

沙颍河流域(河南段)非点源氨氮污染模拟与时空特征分析

杨琴^{1,2}, 张永勇^{1*}

1.中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101
2.中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 沙颍河流域是我国淮河流域污染最严重的区域之一。为揭示流域非点源的时空分布特征并评估其对水污染的贡献,以沙颍河流域(河南段)为研究区,采用流域水循环系统模型(HEQM模型)模拟了重点断面2012—2015年月径流和氨氮浓度过程,辨识了污染源类型及其贡献,揭示了非点源负荷的年内和年际变化。结果表明:①径流和氨氮浓度的模拟效果较好,HEQM模型在沙颍河流域(河南段)具有较好的适用性。②非点源氨氮污染负荷占多年平均总负荷量的37.40%,在污染时期占比为29.32%。沙河和颍河上游污染时期的非点源负荷比例较高,分别为91.49%和90.45%。③非点源氨氮负荷对丰水期(6—9月)和平水期(3—5月、10—11月)污染的贡献较大,占总负荷的48.83%和51.92%;从年际变化来看,2012—2015年各年份的空间分布特征基本相似,但2014—2015年单位面积非点源污染负荷较2012—2013年明显下降。研究显示,沙颍河流域(河南段)非点源对氨氮污染的贡献已不可忽视,丰水期和平水期是非点源污染治理的关键时期。

关键词: 非点源氨氮; 时空变化; 污染贡献率; HEQM模型; 沙颍河流域

中图分类号: X522

文章编号: 1001-6929(2021)02-0319-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.05.20

Non-Point Source Pollution Simulation of Ammonia Nitrogen and Spatial-Temporal Characteristics Analysis in Shaying River Catchment (Henan Section)

YANG Qin^{1,2}, ZHANG Yongyong^{1*}

1.Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Huai River Basin is one of critical regions for water pollution control in China, and the Shaying River is one of the most polluted tributaries in the Huai River Basin. In this study, the Shaying River catchment (Henan Section) was taken as the study area to investigate spatial and temporal distributions of non-point source pollutants and their contributions to water pollution. The integrated water system model (HEQM) was used to simulate monthly runoff and ammonia nitrogen (NH₃-N) concentrations at some key sections from 2012 to 2015. The NH₃-N pollution sources, their contributions and temporal (interannual and annual) variation characteristics were analyzed. The results showed that: (1) The simulation performance of both runoff and NH₃-N concentration was satisfactory, and the HEQM model had good applicability in the Shaying River catchment (Henan Section). (2) During the pollution period and the whole period, the non-point source NH₃-N load accounted for 29.32% and 37.40% of the total load, respectively. The percentages of non-point source were much greater during the pollution period in the Sha River (91.49%) and the upper Ying River (90.45%). (3) The contributions of non-point source NH₃-N load to water pollution were greater during the high-flow (June-September) and mean-flow (March-May and October-November) periods than that during the low-flow period (December-February), and the percentages were 48.83% and 51.92%. For the interannual variation, the non-point source NH₃-N load per square kilometer decreased obviously, and the spatial distribution was basically similar every year. Therefore, the non-point source pollution in the Shaying River catchment (Henan Section) could not be ignored for the water pollution control in the Huai River Basin, and the high-flow and mean-flow periods are critical for pollution control of the non-point NH₃⁺-N source.

Keywords: non-point source of ammonia nitrogen; temporal and spatial variations; pollution contribution; HEQM model; Shaying River Basin

收稿日期: 2019-12-19 修订日期: 2020-04-18

作者简介: 杨琴(1994-),女(土家族),贵州铜仁人, yangq.16s@igsrr.ac.cn.

* 责任作者,张永勇(1981-),男,湖北京山人,副研究员,博士,主要从事复杂流域水循环与环境水文学研究, zhangyy003@igsrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41671024, 41807171)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41671024, 41807171)

水污染是目前危害公众健康和制约流域绿色发展的突出问题^[1-2]。随着我国经济社会的快速发展,水环境急剧恶化^[3-4]。《2018年中国生态环境状况公报》显示,1 935个监测断面中29%的断面水质处于GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类及以下,其中6.7%的水体使用功能丧失。近年来随着水污染治理水平的提高,点源污染得到了有效缓解,但农业等非点源已成为流域水污染的重要来源^[5-6]。研究表明,全球约有30%~50%的地区受到非点源污染的影响,其中美国60%左右的河流污染与非点源污染密切相关^[7-8],我国太湖、巢湖等流域非点源污染负荷的贡献已经超过点源^[9-10]。

