

基于 ArcSWAT 模型的老鹳河流域面源氮识别和分析

赵永强^{1,2}, 李为超¹, 蒲欢欢¹, 周庆生¹

(1. 郑州师范学院地理与旅游学院, 河南 郑州 450044;

2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 进行流域面源氮污染负荷估算和关键源、区识别, 推进流域面源污染的溯源和控制, 可为流域非点源氮污染控制和治理提供理论支撑。本文以老鹳河流域为研究区域, 通过模型数据库构建、流域空间单元划分以及参数率定和验证建立老鹳河流域氮污染过程的 ArcSWAT 模型; 以 2017 年的气象资料为背景, 设置 4 种情景模式, 模拟估算流域不同面源氮的入河量, 分析和识别不同污染源的关键期以及不同土地利用类型的关键污染源。结果表明, 化学氮肥施用和大气沉降是老鹳河流域面源氮的主要污染源, 分别贡献了 47.6% 和 38.6%; 大气沉降、畜禽养殖和化学氮肥施用入河氮量最大值均出现在 3 月, 农村生活入河氮量最大值出现在 8 月, 而 4 类污染源入河氮量的最小值均出现在 12 月; 雨季是老鹳河流域控制面源污染氮的关键期; 减控的关键污染源旱地、园地和水田是化学氮肥施用, 林地和人居地分别是大气沉降和农村生活。应分时、分区、分类制定老鹳河流域面源氮污染减控方案, 对于人为氮源(化学氮肥施用、畜禽养殖和农村生活)还要关注在作物播种期和生长季节进行减控。

关键词: 面源氮污染; 关键源识别; SWAT 模型; 老鹳河流域

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)06-0001-06

由人类活动引起的自然界中氮素过剩问题日益严重, 大量的活性氮通过各种途径进入大气和水体, 引发了一系列环境问题, 包括土壤酸化、大气污染、温室效应、水体硝酸盐污染和富营养化等(Yue et al, 2020; Zhao et al, 2018a)。流域可以完整体现出物质输移的全过程, 因此从流域尺度上认识养分输入支出和生物地球化学过程与机制, 是科学地理解一个地区氮素平衡状况, 对区域养分进行科学管理的关键, 有助于制定针对性措施, 对流域氮素的流失进行控制管理, 从而减少其对生态环境的影响(Zhao et al, 2018a)。

随着对点源氮污染控制能力的提高, 面源氮污染已成为我国水环境污染的主要影响因素, 尤其是农业面源氮污染问题日益加重(Sun et al, 2012; Yue et al, 2020)。流域是面源氮污染机理和控制对策研究的关注点, 是污染物的主要接纳体, 但由于面源氮污染的随机性、排放及污染途径的不确定性, 污染负荷时空差异性大的特征, 使得对面源氮的治理不可能像点源污染那样进行集中处理(宋大

平等, 2018)。在实际控制管理中, 需要将有限的资源投入到那些对水体危害可能性最大而范围相对较小的区域和污染源上进行重点治理, 以提高面源污染的控制效率(李振炜等, 2011)。因此, 实现流域面源氮污染的定量溯源和总量控制是流域水环境治理的重要基础工作和从源治污的根本, 具有重要的理论和现实意义。对流域面源氮污染进行定量源解析最基本的方法就是监测所有降水过程的径流水质, 但受客观条件限制, 显然是不可能的。因此在当前的研究工作中, 应用数学模型来模拟和估算面源污染负荷是必不可少的重要手段。SWAT 模型是基于过程的长期分布式物理模型, 经过开发者多年的研究改进, 已经是国际先进成熟的流域模型, 在国际上被广泛地应用于流域水文过程和面源污染过程的定量研究中(王磊等, 2020; Himanshu et al, 2017; Wang et al, 2019)。

丹江口水库是国家级水源地, 也是南水北调中线工程水源地, 库区水质安全关系着整个流域及供水地区人民的生活质量。老鹳河是丹江口水库河南境内最大的一条汇入支流, 是南水北调中线工程上游重要水源涵养区、淹没区和渠首所在地。由于老鹳河入库口与陶岔取水口相距较近, 入库河水难以与丹江口水库水体充分交换和自净, 对中线工程陶岔引水水质安全存在一定威胁(陈晓飞等, 2012), 在《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划》(国家发改委, 2018)中, 被明确确定为重点

