

基于 GWLF 模型的新安江上游练江流域 面源污染特征解析

赵越¹, 齐作达², 赵康平¹, 沙健³, 王玉秋²

(1. 环境保护部环境规划院, 北京 010000; 2. 南开大学 环境科学与工程学院 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 天津师范大学 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300073)

摘要: 应用通用流域污染负荷模型 (GWLF), 对新安江上游练江流域 2005–2012 年的水文化学过程进行了模拟, 在月尺度上评估了流域把口断面的水量及溶解性总氮污染物通量, 并解析了其负荷来源分配。结果表明: GWLF 模型能够作为有效的决策支持工具对目标流域开展有效评估, 模拟结果纳氏效率系数在 0.75 以上。从年均水平上看, 流域溶解态总氮主要通过地表径流和地下水传输, 分别占到全部负荷量的 42% 和 40%, 且与流域水文关系密切。水质较差的风险敏感期主要出现在水量较少的时段, 且该期间内农村生活源 (37%) 和点源 (9%) 贡献相对显著, 应予以特别关注。上述流域面源污染特征解析结果能够为实施有针对性的管理措施提供参考。

关键词: 流域负荷模型; 水文化学过程; 溶解态总氮; 污染源解析; 练江; 新安江

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0005-05

Feature analysis of watershed nonpoint source pollution of Lianjiang watershed in upstream of Xin'an river based on GWLF model

ZHAO Yue¹, QI Zuoda², ZHAO Kangping¹, SHA Jian³, WANG Yuqiu²

(1. Institute of Environment Planning of the Ministry of Environmental Protection, Beijing 010000, China;

2. Key Laboratory of Environmental Pollution Process And Benchmark of Ministry of Education, Institute of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjing 300071, China; 3. Key Laboratory of Water Resources And Water Environment of Tianjin, Tianjin Normal University, Tianjin 300073, China)

Abstract: The paper used generalized watershed loading function (GWLF) model to simulate the hydro-chemistry process of Lianjiang watershed in the upstream of Xin'anjiang River from 2005 to 2010, and estimated monthly streamflows and fluxes of dissolved nitrogen as well as its source allocation. The result showed that as a valid tool of decision-making, GWLF can effectively estimated the watershed. The Nash-efficiency coefficient of simulation result is above 0.75. From the view of average annual results, the dissolved total nitrogen which amount is transported through surface runoff and groundwater hold 42% and 40% respectively, and has greater relationship with hydrological condition. The high sensitive risk with poor water quality usually occurs in low flow period. The load contributions from septic system (37%) and point source (9%) are significant, which should be particularly paid attention to. The result can provide a reference for the contruction of well-targeted management measures.

Key words: GWLF model; hydro chemistry process; dissolved nitrogen; pollution source apportionment; Lianjiang river; Xin'an river

1 研究背景

近年来, 面源污染问题越来越受到相关科研工

作者以及水环境管理人员的关注^[1-3]。随着我国面向点源排放的一系列管理控制措施的实施, 点源污染得到了一定程度的遏制, 而面源污染问题则相对

收稿日期: 2014-12-24; 修回日期: 2015-02-14

基金项目: 环境保护部国家环境保护规划研究项目 (2013A218)

作者简介: 赵越 (1978-), 男, 辽宁辽中人, 博士, 副研究员, 主要从事水污染防治技术支持、流域水环境管理等研究。

通讯作者: 王玉秋 (1965-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境管理决策与技术支持、流域及水源地保护战略等研究。

愈发显著^[4]。国外发达国家的研究表明,即使点源污染全部得到有效治理,如果不对因人类活动而导致的面源污染加以有效干预,水环境风险仍会十分显著^[5-6]。在流域尺度上开展针对面源污染的综合治理,已成为当前水环境管理的重要内容^[7-8]。

与点源治理类似,明确污染负荷来源与特征,采取有针对性的治理措施是有效开展面源污染防治的基础和前提^[9]。然而,面源污染具有开放性、多重性、动态性等特征,且与流域水文过程关系紧密,这使得对面源污染负荷来源构成的分析与判断变得十分困难,相关评估方法也受到广大研究工作者的关注。传统的面源评估方法包括基于经验主义的定性分析、静态输出系数核算,以及综合多元统计分析等方法。刘亚琼等^[10]基于输出系数模型估算了北京地区的农业面源污染负荷。朱海宇等^[11]运用因子分析、主成分提取和逐步回归等计量方法,分析了钱塘江水源区农业面源污染的微观影响因素。