非点源污染负荷估算常采用数学模型准确描述污染物在土壤-水体介质中的迁移转化等过程,从而定量估算负荷总量,并揭示其空间分布特征。常用的模型有输出系数模型^[11]、基于降雨-径流关系扩展的模型^[12-14]和基于生物地球化学过程扩展的模型^[15]等。输出系数模型只能反映特定地区污染物的输出且忽略了污染物的迁移转化过程,估算精度较低^[9]。降雨-径流关系扩展模型(如SWAT、ANSWERS和HSPF模型)强调流域水循环过程对水质过程的驱动,忽视了水量水质等过程之间的相互作用机制,对土壤营养物质循环过程的描述不够精细^[12-14]。生物地球化学过程扩展模型(如EPIC、DNDC模型)强调作物的生理生态过程、营养源在土壤层中的垂向运动等,无法模拟水和营养源在流域内的运移过程^[15]。因此,基于水循环过程的纽带作用,耦合生物地球化学模型对氮、磷等营养元素循环的精细描述已成为非点源污染模型研究的热点问题^[16-17]。ZHANG等^[17]探索了水循环与氮、碳等生物地球化学循环之间的相互作用机制,以水和营养源循环作为连接与水相关各过程的纽带,构建了流域水循环系统模型(HEQM模型),有效提高了水量水质的耦合模拟精度,已广泛应用于我国流域非点源污染估算^[10,18]。

淮河流域是我国污染最严重的流域之一。自“九五”以来,我国已投入数百亿元对整治流域水污染并取得了突破性进展,获得了显著的社会和生态效益^[1,19-20],但淮河流域的污染控制和环境管理多以点源控制为主,对非点源污染的重视程度仍不足。近年来,非点源污染负荷占总入河负荷的比重呈逐渐上升的趋势,已成为不可忽视的污染源,流域水环境状况仍不容乐观^[20]。该研究以淮河流域最大支流沙颍河为例,采用HEQM模型模拟重点断面的径流和氨氮浓度过程,分析氨氮污染空间分布、来源类型及其贡

献,以及非点源负荷的年内年际变化特征等,以期为沙颍河流域水污染的控制与治理提供科学依据与技术支持,并为流域水资源的合理规划提供理论参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

沙颍河是淮河的最大支流,也是淮河流域水污染最严重的支流之一。沙颍河发源于河南省西部的伏牛山区,向东流经河南、安徽两省,地跨平顶山、漯河、周口、界首和阜阳等40个地区,最终汇入淮河干流。其中,沙颍河(河南段)为纸店断面以上流域(见图1),河道全长410 km,集水面积 $3.25 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占沙颍河流域总面积的82%^[4],主要支流包括沙河、北汝河、颍河、清溪河和贾鲁河等。研究区位于暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温和降水量分别为 $14 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 和750 mm。沙颍河(河南段)流域人口密度较大,是河南省重要的粮食生产基地。由于大量化肥和农药的施用,加上大量点源排放和闸坝调控等人类活动的影响^[21],流域内水环境状况不容乐观。

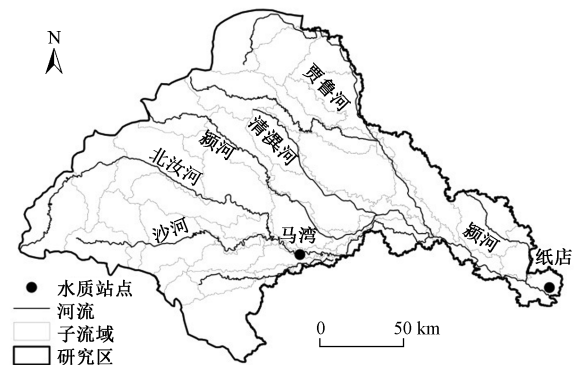


图1 沙颍河流域(河南段)位置图

Fig.1 Location of Shaying River catchment (Henan Section)

1.2 HEQM模型

HEQM模型是由张永勇等开发完成的流域水循环多过程耦合模型。该模型以水和营养物(碳、氮和磷等)循环作为联系纽带,能够模拟气候变化和人类活动(土地利用、水利工程以及农业管理措施等)影响下径流、水-土及营养源流失、水质浓度、作物产量等要素时空变化特征^[17]。HEQM模型由8个子模块组成,即水文循环模块、土壤生物地球化学模块、作物生长模块、土壤侵蚀模块、物质运移模块、水体水质模块、水库调度模块和参数分析模块。水文循环过程模拟采用分布式时变增益模型(distributed time variant gain model,简称“DTVGM”)^[22],考虑了不同土地利用类型的产汇流特征和水利工程对河道水循环特征的影响。水质过程主要包括营养物的生

物地球化学过程、陆面污染物运移过程、河道污染物迁移转化过程以及湖泊水体污染物的交换、蓄积和降解等过程,其中土壤生物地球化学过程模拟主要基于反硝化-分解模型(denitrification-decomposition,简称“DNDC”),细致刻画多种形态的碳、氮等营养物质在土壤中的硝化反硝化、矿化、淋溶、固化等过程。

1.3 数据来源与处理

研究区水量水质过程模拟所需的基础数据包括地理信息(GIS)、气象、水文、水质、社会经济及农业管理信息等(见表1)。土地利用类型分为7类,包括

水田、旱地、林地、草地、水域、城镇和荒地;日降雨和日最高、最低气温采用反距离权重法插值到各子流域;点源污染排放数据根据排污口的具体位置输入在对应子流域中;农村居民生活污水、畜禽养殖和施肥等是非点源污染的主要来源,根据面积比例和地理位置由行政区分配到各子流域。另外,为评估研究区非点源氮氮对河流水污染的贡献,研究将各河流的水功能区划标准定为GB 3838—2002 III类,对应的氨氮浓度为1.0 mg/L。若氨氮浓度大于或等于1.0 mg/L,则该河段受到污染;反之没有受到污染。