收稿日期: 2020-06-03

基金项目: 土壤和农业可持续发展国家重点实验室开放基金(Y20160036); 河南省产学研合作计划(132107000045); 河南省 2019 年度留学人员科研择优项目(豫人社办函[2019]82 号)。

作者简介: 赵永强, 1979 年生, 男, 副教授, 博士, 主要从事流域污染防治与生态修复工作。E-mail: zyongqiang@126.com

治理河流之一。本研究以老鹳河流域为研究对象,通过构建 ArcSWAT 模型,进行流域面源氮污染负荷估算和关键源、区识别,推进流域面源污染的溯源和控制,为流域非点源氮污染控制和治理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

老鹳河位于河南省的西南部,东经 $111^{\circ}01' \sim 111^{\circ}46'$ 、北纬 $33^{\circ}05' \sim 33^{\circ}48'$ 。老鹳河干流发源于洛阳市栾川县,经三门峡市卢氏县和南阳市西峡县,至南阳市淅川县老城东注入丹江口水库,全长 255 km,总面积 $4\,219\text{ km}^2$ (占河南省总面积的 2.5%),其中有 $3\,266\text{ km}^2$ 流域位于南阳市。老鹳河是典型的山区河流,自然落差为 1 340 m,河流的前 116 km 流经山区的陡岸,森林覆盖率达 90%。流域的年均温为 16°C ,年降雨量为 831 mm,年平均径流量为 $6.6 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

老鹳河流域的农业和水产养殖业高度发达。2017 年流域内常住人口数量为 191.3 万人,约占河南省总人口数量的 1.8%;2017 年老鹳河流域国内生产总值(GDP)为 741.94 亿元,约占河南省当年 GDP 的 1.7%(河南省统计局, 2018)。近些年来,由于流域内经济的发展,农业活动和牲畜养殖业中大量人为活性氮排放,进一步加剧了对老鹳河流域水质的影响(Zhao et al, 2018a)。

1.2 ArcSWAT 数据库构建

本研究采用 ArcSWAT2012 与 ArcGIS 10.2.2 匹配。老鹳河流域数字高程模型(DEM)来源于国际科学数据服务平台,比例尺为 1:5 万,分辨率 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$;土壤图来自第二次全国土地调查资料(中科院南京土壤研究所提供),比例尺为 1:100 万,采用 grid 栅格格式,投影为 WGS84;土地利用数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供,运用 ArcGIS 软件矢量化得到,比例尺为 1:10 万。所有图件统一采用 Transverse Mercator 投影校正。

老鹳河流域的气象数据从中国大气同化驱动数据集(CMADS)获取,包括 2017 年 1-12 月逐月的日均最高和最低温度、日夜降水量、日均相对湿度、日均风速和太阳辐射值。采用世界土壤数据库(HWSD),参照 FAO-90 土壤分类系统构建土壤信息数据库。大气沉降和水质数据为流域监测数据。涉及到的人口、种植面积、畜禽养殖和施肥量等数据来自河南省、洛阳市、三门峡市和南阳市的统计数据。研究区域的人口、各污染源的污染物排放量、各种类型农业用地施肥量等相关资料数据来自实地调研、相关统计资料和发表的公开文献。

在河网生成的基础上,设置流域的出口,利用 Delineate Watershed 功能划分子流域,子流域划分阈值设置为 $7\,951.7\text{ km}^2$ (约为流域面积的 2%)。将老鹳河流域划分为 23 个子流域,见图 1。