然而,基于上述方法评估面源负荷行为,其结果往往存在较为显著且难以估算的不确定性,对管理决策的有效性带来潜在风险。流域模型技术能够基于流域水文化学过程量化模拟解析污染源构成并评估其特征,已成为国际上通用且有效的流域水环境管理决策支持工具^[12]。其中的通用流域污染负荷模型(GWLF)以其模型复杂度适中、所需数据量较少、结果可靠且能满足一般的环境管理需求的特点,在国内外均有较为广泛的应用^[13-14]。

通用流域污染负荷模型(GWLF),是1987年由美国康奈尔大学提出的一种半分布式流域水文化学模型算法,设计用于在中尺度流域(不超过1万km²)评估其水文及污染物通量,能够在月尺度上提供可靠结果,并解析污染源构成。GWLF模型的水文架构以日为基本时间步长,同时忽略水体在空间上的传输时间,使用径流曲线方程(CSC-CN)模拟地表径流过程,基于不同土地利用类型开展分布式计算,而使用一维线性水库方法,基于日水量平衡和退水与渗率系数,计算地下潜流。GWLF模型对溶解性营养盐通量的评估则使用集总参数法,基于全流域加权平均的地表径流和地下水浓度分别结合相对应的水量核算污染物通量,同时使用4种典型的农村生活污水排放方式,计算无排水设施的农村人口面源生活源污染负荷。

在过去的几十年中,GWLF模型在世界范围内得到广泛的应用实践。Jennings等^[15]在2009年使用人为设计的气候变化以及潜在的人口和土地利用类型

变化情景,对爱尔兰西南部 Leane 湖流域的磷污染负荷输出,基于GWLF模型进行了定量表征。杜新忠等^[16]利用该进的GWLF模型,对我国海河流域柳河上游的月径流及总氮负荷进行了模拟,并基于模型结果分析了各污染源的贡献率及其季节性差异。

同时,基于不同案例区特点和需求,GWLF模型原始算法已经在不同平台被进行了二次开发,包括与地理信息系统(GIS)结合的MapShed,基于Visual Basic语言及其图形用户界面的Basinsim,以及在微软Excel平台下开发的ReNuMa等。本论文研究使用的是由美国康奈尔大学最新开发的ReNuMa 2.2.1版本模型软件作为研究平台,其通过将基于氮平衡研究的净氮输入平衡系统(NANI)与GWLF模型结合,增加细致的生物地球化学参数,构建人类活动行为与径流污染物浓度间的关系,以提高模型对营养盐过程的模拟精度^[17],如下式所示。

$$C_{for} = \begin{cases} I_{for} & m < T_{for} \\ I_{for} + n_{for}(m - T_{for}) & m \geq T_{for} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{ag} = \begin{cases} I_{ag} + S_{ag}M & M < T_{ag} \\ I_{ag} + S_{ag}M + n_{ag}(m - T_{ag}) & m \geq \text{Threshold}_{ag} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{for} 为源自林地型土地利用类型区上的地表径流溶解态氮浓度,mg/L; m 为目标流域的年总大气氮沉降,kg/(hm²·a); C_{ag} 为源自农业型土地利用类型区上的地表径流溶解态氮浓度,mg/L; M 为目标流域的年总氮污染物输入量,kg/(hm²·a),其包括每年的生物固氮量、化肥施用量、畜禽养殖导致的有机肥输入量,以及大气沉降量等。 I_{for} 、 I_{ag} 、 n_{for} 、 n_{ag} 、 S_{ag} 、 T_{for} 、 T_{ag} 等均为新增的细致参数,可通过校准得到。利用改进的细致径流浓度核算模块,能够更好地反映人类活动与污染负荷间的关系,降低模型结构性不确定度,具有较好的应用效果^[18-20]。本文利用基于GWLF模型算法的ReNuMu模型软件,作为决策支持工具,对新安江流域上游重要支流的练江的总氮污染负荷过程开展了模拟评估,解析了污染源结构及负荷特征,为管理提供了相关决策支持信息。