表1 研究区 HEQM 模型基础数据信息
Table 1 Basic data source for HEQM application

数据类型	尺度	属性	数据来源
DEM	90 m×90 m 网格	高程、坡度、坡长	
GIS	土地利用	1:1 000 000	中国科学院资源环境科学数据中心
	土壤类型	1:4 000 000	
气象	雨量站	201 个(2011—2015 年)	日降雨量
	气象站	6 个(2011—2015 年)	日最高、最低气温
水文	水文站	2 个(2012—2015 年)	日径流量
	闸坝属性	24 个大中小型闸坝	库容、水位、出流量
水质	水质站	2 个(2012—2015 年)	月氨氮实测浓度
	排污口	约 200 个(2011—2015 年)	氨氮年排放负荷
社会经济	行政区	2011—2015 年	人口、畜禽养殖、水资源消耗
农业管理	行政区	2011—2015 年	农业施肥、农田灌溉

1.4 模型参数率定和验证

基于流域 DEM、水系和站点地理位置等,以纸店站所在位置为流域出口,将研究区划分为 40 个子流域(见图1)。基于 HEQM 的参数分析模块,分别采用 LH-OAT^[23] 和 SCE-UA 自动优化算法^[24] 对模型参数进行敏感性分析和优化。径流和氨氮浓度模拟的敏感性参数列表及其取值范围见表 2、3^[25]。

参数优化遵循先水量后水质过程、先上游后下游的原则。采用马湾站和纸店站 2012—2015 年月径流量和月氨氮浓度的实测过程,对 HEQM 模型水量水质参数进行率定和验证。其中,2011 年数据用于模型预热,2012—2013 年为率定期,2014—2015 年为验证期。评估指标有 Nbias (标准偏差)、R (相关系数) 和 NS (Nash-Sutcliffe 系数),计算公式:

$$Nbias = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (1)$$

表2 径流模拟的敏感性参数信息汇总

Table 2 Selected sensitivity hydrological parameters of HEQM

参数符号	物理意义	单位	最小值	最大值
fc	上层土壤到下层土壤的稳定下渗率	mm/h	0	120
WM	上层饱和和土壤含水率	—	0.45	0.75
Tg	地下水滞留时间	s	1	100
g1	地表径流系数	—	0	3
g2	土壤水影响系数	—	0	3
Kr	土壤水出流系数	—	0	1
WMc	土壤田间持水量	—	0.2	0.45
Ketp	壤蒸散发补充系数	—	0	3
Krg	地下水出流系数	—	0	1
coef_r	灌溉率	—	0.01	1
maxnonfld	从丰水期到枯水期的闸坝调节天数	d	0.05	31
maxfld	从枯水期到丰水期的调节天数	d	0.05	31
k_pop	特征河流长度比例	—	0.1	20

表3 氨氮浓度模拟的敏感性参数信息汇总

Table 3 Selected sensitivity parameters for NH₃-N simulation in HEQM

参数符号	物理意义	单位	最小值	最大值
res_set(isub,3)	水库中氨氮的沉降速率	m/a	0	100
rk1(isub)	20℃时河水中COD的氧化速率	d ⁻¹	0.02	3.4
res_bc1(isub)	20℃时水库中氨氮氧化为亚硝酸氮的速率	d ⁻¹	0.1	1
rk3(isub)	20℃时河水中COD的沉降速率	d ⁻¹	-0.36	0.36
res_rk1(isub)	20℃时水库中COD的氧化速率	d ⁻¹	0.02	3.4
bc1(isub)	20℃时河水中氨氮氧化为亚硝酸氮的速率	d ⁻¹	0.1	1
res_set(isub,2)	水库中亚硝酸氮的沉降速率	m/a	0	269
res_bc3(isub)	20℃时水库中有机氮氧化为氨氮的速率	d ⁻¹	0.2	0.4
bc3(isub)	20℃时河水中有机氮氧化为氨氮的速率	d ⁻¹	0.2	0.4
rs3(isub)	20℃时河水中氨氮的沉降速率	mg/(m ² ·d)	-50	50
res_scu(isub,3)	水库河床底泥中氨氮的再悬浮系数	m/a	0	69
rs4(isub)	20℃时河水中有机氮的沉降速率	d ⁻¹	0.001	0.1
bc2(isub)	20℃时河水中亚硝酸氮氧化为硝酸氮的速率	d ⁻¹	0.2	2
res_scu(isub,2)	水库河床底泥中COD的再悬浮系数	m/a	0	269
DRF	黏土对有机质分解影响的相关参数	—	0.01	1
EFFRB	活性碳库的分解速率	d ⁻¹	0.01	1
SRB	微生物中活性碳库的比率	—	0.01	1
m_no3	硝态氮转化为亚硝态氮约束因子	—	0	1
hrb	微生物中稳定有机碳库的分解速率	d ⁻¹	0.01	1
krb	微生物中活性有机碳库的分解速率	d ⁻¹	0.01	1
krcvl	已分解有机碳的分解速率	d ⁻¹	0.01	1

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(O_i - \bar{O}) \times (S_i - \bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中, \bar{O} 和 \bar{S} 分别为实测和模拟过程的平均值, O_i 和 S_i 分别为第*i*个实测值和模拟值, N 为实测序列的长度. 由于NS对极值、异常值以及数据样本大小较为敏感^[25], 因此该研究中NS不作为氨氮模拟的评价指标. 参考ZHANG等^[25]和Ritter等^[26-27]的研究, 将模拟效果评估分为非常好、较好、满意和不满意4个等级(见表4).