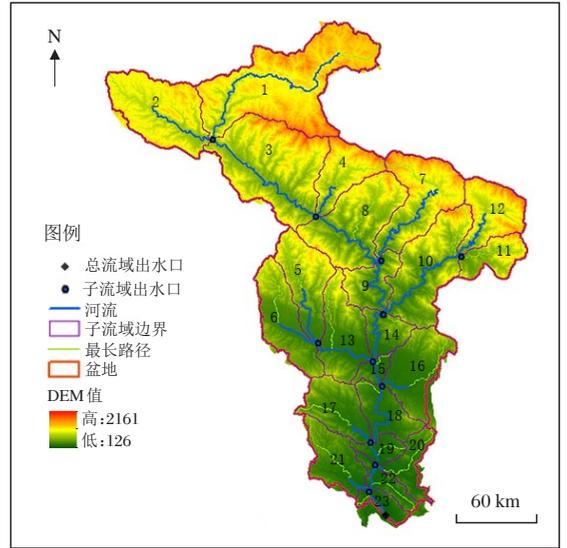


图 1 老鹳河流域各子流域示意

Fig.1 Sub-catchment distribution within the Laoguanhe River watershed

1.3 参数的率定和验证

采用决定系数 R^2 、相对误差 R_e 以及 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{ns} 这 3 个约束指标对 SWAT 模型的模拟效果进行评价,计算方法见公式①~③。 R^2 和 E_{ns} 与 1 愈接近, R_e 与 0 愈接近,说明选取的参数值使得模拟与实际结果的吻合度愈接近。在率定参数时,依次验证径流模拟、泥沙模拟和入河总氮量的参数。当相对误差 $R_e < 30\%$ 、 $E_{ns} > 0.6$ 、 $R^2 > 0.6$ 时,模型的模拟精度高(万浩等, 2018)。本研究采用老鹳河流域 2017 和 2018 年实测的数据进行率定和验证,主要参数如表 1,模拟效果如图 2 和表 2。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_n - Q_q)(Q_m - Q_p)}{\sum_{i=1}^n (Q_n - Q_q)^2 \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{Q_m - Q_n}{Q_n} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_n - Q_q)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2} \quad (3)$$

式中: Q_n 为观测值, Q_m 为模拟值, Q_q 为所有观测值的平均值, Q_p 为所有模拟值的平均值, n 为观测次数。

表 1 模型参数最终取值

Tab. 1 Model parameter values

参数	定义	取值范围	实际取值
CN2	径流曲线系数	30~95	32
SOL_AWC	土壤水含量/mm·mm ⁻¹	0~1	0.2
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1	0.7
GWQMN	基流产生阈值/mm	0~5000	10
GW_DELAY	地下水延迟系数	0~500	8
GW_REVAP	潜水蒸发系数	0.02~0.2	0.15
ALPNA_BF	基流 a 系数	0~1	0.1
REVAPMN	潜水再蒸发系数	0~500	0.5
AMP	泥沙演算洪峰速率调整因子	0.5~2	0.6
SPCON	泥沙输送线性系数	0.0001~0.01	0.0006
ch_n	河道曼宁值	-0.01~0.31	0.08
USLEP_P	USLE 水保持措施因子	0.1~1	0.5
RS4	20°C 时河流有机氮沉积速率系数	0.001~0.1	0.08
NPERCO	氮下渗系数	0~1	0.5
SPEXP	泥沙输送指数系数	1~1.5	1.2

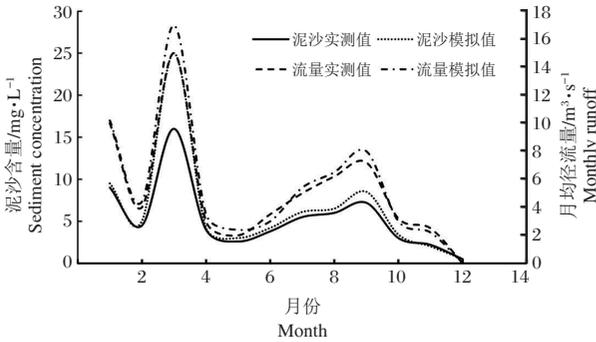


图 2 模拟结果与实测值对比

Fig. 2 Simulated and measured values for sediment concentration and monthly runoff

表 2 径流、含沙量和全氮负荷的率定和验证结果

Tab. 2 Calibration and validation results of the monthly runoff, sediment and total nitrogen in the watershed

评价指标	径流			含沙量			全氮		
	R ²	R _c /%	E _{ns}	R ²	R _c /%	E _{ns}	R ²	R _c /%	E _{ns}
率定(2017年)	0.89	0.22	0.85	0.77	0.25	0.76	0.86	0.17	0.73
验证(2018年)	0.87	0.28	0.81	0.74	0.29	0.72	0.82	0.21	0.69