2 研究方法

2.1 研究区介绍

本文选取我国新安江流域上游的重要支流练江作为研究区,见图1。练江流域位于安徽省黄山市和绩溪县,流域面积约1600 km²。练江发源于绩溪

县黄花尖西麓,与新安江干流在浦口交汇,后经深渡在街口向东注入浙江省西部的千岛湖,具有重要的经济社会与生态服务价值。练江流域整体开发程度较低,最低海拔 100 m,最高海拔 1 522 m,平均海拔 378 m,平均坡度13.60°,年平均气温 14.9℃,年均降水量 1 683 mm。流域内的土地利用类型以林地为主,占全部流域面积的 74%,其次为农业耕地,占到 23%,其余部分为草地、城镇用地以及水面。本研究选取位于流域出口的渔梁水文水质站点为把口断面,其年均流量 34 m³/s,年总氮负荷通量 298 × 10³ kg。

2.2 模型输入数据的处理与转化

本文研究所需的原始数据来源如表 1 所述。其中,针对基础数据的预处理,主要包括流域河网的生

成与流域划分、气象数据的获取和转化、土地利用类型面积的核算、面向模型需要的人口数据统计,以及对基于区县的污普数据向模型所需流域化数据的处理转化等。

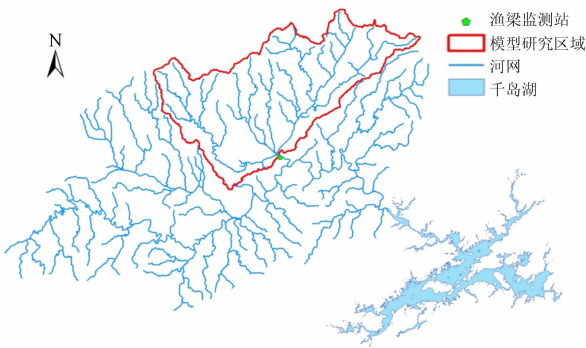


图 1 练江流域基础环境信息

表 1 练江流域 GWLF 模型应用原始数据来源

项目	来源	精度属性	年份
数字高程图	中国科学院科学数据库	90m × 90m	2000
土地利用	地球系统科学数据共享平台	1km × 1km	2000
人口	地球系统科学数据共享平台	1km × 1km	2003
雨量	黄山市水务局	逐日	2005 – 2012
气温	中国气象科学数据共享服务网	逐日	2005 – 2012
污染源	黄山市环境保护局	区县调查	2008
水量	黄山市水务局	逐月	2005 – 2012
河道水质	黄山市环境监测站	逐月	2005 – 2012

面向模型需求的数据转化,主要基于ArcGIS9.3 软件平台进行。利用 Archydro 工具,基于流域数字高程地图(DEM)进行流域水文分析,得到河网和流域分区。基于各雨量站点经纬度信息,生成雨量站点泰森多边形,再利用已得到的目标流域 shp 图,应用 Clip 命令得到叠加图层,进而计算得到加权平均日降水量数据。利用 2000 年全国 1km 网格土地利用类型栅格数据,使用 ArcGIS 9.3 中的 Spatial Analyst Tools 工具包下的 Extract by Mask 命令,分别对每一种土地利用类型进行提取,得到流域内对应类别土地利用类型的面积。类似的,基于 2003 年全国 1km 网格人口栅格数据,可得到流域内对应类别人口的数据,将得到的数据作为模型基础数据集输入,即可实现模型运行。

3 GWLF 模型模拟与结果评价

3.1 参数校准

选取渔梁监测站 2005 – 2012 年共 8 a 的逐月水量和水质数据,作为校准和验证模型有效性的依

据。其中,将 2005 – 2009 年共 5 a 的数据作为校准数据,用于对模型参数的校准;将 2010 – 2012 年共 3 a 的数据作为验证数据,用于对校准所得参数集的有效性进行独立检验。校准过程按照水文参数和水质参数依次进行,校准目标为模拟值与实测值之间的误差平方和,使用纳氏效率系数作为评价模拟效果的检验统计量。主要的参数校准结果如表 2 所示。利用校准得到的模型参数集,可以模拟目标流域的逐月水量及溶解态总氮通量,如 3.2 节和 3.3 节所述。

3.2 水文模拟结果

利用模型基础数据集和校准得到的 GWLF 模型水文参数集,模拟得到 2005 – 2012 年练江流域出口断面的逐月水量(图 2)。将模拟结果与渔梁水文监测站实测值对比可知,在校准期,模型纳氏效率系数达到 0.93,而在验证期,纳氏效率系数也可达 0.91,说明经校准后的 GWLF 模型能够很好的拟合流域水文过程,可依据该结果和参数数据集进一步开展面向典型污染物负荷通量的水质模拟。