表4 流域模型对月流量和氨氮浓度模拟评估等级标准

Table 4 Recommended performance ratings for monthly runoff and NH₃-N concentration simulation for watershed models

模拟等级	流量			氨氮浓度	
	Nbias	R	NS	Nbias	R
非常好	[-0.10, 0.10]	[0.85, 1.00]	[0.75, 1.00]	[-0.25, 0.25]	[0.80, 1.00]
较好	(0.10, 0.15] or [-0.15, -0.10)	[0.80, 0.85]	[0.60, 0.75]	(0.25, 0.40] or [-0.40, 0.25)	[0.75, 0.80]
满意	(0.15, 0.25] or [-0.25, -0.15)	[0.75, 0.80]	[0.50, 0.60]	(0.40, 0.70] or [-0.70, -0.40)	[0.60, 0.75]
不满意	(0.25, +∞) or (-∞, -0.25)	(-∞, 0.75)	(-∞, 0.50)	(0.70, +∞) or (-∞, -0.70)	(-∞, 0.60)

2 结果与讨论

2.1 氨氮浓度模拟与评价

径流与氨氮的率定与验证结果见表5和图2、3. 径流模拟中, 马湾站和纸店站率定和验证期Nbias均

在±0.15以内, 率定期R、NS分别在0.90和0.85以上, 验证期R、NS分别在0.70和0.50以上, 因此HEQM模型的径流模拟效果令人满意. 氨氮浓度模拟中, 马湾站和纸店站率定期和验证期的Nbias均在

± 0.35 以内, R 均在 0.65 以上, 特别是流域出口纸店站的 R 达到 0.85, 因此, 氨氮模拟效果较好. 由于该模型结构更加详细地考虑了闸坝调节和生物地球化学过程等的影响, 水量水质过程的模拟效果更好^[28]. 同时, 该模型月尺度模拟效果明显优于 AnnAGNPS 模型和 HSPF 模型^[29-30].

2012—2015 年, 马湾站和纸店站氨氮浓度均呈减少趋势, 在平水期(3—5 月、10—11 月)和枯水期(12 月—翌年 2 月)大部分月份浓度均大于水功能区划标准(1.0 mg/L), 而丰水期(6—9 月)浓度较低. 因此, 马湾站和纸店站在平水期和枯水期月份均受到污染, 而丰水期水质较好.

表 5 各站点流量和氨氮浓度的率定和验证结果

Table 5 Simulation performance of runoff and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration at different stations

项目		马湾站		纸店站	
		流量	氨氮浓度	流量	氨氮浓度
Nbias	率定期	-0.03	0.14	0.06	0.13
	验证期	-0.12	-0.24	-0.11	-0.31
R	率定期	0.92	0.68	0.93	0.86
	验证期	0.79	0.65	0.73	0.89
NS	率定期	0.85	—	0.85	—
	验证期	0.62	—	0.51	—

