估[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1309-1316.
Hu Wenhui, Li Guangyong, Meng Guoxia, et al. Evaluation of non-point source pollution load in Fenhe Irrigation District based on SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1309-1316.
- [15] 贾宁凤, 李旭霖, 陈焕伟, 等. AnnAGNPS模型数据库的建立—以黄土丘陵沟壑区砖窑沟流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 436-441.
Jia Ningfeng, Li Xulin, Chen Huangwei, et al. Database construction for AnnAGNPS model: Case study of Zhuanyaogou Watershed in hilly-gully loess plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2): 436-441.

- [16] 李家科, 李怀恩, 李亚娇. AnnAGNPS 模型研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 225-234.
Li Jiake, Li Huai'en, Li Yajiao. Development of study on AnnAGNPS model and its[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(2): 225-234.
- [17] 孙金华, 朱乾德, 颜志俊, 等. AGNPS 系列模型研究与应用综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 876-884.
Sun Jinhua, Zhu Qiande, Yan Zhijun, et al. A review of research and application of AGNPS model[J]. Advance in Water Science, 2009, 20(6): 876-884.
- [18] 张秋玲, 陈英旭, 俞巧钢, 等. 非点源污染模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1886-1890.
Zhang Qiuling, Chen Yingxu, Yu Qiaogang, et al. A review on non-point source pollution models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1886-1890.
- [19] 张玉斌, 郑粉莉. AGNPS 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 124-127.
Zhang Yubin, Zheng Fenli. AGNPS model and its application[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 124-127.
- [20] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4568-4578.
Tian Yaowu, Huang Zhilin, Xiao Wenfa. Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4568-4578.
- [21] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2532-2540.
Wang Long, Huang Yuefei, Wang Guangqian. Review of urban non-point source pollution models[J]. Environment Science, 2010, 31(10): 2532-2540.
- [22] 李彦伟, 尤学一, 季民, 等. 基于 SWMM 模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 40-43.
Li Yanwei, You Xueyi, Ji Min, et al. Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model[J]. China Water and Wastewater, 2010, 26(23): 40-43.
- [23] 马晓宇, 朱元励, 梅琨, 等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 95-102.
Ma Xiaoyu, Zhu Yuanli, Mei Kun, et al. Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(1): 95-102.
- [24] 赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1961-1972.
Zhao Lei, Yang Fengle, Yuan Guolin, et al. Simulation of the quantity and quality of the urban runoff[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1961-1972.
- [25] 孙文章. 东昌湖水水质模拟及水质评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
Sun Wenzhang. Research on water quality simulation and water quality evaluation of Dongchang Lake[D]. Jinan: Jinan University, 2007.
- [26] 冯启申, 朱琰, 李彦伟. 地表水水质模型概述[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(2): 1-4.
Feng Qisheng, Zhu Tan, Li Yanwei. Summary of surface water quality model[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 17(2): 1-4.
- [27] 方晓波, 张建英, 陈伟, 等. 基于 QUAL2K 模型的钱塘江流域安全纳污能力研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(8): 1402-1407.
Fang Xiaobo, Zhang Jianying, Chen Wei, et al. Assimilative capacity of the Qiantang River watershed based on a QUAL2K model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(8): 1402-1407.
- [28] 陈月, 席北斗, 何连生, 等. QUAL2K 模型在西苕溪干流梅溪段水质模拟中的应用[J]. 环境工程学报, 2008, 2(7): 1000-1003.
Chen Yue, Xi Beidou, He Liansheng, et al. Application of QUAL2K model for prediction of water quality in West Shaoxi[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(7): 1000-1003.
- [29] 张智, 李灿, 曾晓岚, 等. QUAL2E 模型在长江重庆段水质模拟中的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(1): 1-3.
Zhang Zhi, Li Can, Zeng Xiaolan, et al. Application of QUAL2E model to Chongqing urban section of the Yangtze River[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(1): 1-3.
- [30] 陈家军, 于艳新, 李森. QUAL2E 模型在呼和浩特市水质模拟中的应用[J]. 水资源保护, 2004, 20(3): 1-4.
Chen Jiajun, Yu Yanxin, Li Sen. Application of QUAL2E model to water quality simulation of Huhehaote City[J]. Water Resources Protection, 2004, 20(3): 1-4.
- [31] 程一曼. 基于 WASP7 的渭河陕西段水质模拟分析研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
Cheng Yiman. Study on water analysis for Weihe river in Shanxi based on WASP7[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [32] 郭旭, 解岳. 应用 WASP 模型模拟曲江池水质[J]. 供水技术, 2011, 5(3): 32-34.
Guo Xu, Xie Yue. Simulation of water quality of Qujiang Pool by WASP model[J]. Water Technology, 2011, 5(3): 32-34.
- [33] 姜毅, 张龙涛, 吕永涛, 等. 基于 WASP 模型城市人工景观水体水质的模拟[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(3): 306-310.
Jiang Yi, Zhang Longtao, Lü Yongtao, et al. Simulation of urban constructed landscape water quality based on WASP model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(3): 306-310.
- [34] 曹晓静, 张航. 地表水质模型研究综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(4): 18-21.
Cao Xiaojing, Zhang Hang. Commentary on study of surface water quality model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(4): 18-21.
- [35] 刘成, 袁琳, 余明星, 等. 河流水质评价方法综述[J]. 吉林农业(学术版), 2012(7): 226-227.
Liu Cheng, Yuan Lin, Yu Mingxing, et al. Review on assessment methods of river water quality[J]. Jilin Agriculture (Academic Edition), 2012(7): 226-227.
- [36] 安乐生. 地表水水质评价方法和水质预测模型的综合研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009.
An Lesheng. Study on surface water quality assessment method and water quality prediction model[D]. Qingdao: Qingdao University, 2009.
- [37] 朱灵峰, 王燕, 王阳阳, 等. 基于单因子指数法的海浪河水水质评价[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 326-327.
Zhu Lingfeng, Wang Yan, Wang Yangyang, et al. Water quality assessment of ocean wave River Based on single factor index method[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(3): 326-327.
- [38] 毛飞剑, 何义亮, 徐智敏, 等. 基于单因子水质标识指数法的东江河源段水质评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 327-331.
Mao Feijian, He Yiliang, Xu Zhimin, et al. Water quality evaluation of Heyuan reach of Dongjiang river based on the single factor water quality identification index[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5): 327-331.
- [39] 张宇红, 胡成. 单因子标识指数法在浑河抚顺段水质评价中的应用