表 2 练江流域 GWLF 模型水文参数校准结果

参数类别	参数项	参数值
地表径流 CN 值	耕地	75.04
	水田	87.31
	灌木林	50.30
	有林地	65.48
	疏林地	70.01
	其他林	57.93
	高覆草	58.09
	低覆草	79.00
	河渠	100.00
	滩地	98.15
	农村	95.18
	城镇	98.19
地下水转移参数	建设地	98.00
	退水系数	0.044
	渗率系数	0.072

表 3 练江流域 GWLF 模型营养盐参数校准结果

参数项	I_{for}	n_{for}	T_{for}	I_{ag}	n_{ag}	s_{ag}	T_{ag}
参数值	0.014	0.20	10	1.50	0.10	0.01	130

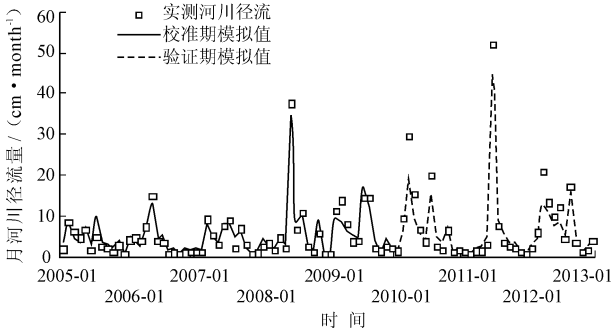


图 2 练江流域逐月水量模拟结果

3.3 水质模拟结果

与水文过程类似,利用模型基础数据集和校准得到的 GWLF 模型水文、水质参数集,模拟得到 2005 – 2012 年练江流域出口断面的逐月溶解态总氮通量(图 3)。将模拟结果与渔梁水质监测站实测值对比可知,在校准期,模型纳氏效率系数达到 0.79,而在验证期,纳氏效率系数也可达 0.75,说明经校准后的 GWLF 模型能够很好的拟合流域溶解态总氮污染物的水文化学过程,可依据该模型结果和参数数据集进一步开展面向管理需求的污染源解析及其特征分析。

4 污染源解析与特征分析

利用校准后的 GWLF 模型,分析了练江流域溶

解性总氮污染物的来源构成及其差异性特征,污染源构成按照地表径流源、地下水源、农村生活源、点源的分类展开,其结果如表 4 所示。由污染源解析结果可知,从多年平均水平上看,基于整个模拟周期(2005 – 2012)内的平均年负荷量统计,地表径流和地下水是溶解态总氮污染物在流域内主要的传输形式,而由农村生活源导致的溶解态总氮污染同样不容小觑,由点源产生的流域溶解态总氮年负荷贡献绝对量不显著,仅占全部负荷的 2.36%。

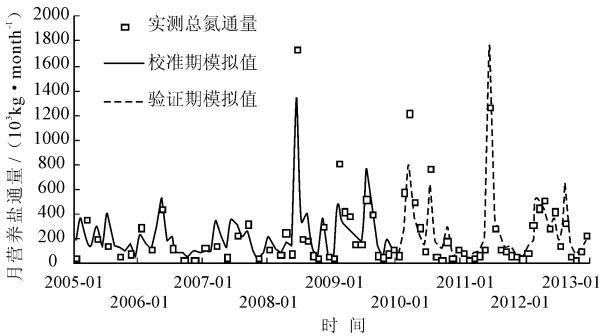


图 3 练江流域逐月溶解态总氮通量模拟结果

表 4 2005 – 2012 年不同时期练江流域溶解性总氮污染物来源构成

不同时期	地表径流/ 径流/%	地下水/ %	农村生活/ %	点源/ %
	径流/%	%	生活/%	%
多年平均	42.00	40.08	15.55	2.36
丰水期	59.96	29.20	9.76	1.07
平水期	27.52	51.83	18.04	2.60
少水期	16.23	56.03	23.64	4.10
枯水期	2.93	54.19	35.07	7.81
环境敏感期	12.90	41.36	37.30	8.44