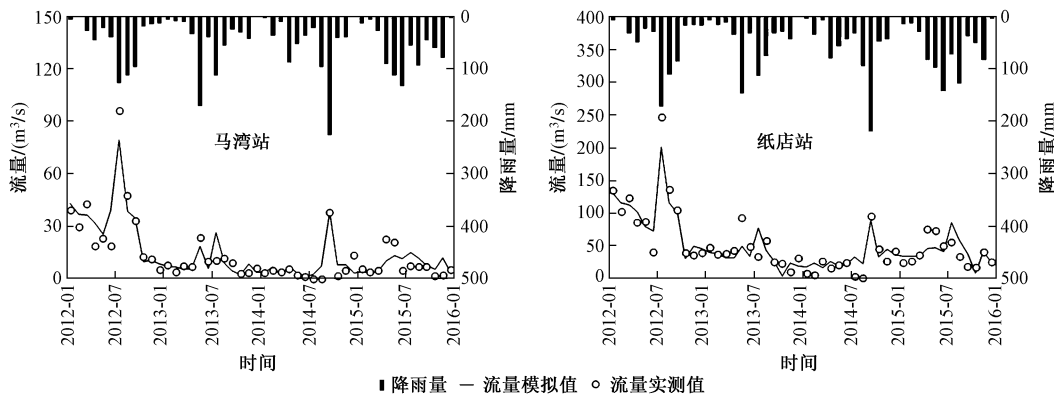


图 2 站点实测和模拟月径流过程

Fig.2 Runoff simulations and observations at different stations

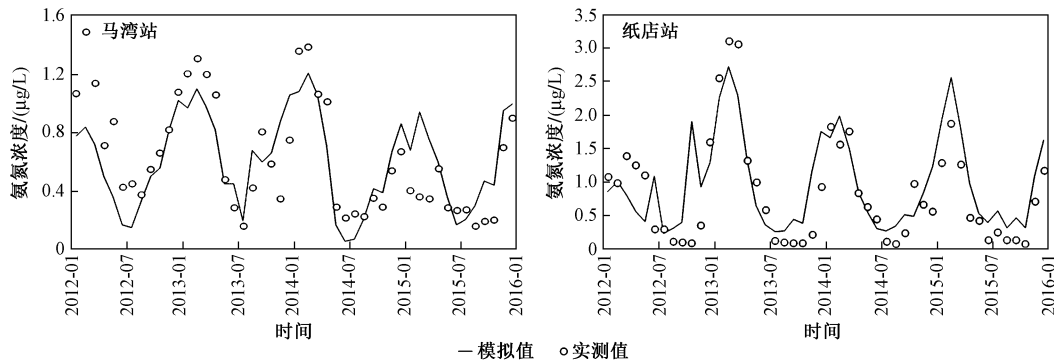


图 3 站点实测和模拟氨氮月浓度过程

Fig.3 Simulations and observations of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration at different stations

2.2 氨氮污染源识别

2012—2015 年沙颍河流域(河南段)的氨氮负荷平均值为 306.05 t/a, 其中在污染和无污染时期的平均负荷分别为 241.85 和 64.20 t/a(见表 6). 贾鲁河流域和颍河中游地区负荷较高, 北汝河流域负荷最低. 2012—2015 年各流域的非点源氨氮负荷平均值为 114.46 t/a, 其中在氨氮污染和无污染时期平均负荷分别为 70.92 和 43.54 t/a, 最大值和最小值分别出现在颍河中游和北汝河流域.

从污染的贡献来看, 沙颍河流域(河南段)非点源氨氮负荷占氨氮总负荷的 37.40%, 在污染和无污染时期非点源负荷占比分别为 29.32% 和 67.81%. 特别是在污染时期, 不同水系非点源负荷的占比为 15.0%~91.49%, 其中贾鲁河贡献最小, 沙河贡献最大. 颍河上游和沙河流域以非点源污染为主, 贾鲁河流域、清颍河流域和颍河中游地区仍以点源污染为主, 这主要与这一地区土地利用分布、点源污染排放量有关. 贾鲁河流域、清颍河流域和颍河中游地区城镇

表6 2012—2015年流域污染、无污染时期多年平均氨氮负荷及贡献

Table 6 Annual average NH₃-N loads and its percentages of total pollutant loads during the polluted, unpolluted and the whole periods from 2012 to 2015 in different tributaries

流域名称	污染时期			无污染时期			多年平均值		
	总负荷/(t/a)	非点源负荷/(t/a)	非点源负荷占比/%	总负荷/(t/a)	非点源负荷/(t/a)	非点源负荷占比/%	总负荷/(t/a)	非点源负荷/(t/a)	非点源负荷占比/%
贾鲁河	603.41	90.56	15.01	65.12	36.41	55.91	668.53	126.97	18.99
清溪河	119.03	40.28	33.84	12.40	3.53	28.47	131.43	43.81	33.34
颍河上游	112.9	102.12	90.45	18.26	17.12	93.76	131.16	119.24	90.91
北汝河	4.31	1.16	26.91	16.59	10.16	61.24	20.9	11.32	54.16
沙河	90.82	83.09	91.49	72.50	62.16	85.74	163.32	145.25	88.94
颍河中游	520.62	108.29	20.80	200.33	131.84	65.81	720.95	240.13	33.31
研究区	241.85	70.92	29.32	64.20	43.54	67.81	306.05	114.46	37.40

面积比例相对较大,且流域内郑州市和周口市污染负荷排放量较大^[21],成为点源污染的主要来源. 颍河上游和沙河流域林地、草地比例相对较大,且污水排放量较少^[21],水污染来源以农业氮肥流失为主. 因此,沙颍河流域(河南段)非点源氨氮污染已成为水污染的重要组成部分,特别是在沙河和颍河上游水系.

2.3 非点源负荷年内变化特征

图4为2012—2015年各子流域非点源氨氮负荷占总负荷比例的年内变化. 从丰水期(6—9月)来看,整个时期和无污染时期各子流域非点源负荷占比较高的地区为沙河上游、北汝河、颍河等,其平均值分别为79.94%和76.23%;在污染时期占比较高的地区为