1.4 污染源识别情景设置

污染氮通过不同途径输入流域, 输入流域的氮会通过截留、硝化反硝化等损失之后进入流水体, 进入水体的氮量为污染氮的入河量。以 2017 年的气象资料为背景, 设置 4 种情景模式(表 3), 运用 SWAT 模型对 4 种情景下老鹤河流域的面源氮入河情况进行模拟。

依据表 3, 不同非点源氮入河量计算公式如下:

$$TN_a = TN_{i1} \tag{4}$$

$$TN_b = TN_{i2} - TN_{i1} \tag{5}$$

$$TN_c = TN_{i3} - TN_{i2} \tag{6}$$

$$TN_d = TN_{i3} - TN_{i2} \tag{7}$$

式中: TN_a、TN_b、TN_c 和 TN_d 分别为大气沉降、农村生活、畜禽养殖和化学氮肥施用带来的全氮入河量, TN_{i1}、TN_{i2}、TN_{i3} 和 TN_{i4} 分别为 4 种情景下模拟得出的全氮入河量。

表 3 老鹤河流域污染源情景模拟

Tab. 3 Four scenarios of non-point source pollution in the Laoguanhe River watershed

情景设置	模拟氮源
情景 1	大气沉降
情景 2	大气沉降和农村生活
情景 3	大气沉降、农村生活和畜禽养殖
情景 4	大气沉降、农村生活、畜禽养殖和化学氮肥施用

2 结果与分析

2.1 不同污染源年氮入河量

以年作为步长, 老鹤河流域 4 类污染源氮入河量及贡献率见图 3。化学氮肥施用氮入河量为 3 032.2 t/a, 占氮总入河量的 47.6%; 大气沉降氮入河量为 2 455.4 t/a, 占比为 38.6%; 农村生活氮入河量为 455.3 t/a, 占 7.2%; 畜禽养殖氮入河量为 423.7 t/a, 占 6.6%。农村生活和畜禽养殖对流域面源氮污染的贡献率均较低, 而大气沉降和化学氮肥施用对老鹤河流域非点源氮污染的贡献率均较高。

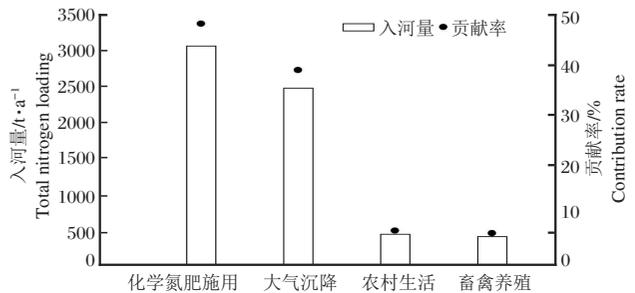


图 3 污染源氮入河量及贡献率

Fig. 3 Contribution of different nitrogen sources to total nitrogen loading

2.2 不同污染源月氮入河量

以月作为步长, 对不同情景模式下的氮入河量进行模拟并计算 4 类污染源氮的月入河量(图 4)。老鹤河流域不同污染源氮入河量有着明显的季节性, 总体表现出春季最高、夏季、秋季次之, 冬季最低的变化趋势。大气沉降、农村生活、畜禽养殖和化学氮肥施用的 TN 入河量春季分别占到全年入河量的 55.4%、37.6%、40.2% 和 51.8%。大气沉降、农村生活、畜禽养殖和化学氮肥施用的 TN 入河量均值分别为 200.5、40.2、38.0 和 248.8 t/月, 大气沉降、畜禽养殖和

化学氮肥施用的最大值均出现在 3 月,分别为 520.4、61.4 和 593.8,农村生活的最大值出现在 8 月(73.9);4 类污染源氮入河量的最小值均出现在 12 月,分别为 5.7、0.5、1.4 和 0.0。这与流域的耕方式和气候条件有关。