然而,练江流域溶解态总氮以面源污染为主,其污染强度和行为具有显著的动态性特征,与流域水文状况关系密切,在不同背景条件下其污染源构成也存在显著差异。以月总水量的 25% 分位点为标准对月份进行划分,可以对不同月份组内的污染源构成分别开展解析,进而得到不同水情条件下的流域溶解态总氮污染物构成特征。由分析结果可知,地下水源比例在丰水期最低,在其他时期内贡献率稳定;地表径流源在水量丰沛的时期贡献比例较高,且其贡献率随水量减少而下降,到枯水期达到最低。与地表径流源相反,农村生活源和点源的贡献率随水量减少而上升,虽然年总贡献率较低,但在枯水期农村生活源和点源的影响较为显著。

另一方面,当关注溶解态总氮浓度最高的 10% 的月份,即环境风险最为显著的敏感时期,其污染源

构成比例特征与年总体水平存在较大差异。在该环境敏感期内,地下水和农村生活源为主要的污染物来源。分析溶解态总氮浓度较高的月份,可见其月水量普遍较低。特别地,在该时期,点源所占比例达到8.44%,虽然点源在全年总体上看并不显著,但在关注水质达标的环境管理实践中应在敏感时期对其予以特别控制。

5 结论与展望

本文研究使用GWLF模型对新安江上游练江流域的水文化学过程开展了模拟实践研究。结果表明,GWLF模型能够在月水平上评估练江流域水量及溶解态总氮通量,并解析其污染物来源与构成特征。在全尺度上看,目标流域溶解态总氮以面源污染为主,主要经地表径流和地下水传输,但在水量较低的敏感期,容易出现水质较差的状况,且此时农村生活源和点源贡献较为显著,在管理上应予以特别关注。

基于本文提出的GWLF模型,能够在我国开展有效的流域污染源解析,评估在不同水文、气象条件下的污染物来源构成特征,并对其各自贡献进行定量化解析,明晰敏感期关键污染物的主要来源。使用GWLF模型作为流域管理支持工具,能够建立科学的决策支撑体系,进而提升流域水环境管理的科学化和精细化水平,为可持续的流域水环境管理提供技术支持。

参考文献:

- [1] Kaushal S S, Groffman P M, Band L E, et al. Tracking non-point source nitrogen pollution in human-impacted watersheds[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(19):8225-8232.
- [2] 王雪蕾,蔡明勇,钟部卿,等. 辽河流域非点源污染空间特征遥感解析[J]. *环境科学*, 2013, 34(10):3788-3796.
- [3] 周亮,徐建刚,孙东琪,等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. *环境科学*, 2013, 34(2):547-554.
- [4] 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.
- [5] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, et al. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams[J]. *Science*, 2001, 292(5514):86-90.
- [6] Hardy S D, Koontz T M. Reducing nonpoint source pollution through collaboration: policies and programs across the U. S. States[J]. *Environmental Management*, 2008, 41(3):301-310.
- [7] 王海宁,薛惠锋. 中国水污染防治工作的问题与对策[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(2):24-27.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7):7-12.
- [11] 朱海宇,赵连阁,王学渊. 水源区农业面源污染的微观影响因素研究——以钱塘江流域为例[J]. *新疆农垦经济*, 2014(12):6-11+76.
- [12] 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.
- [13] Ning S K, Jeng K Y, Chang N B. Evaluation of non-point sources pollution impacts by integrated 3S information technologies and GWLF modeling[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 46(6-7):217-224.
- [14] 王东,赵越,徐敏,等. 区域营养盐管理模型在沙河流域的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(5):98-101.
- [15] Jennings E, Allott N, Pierson D C, et al. Impacts of climate change on phosphorus loading from a grassland catchment: Implications for future management[J]. *Water research*, 2009, 43(17):4316-4326.
- [16] 杜新忠,李叙勇,张汪寿,等. 基于GWLF模型的流域总氮负荷模拟及污染源解析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(3):19-23.
- [17] 刘敏,谢阳村,王东,等. 基于ReNuMa模型的长春石头口门水库流域非点源污染负荷模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(6):70-72+78.
- [18] Sha Jian, Li Zeli, Swaney D P, et al. Application of a bayesian watershed model linking multivariate statistical analysis to support watershed-scale nitrogen management in China[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11):3681-3695.
- [19] Sha Jian, Liu Min, Wang Dong, et al. Application of the ReNuMa model in the Sha He river watershed: Tools for watershed environmental management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124:40-50.
- [20] Sha Jian, Swaney D P, Hong Bongghi, et al. Estimation of watershed hydrologic processes in arid conditions with a modified watershed model[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519:3550-3556.