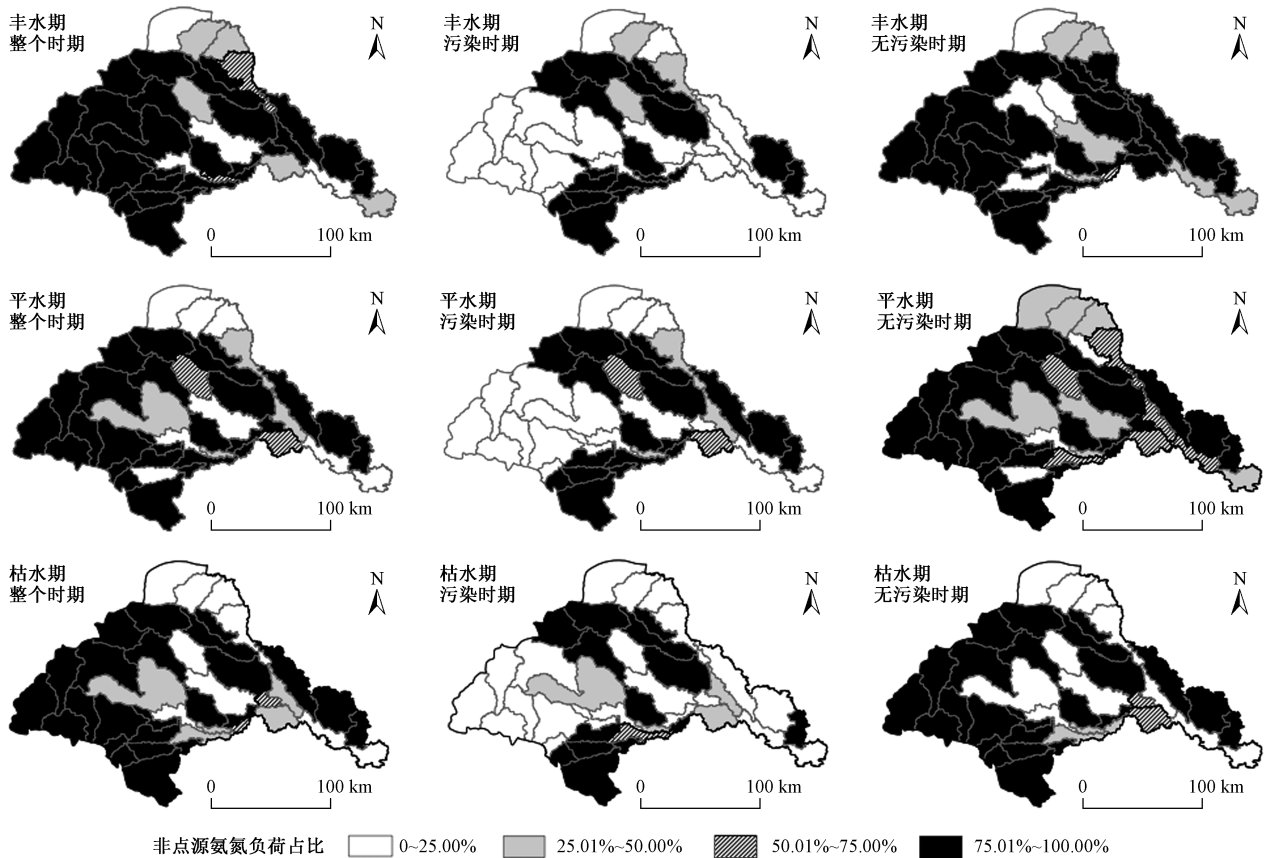


图4 2012—2015年整个时期、污染时期和无污染时期各子流域非点源氨氮负荷占总负荷的比例及其年内丰水期、平水期和枯水期的分布特征

Fig.4 Internal NH₃-N load percentages of total load during the high-flow, mean-flow and low-flow periods at the subbasin scale by considering normal, ammonia pollution and no pollution conditions

沙河上游、颍河等,平均值相比于整个时期和无污染时期略低,为48.83%。从平水期(3—5月、10—11月)和枯水期(12月—翌年2月)来看,各子流域非点源负荷在污染、无污染和整个时期的占比与丰水期比较相似,平水期平均值分别为51.92%、76.07%和75.20%,枯水期分别为41.15%、68.00%和70.15%。因此,丰水期和平水期非点源氨氮负荷占总负荷的比例明显高于枯水期。主要是由于非点源污染的形成和迁移受降雨径流的影响较大,同时冬小麦、夏玉米基肥和追肥等农业活动集中在这一时期,耕地中氮含量急剧增多,加之降雨量大,由农业生产及其他非点源污染来源形成的负荷随着地表径流的冲刷进入河道,导致丰水期非点源负荷显著增加。丰水期(6—9月)和

平水期(3—5月、10—11月)应是非点源污染治理的关键时期。

2.4 非点源负荷年际变化趋势

图5为2012—2015年沙颍河流域(河南段)单位面积非点源氨氮负荷分布特征。流域非点源氨氮污染总体上有所缓解,其中2014—2015年负荷较2012—2013年明显下降。各年份单位面积非点源氨氮负荷的空间分布格局基本相似。2012年研究区单位面积非点源氨氮负荷变化范围为0~8.68 t/km²,平均值为0.77 t/km²;2013年有所下降,平均值为0.38 t/km²;2014年变化范围为0.01~3.06 t/km²,平均值为0.27 t/km²,大部分子流域非点源污染有所减缓;2015年相对2014年有轻微的上升。