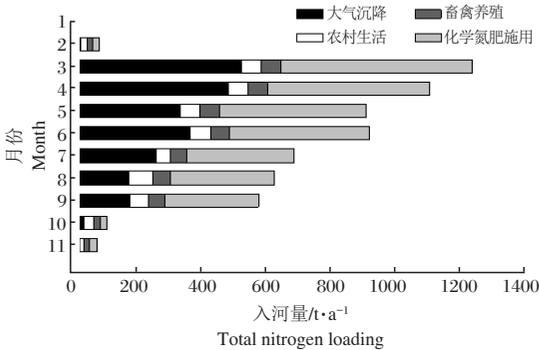


图 4 不同污染源月均 TN 入河量

Fig. 4 Monthly total nitrogen contributed by different nitrogen sources

2.3 不同用地类型污染源年氮入河量

根据表 3 的情景设置,以年作为步长对不同用地类型的污染氮入河量进行模拟,不同用地类型不同污染源氮的入河量及贡献率见图 5、图 6。

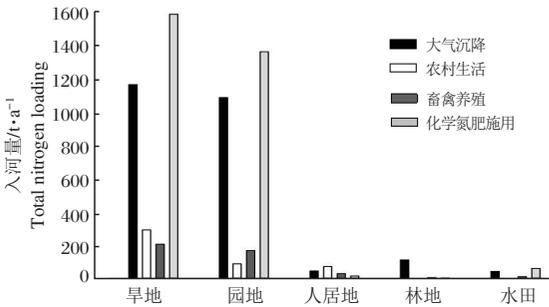


图 5 不同土地利用类型各污染源氮入河量

Fig. 5 Total nitrogen from different pollution sources by land use type

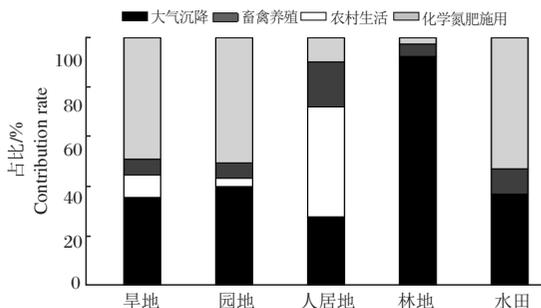


图 6 不同土地利用类型各污染源氮入河贡献率

Fig. 6 Contribution rate of different nitrogen sources by land use type

旱地中,化学氮肥施用的贡献最大,占旱地氮素入河总量的 48.8%(约为 1 587.8 t/a);其次为大气沉降(占比 35.8%,约为 1 165.4 t/a)、农村生活(占比 9.0%,约为 293.0 t/a),畜禽养殖最低(占 6.4%,约为 207.0 t/a)。园地的最大贡献源同样来自化学氮肥施用(占比 50.3%,约为 1 362.8 t/a),其次为大气沉降(占比 40.2%,约为 1 087.6 t/a)、畜禽养殖(占比 6.2%,约为 168.7 t/a)和农村生活(占比 3.3%,约为 89.2 t/a)。人居地的污染源以农村生活排污(占比 44.2%,约为 73.0 t/a)和大气沉降(占比 28.0%,约为 46.3 t/a)为主,畜禽养殖(30.0 t/a)和化学氮肥施用(16.0 t/a)分别占 18.1%和 9.7%。

大气沉降为林地最大的贡献源,其引起的全氮入河量为 112.6 t/a,占林地全氮入河总量的 92.5%,其他 3 者仅占 7.5%。水田的主要污染来源是化学氮肥使用(占比 52.7%,约为 61.7 t/a)和大气沉降(占比 37.1%,约为 43.5 t/a),畜禽养殖和农村生活仅占 10.2%。

3 讨论

3.1 不同污染源氮入河量

在流域污染相关问题的研究中,污染物入河量估算是一项必要的基础性工作,不仅可以识别研究区域水体污染的主要来源,还可以明确排放源的主要类型和污染特征(宋梓涵等,2020)。本研究中,化学氮肥施用和大气沉降对流域水体氮负荷的贡献分别达到 47.6%和 38.6%。有研究表明,在氮沉降量较低的区域,绝大部分沉降氮几乎都被土壤储存,相当于施肥作用;而在大气氮沉降量 10~25 kg/(hm²·a)的区域,大量的沉降氮会随径流失(邓欧平等,2013;冯明磊,2010)。这一点在长乐江流域已得到证实,长乐江流域大气沉降导致的氮入河量占到 32%(邓欧平等,2013),与我们的研究结果具有可比性。Zhao 等(2018b)报道,老鹤河流域大气氮沉降通量约 2 480 kg/(km²·a),是全国平均值的 2 倍,这可能是本研究中大气氮沉降入河贡献量较高的原因。因此,氮沉降量较高的流域农田管理中,应考虑如何利用大气沉降氮并适当减少农田化学氮肥施用量。