- [J]. 环境科学与技术, 2011(增1): 276-279.
Zhang Yuhong, Hu Cheng. Application of Mark index method in water quality assessment of Hun River in Fushun City[J]. Environmental Science & Technology, 2011(S1): 276-279.
- [40] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 186-192.
Hu Cheng, Su Dan. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River[J]. Ecology and Environment, 2011, 20(1): 186-192.
- [41] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 38-40.
Xu Bin, Lin Canyao, Mao Xinwei. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 38-40.
- [42] 李名升, 张建辉, 梁念, 等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 617-624.
Li Mingsheng, Zhang Jianhui, Liang Nian, et al. Comparison of some common methods for water environmental quality assessment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 617-624.
- [43] 姜云超, 南忠仁. 三种不确定性水质综合评价方法比较研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3): 177-180.
Jiang Yunchao, Nan Zhongren. Comparison of three comprehensively uncertain water quality assessment methods [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(3): 177-180.
- [44] 单利平, 田卫, 魏强. 模糊综合评判方法在查干湖水质评价中的应用[J]. 湿地科学, 2015, 13(1): 124-128.
Shan Liping, Tian Wei, Wei Qiang. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in water quality assessment of dry lake[J]. Wetland Science, 2015, 13(1): 124-128.
- [45] 张龙江. 水质评价的模糊综合评判—加权平衡复合模型应用[J]. 环境工程, 2001, 19(6): 53-55.
Zhang Longjiang. Application of fuzzy comprehensive judgement and weighted average models to water quality assessment[J]. Environmental Engineering, 2001, 19(6): 53-55.
- [46] 吴运敏, 陈求稳, 李静. 模糊综合评价在小流域河道水质时空变化研究中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1198-1205.
Wu Yunmin, Chen Qiwen, Li Jing. Fuzzy comprehensive assessment on spatio-temporal variations of water quality of a small catchment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1198-1205.
- [47] 庞博, 李玉霞, 童玲. 基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 185-188.
Pang Bo, Li Yuxia, Tong Ling. Application of grey clustering method and fuzzy comprehensive assessment method to assess eutrophication level of water quality[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 185-188.
- [48] 张旭, 江长胜, 郝庆菊. 灰色聚类法在重庆北碚区境内支流水质评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2010(2): 241-245.
Zhang Xu, Jiang Changsheng, Hao Qingju. Application of the Gray Clustering method on water quality evaluation of the Tributary Rivers of Beibei district of Chongqing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010(2): 241-245.

Watershed water environment pollution models and their application

SUN Lifeng¹, WANG Yufan², LIU Xiaohui², LIU Ying², LU Shaoyong³

1. Computer Engineering Institute, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China

2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

3. State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract The basin water environmental model is an important tool for water environment problem of river basin, which can provide a decision basis for planning and management. In this paper we firstly review river basin models of water environment pollution and water quality risk assessment. Secondly, on the basis of river basin water environment pollution load influence and water quality simulation for whole basin planning, we discuss and summarize the characteristics and applicability of various models of water environment including water pollution load model, water quality simulation model and water quality assessment. Thirdly, combined with agricultural areal source and urban areal source pollution load model, steady-state and dynamic water quality model, certainty and uncertainty evaluation model for water quality simulation, we analyze the development and importance of research and application in river basin water environment models. It is pointed out that we can provide reference data for total control by estimating the watershed pollutant emissions using water pollution load model; we can provide support for river basin water environment pollution control decision-making by effectively distinguishing the rules of migration of pollutants in the water with the water quality simulation model; and we can put forward new risk prevention and control strategies by identifying pollutant source and key risk areas through quality evaluation of water environment.

Keywords river basin water environment; pollution load; water quality simulation; risk assessment

(责任编辑 王媛媛)