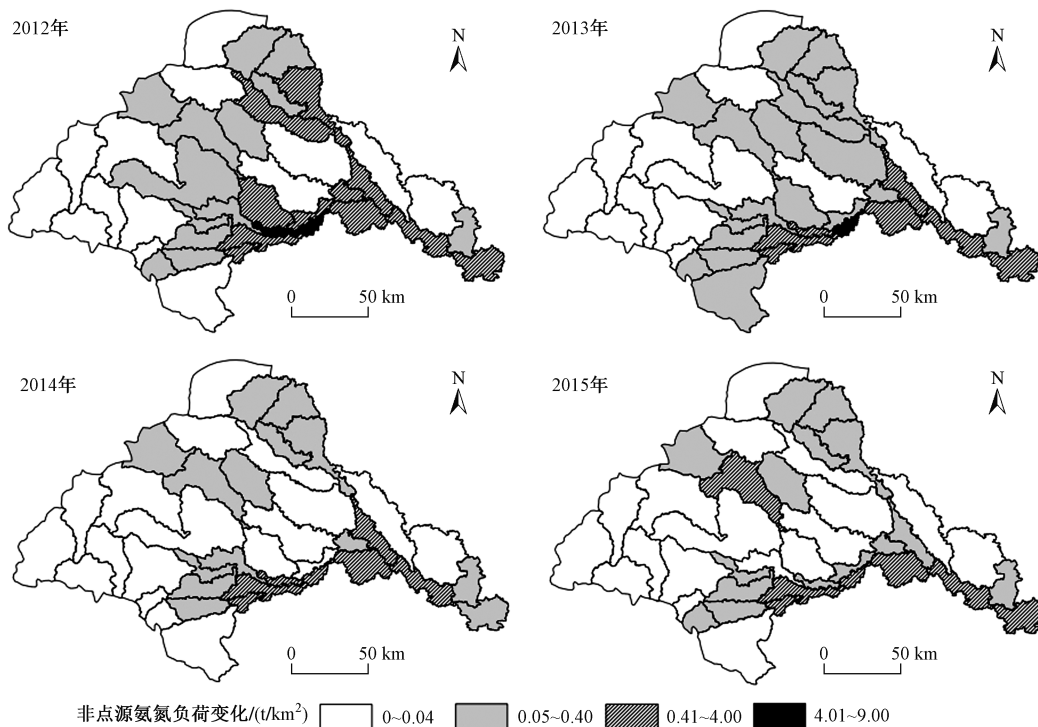


图5 2012—2015年沙颍河流域(河南段)非点源氨氮负荷变化

Fig.5 Annual variations of NH₃-N loads at the subbasin scale from 2012 to 2015

3 结论与建议

a) 从径流模拟来看,各站点的率定期 R 、 NS 分别在0.90和0.85以上,验证期分别在0.70和0.50以上,率定期和验证期 N_{bias} 分别在 ± 0.10 和 ± 0.15 以内;对氨氮模拟而言,率定期和验证期 R 也均在0.65以上, N_{bias} 分别在 ± 0.20 和 ± 0.40 以内。这说明HEQM模型对该流域水量水质模拟效果较好。

b) 非点源氨氮污染负荷占多年平均污染负荷总量的37.40%,特别是在污染时期,非点源污染占比为29.32%。贾鲁河、清漯河、北汝河和颍河中游在污染时期非点源氨氮占比分别为15.01%、33.84%、

26.91%和20.80%;沙河和颍河上游非点源占比比较高,分别为91.49%和90.45%。

c) 从年内变化来看,丰水期和平水期非点源氨氮负荷对污染的贡献明显高于枯水期,其占比分别为48.83%和51.92%。从年际变化来看,2014—2015年相对2012—2013年的单位面积非点源氨氮污染负荷明显下降。

d) 沙颍河流域(河南段)水环境状况呈现改善趋势,但在平水期和枯水期氨氮污染依然严峻,特别是在沙河流域和颍河中游等。为改善研究区氨氮污染的状况,建议在沙河流域和颍河上游流域以控制农

业非点源为主,如重视农业化肥的减施增效技术的推广、农业种植结构调整等;在贾鲁河、清漯河、北汝河和颍河中游等流域仍以氨氮点源削减为主、非点源削减为辅(如零增长)的治污措施。此外,为全面揭示沙颍河流域(河南段)的水污染时间分布特征及其非点源污染的贡献等,今后仍需加强其他水质指标(溶解氧、总氮和总磷等)观测序列的收集和模拟等。

参考文献(References):