入河氮量与输入流域氮量的比值称为氮入河系数。估算入河系数可为评估不同污染源氮对流域水质的影响以及制定面源污染氮防控措施提供理论依据。Zhao 等(2018a)报道,大气沉降、农村生活、畜禽养殖和化学氮肥施用输入老鹤河流域的氮量分别为 10 463.1、4 081.9、31 502.7 和 113 078.4 t/a,

基于此, 估算的老鹤河流域大气沉降、农村生活污水排放、化学氮肥施用和畜禽养殖的入河系数分别为 23.5%、11.2%、2.7% 和 1.4%。有研究报道, 流域大气沉降的入河系数在 10%~30% (邓欧平等, 2013; Xie et al, 2008), 老鹤河流域只有大气沉降的入河系数在此范围且高于流域内其他污染源。农村生活污染是非点源氮污染的重要来源之一, 这与农村分布较为分散、生活污水收集和处理率仍然较低、大部分生活垃圾处于堆弃状态有关。如太湖地区农村生活污水 TN 入河系数为 8.1%~33.4% (邓欧平等, 2013), 长乐江流域达到 12.2%。老鹤河流域的农村生活污染入河系数为 11.2%, 表明流域农村生活污水管理和垃圾处置工作应引起足够的重视, 基础设施建设和治理投入还需进一步加大。

3.2 不同污染源的关键期识别

老鹤河流域不同污染源氮入河量总体表现出春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季的变化趋势, 与丹江口库区胡家山小流域地表径流氮浓度变化趋势 (涂安国等, 2010) 较为一致。研究区降水主要集中在夏季, 6-8 月份降水量占全年的 42.6%; 其次是春季, 3-5 月降水量占全年的 30.6%; 秋季和冬季降雨量相对较少, 尤其是冬季, 12 月份降雨量几乎为 0。施肥期主要集中在春秋季节, 但秋冬期间降雨相对较少, 连续产流较弱, 氮素贮存量高, 随着春季降雨量增多, 大量积累的氮素被溶解、淋洗和冲刷, 径流的增加导致春季的全氮入河量最高, 冬季最低; 而夏季虽然降雨量最多, 但由于春季降雨的淋洗和冲刷, 导致夏季全氮入河量低于春季。可见, 雨季 (3-8 月) 是老鹤河流域控制面源污染氮的关键期, 对于人为源 (化学氮肥施用、畜禽养殖和农村生活), 还要关注在作物播种期和生长季节进行减控。

3.3 不同用地类型的污染源识别

旱地、园地和水田的最主要的氮污染源是化学氮肥施用, 而林地和人居地分别是大气沉降和农村生活。由此可以看出, 面源污染氮的减控需要结合具体的土地利用类型进行分区分析。在人口密集的地方主要是控制居民生活排污, 需要从改善人居环境、加大基础设施投入以及加强居民环境卫生和保护生态环境意识的教育方面入手; 而在以农业用地为主的地区不仅要通过优化施肥时机和方式提高氮肥的使用效率, 同时还应该采用生物或工程措施通过截流、过滤或调控氮素的迁移转化过程等来达到减控流域氮素入河量。