- [1] 周亮,徐建刚.大尺度流域水污染防治能力综合评估及动力因子分析:以淮河流域为例[J].地理研究,2013,32(10):1792-1801.
ZHOU Liang, XU Jiangang. Comprehensive evaluation and driving factors analysis of water pollution prevention capability on a large-scale basin: taking Huaihe River Basin as example [J]. Geographical Research, 2013, 32(10): 1792-1801.
- [2] 李九一,李丽娟.中国水资源对区域经济社会发展的支撑能力[J].地理学报,2012,67(3):410-419.
LI Jiuyi, LI Lijuan. Water resources supporting capacity to regional socio-economic development of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 410-419.
- [3] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.
DUAN Chunqing, LIU Changming, CHEN Xiaonan, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 82-90.
- [4] 夏军,程绪水,左其亭,等.淮河流域水环境综合承载力及调控对策[M].北京:科学出版社,2009:12-46.
- [5] 匡舒雅,李天宏,赵志杰.基于L-THIA模型的四川省濛溪河流域非点源污染负荷分析[J].环境科学研究,2018,31(4):688-696.
KUANG Shuyi, LI Tianhong, ZHAO Zhijie. Non-point source pollution loads analysis of Laixi River Watershed, Sichuan based on L-THIA model [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(4): 688-696.
- [6] 王国重,李中原,左其亭,等.丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J].环境科学研究,2017,30(3):415-422.
WANG Guozhong, LI Zhongyuan, ZUO Qiting, et al. Estimation of agricultural non-point source pollutant loss in catchment areas of Danjiangkou Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 415-422.
- [7] RABOTYAGOV S S, VALCU A, KLING C L, et al. Reversing property rights: practice-based approaches for controlling agricultural nonpoint-source water pollution when emissions aggregate nonlinearly [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2014, 96(2): 397-419.
- [8] DOWD B M, PRESS D, HUERTOS M L, et al. Agricultural nonpoint source water pollution policy: the case of California's central coast [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 128(3): 151-161.
- [9] ONGLEY E, ZHANG X L, YU T, et al. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [10] ZHANG Y Y, GAO Y, YU Q, et al. Diffuse nitrogen loss simulation and impact assessment of stereoscopic agriculture pattern by integrated water system model and consideration of multiple existence forms [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 660-673.
- [11] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [12] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large-area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [13] YANG X Y, LIU Q, FU G T, et al. Spatiotemporal patterns and source attribution of nitrogen load in a river basin with complex pollution sources [J]. Water Research, 2016, 94: 187-199.
- [14] 张恒,曾凡棠,房怀阳,等.基于HSPF及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算[J].环境科学学报,2012,32(4):856-864.
ZHANG Heng, ZENG Fantang, FANG Huaiyang, et al. Estimating nonpoint pollution loading from the Danshui catchment based on HSPF and regression model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 856-864.
- [15] LI C, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. model structure and sensitivity [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(S9): 9777-9783.
- [16] DENG J, ZHU B, ZHOU Z, et al. Modeling nitrogen loadings from agricultural soils in southwest China with modified DNDC [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015, 116(S2): 1602-1602.
- [17] ZHANG Y Y, SHAO Q X, YE A Z, et al. Integrated water system simulation by considering hydrological and biogeochemical processes: model development, with parameter sensitivity and autocalibration [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1): 529-553.
- [18] ZHANG Y Y, ZHOU Y J, SHAO Q X, et al. Diffuse nutrient losses and the impact factors determining their regional differences in four catchments from north to south China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 577-594.
- [19] 李云生,王东,张晶.淮河流域“十一五”水污染防治规划研究报告[R].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [20] 环境保护部.重点流域水污染防治规划(2011—2015年)[R].北京:环境保护部,2010.
- [21] 杨琴,汤秋鸿,张永勇.淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的相关性分析[J].环境科学研究,2019,32(9):1519-1530.
YANG Qin, TANG QiuHong, ZHANG Yongyong. Spatiotemporal changes of water quality in Huai River Basin (Henan Section) and its correlation with land use patterns [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(9): 1519-1530.
- [22] 夏军,王纲胜,谈戈,等.水文非线性系统与分布式时变增益模

- 型[J].中国科学:地球科学,2004,34(11):1062-1071.
- XIA Jun, WANG Gangsheng, TAN Ge, *et al.* Hydrological nonlinear system and distributed time-varying gain model[J]. Science China: Earth Sciences, 2004, 34(11):1062-1071.
- [23] VAN-GRIENSVEN A, MEIXNER T, GRUNWALD S, *et al.* A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324:10-23.
- [24] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4):1015-1031.
- [25] ZHANG Y Y, SHAO Q X, TAYLOR J A. A balanced calibration of water quantity and quality by multi-objective optimization for integrated water system model[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538:802-816.
- [26] RITTER A, MUÑOZ-CARPENA R. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments[J]. Journal of Hydrology, 2013, 480:33-45.
- [27] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [28] SHI P, CHEN C, SRINIVASAN R, *et al.* Evaluating the SWAT model for hydrological modeling in the Xi'an watershed and a comparison with the XAJ model[J]. Water Resource Management, 2011, 25:2595-2612.
- [29] 邢可霞, 郭怀成, 孙延枫, 等. 流域非点源污染模拟研究: 以滇池流域为例[J]. 地理研究, 2005(4):549-558.
- XING Kexia, GUO Huaicheng, SUN Yanfeng *et al.* Simulation of nonpoint source pollution in watershed scale: the case of application in Dianchi Lake Basin[J]. Geographical Research, 2005(4):549-558.
- [30] 邹桂红, 崔建勇, 刘占良, 等. 大沽河典型小流域非点源污染模拟[J]. 资源科学, 2008(2):288-295.
- ZOU Guihong, CUI Jianyong, LIU Zhanliang, *et al.* Simulating non-point pollution at watershed scale: a case study in Dagu Watershed[J]. Resources Science, 2008(2):288-295.

(责任编辑:张 蕊)