参考文献

- 陈晓飞, 姜世英, 韩鹏, 2012. 基于 AHP 的老灌河流域环境风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 10(3): 87-92.
- 邓欧平, 孙嗣昉, 吕军, 2013. 基于 ArcSWAT 模型의 长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J]. 环境科学, 34(4): 1284-1290.
- 冯明磊, 2010. 三峡地区小流域氮循环及其对水体氮含量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 国家发改委, 2018. 丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201801/t20180105_962244.html.
- 河南省统计局, 2018. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 李振炜, 于兴修, 姚孝友, 等, 2011. 农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J]. 生态学杂志, 30(12): 2907-2914.
- 宋大平, 左强, 刘本生, 等, 2018. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究——以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 37(6): 1219-1231.
- 涂安国, 尹炜, 陈德强, 等, 2010. 丹江口库区典型小流域地表径流氮素动态变化[J]. 长江流域资源与环境, 19(8): 926-932.
- 万浩, 董晓华, 彭涛, 等, 2018. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的 黄柏河东支流域径流模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 12: 94-100.
- 王磊, 杜欢, 谢建治, 2020. 基于 SWAT 模型的 张家口清水河流域径流模拟[J]. 水生态学杂志, 41(4): 34-40.
- Himanshu S K, Pandey A, Shrestha P, 2017. Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance[J]. Environmental Earth Sciences, 76(1): 1-18.
- Sun B, Zhang L X, Yang L Z, et al, 2012. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures [J]. Ambio, 41(4): 370-379.
- Wang Y P, Jiang R G, Xie J C, et al, 2019. Soil and water assessment tool (SWAT) model: a systemic review[J]. Journal of Coastal Research, 93(1): 22-30.
- Xie Y X, Xiong Z Q, Xing G X, et al, 2008. Source of nitrogen in wet deposition to a rice agroecosystem at Tai lake region [J]. Atmospheric Environment, 42(21): 5182-5192.
- Yue D, Xu L, Yang Z, et al, 2020. Aggravation of reactive nitrogen flow driven by human production and consumption in Guangzhou City China[J]. Nat Commun, 11: 1209.
- Zhao Y, Wu Y, Jiang L, 2018a. Nitrogen budget and its environmental loading in an urban ecosystem with the rapid urbanisation of China[J]. Chemistry and Ecology, 34(8): 697-712.
- Zhao Y, Jiang L, Wu Y, 2018b. Nitrogen budget and surface water nitrogen load in a Chinese watershed[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 27(3): 1387-1394.

Identification and Analysis of Non-point Source Nitrogen in the Laoguan River Watershed Using ArcSWAT Modeling

ZHAO Yong-qiang^{1,2}, LI Wei-chao¹, PU Huan-huan¹, ZHOU Qing-sheng¹

(1. School of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, P.R.China;

2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Laoguanhe River, located in southwest Henan Province, is an important water source for the middle route of the South–North Water Diversion Project. In recent years, rapid development of agriculture, aquaculture and livestock breeding in the Laoguan River basin has resulted in large quantities of active nitrogen (N) being discharged into Laoguanhe River. Agricultural non–point source nitrogen pollution (NNPS) has become one of the primary factors affecting water quality in the Laoguanhe River watershed (LRW) and it poses a threat to water quality in the middle route of the South–to–North Water Diversion Project. In this study, an ArcSWAT model was constructed to estimate the NNPS load and identify primary sources and critical periods of NNPS for different land use types in the Laoguanhe River basin. The objective was to provide a theoretical basis for tracing, preventing and controlling NNPS in the watershed. Development of the ArcSWAT model for N pollution in the Laoguanhe River watershed included database construction, watershed spatial unit division, parameter calibration and verification. Based on meteorological data for 2017, four scenarios were set, and the inflow of N from different non–point sources was simulated and estimated. Critical periods for different pollution sources and the primary pollution sources for each land use type were then identified. Results show that chemical nitrogen fertilizer application, atmospheric nitrogen deposition, rural life discharge, and livestock and poultry operations were the four primary NNPS sources in the Laoguanhe River basin and accounted, respectively, for 47.6%, 38.6%, 7.2% and 6.6% of the total nitrogen load. Nitrogen loading from different pollution sources varied significantly by season: highest in spring, followed by summer, autumn and winter. Maximum loading from atmospheric nitrogen, livestock and poultry operations, and application of chemical nitrogen fertilizer all occurred in March, and the maximum N load by rural life discharge occurred in August. Minimum loading of these four N sources all occurred in December. The rainy season was the critical period for controlling NNPS in the Laoguanhe River basin. Chemical nitrogen fertilizer was the primary pollution source for dry land, garden land and paddy fields, while atmosphere nitrogen deposition and rural life discharge were the key pollution sources for forested and residential areas. To effectively control NNPS in Laoguan River, particular attention should be paid to the timing of crop sowing and the primary N pollution sources from different land use types. Based on the characteristics of N pollution in the watershed, we recommend that fertilization should be controlled in flood season, and technical measures should be adopted to improve the utilization rate of chemical nitrogen fertilizer. We also recommend constructing terraces, water retention ponds and vegetative buffers to improve nitrogen retention capacity in the watershed.

Key words: non–point source nitrogen pollution; key pollution source identification; SWAT modelling; Laoguanhe River basin