

有限资料条件下基于 SWAT 模型的泗合水流域 非点源污染模拟

冯麒宇^{1,2}, 胡海英¹, 刘俊达¹

(1 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 2 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410000)

摘 要:基于 8 场降雨事件的水量、污染物同步监测资料,根据平均浓度法计算流域出口断面各污染物负荷,并用于模型参数率定及验证,分析了流域泥沙、总氮、总磷流失的时空分布特征。结果表明:该模型在南方湿润地区适用性较高。流域内全年非点源污染负荷分布不均,绝大部分集中在汛期的 4—9 月;流域总氮、总磷污染负荷空间分布较相似,流域上游东北部区域村落富集以及耕地比例较大,污染负荷较大,流域下游受人类活动的影响产污量较大;因土地利用类型不同,单位面积污染物负荷输出差异显著,各类土地利用类型中泥沙、有机氮、有机磷、无机磷污染物流失强度由小到大依次为林地、建设用地、草地、耕地;耕地是非点源污染流失的主要源区,实行退耕还林措施,流域泥沙、TN 和 TP 负荷依次减少 35.8%,46.1%和 35.8%;减少氮肥和磷肥施用量 50%,TN 和 TP 负荷分别减少 18.1%和 8.9%。因此,降低施肥量和实行退耕还林措施是控制泗合水流域非点源污染的关键,本研究可为流域生态环境治理提供一定理论依据。

关键词:SWAT 模型;有限资料流域;平均浓度法;非点源污染;时空特征

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0128-06

Simulation of Non-Point Pollution in Siheshui Basin by Use of SWAT Model and Limited Data

FENG Qiyu^{1,2}, HU Haiying¹, LIU Junda¹

(1.School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2.Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract:Based on the monitoring data of water quantity and pollutants in 8 rainfall events, the non-point source pollution load at the outlet section of the basin was estimated according to the average concentration method, and was used to calibrate and verify the model parameters. The variation process of sediment, total nitrogen and total phosphorus in different underlying surface conditions was modeling and the temporal and spatial distribution characteristics were analyzed. It could be seen that SWAT model was feasible in the southern humid area. The results indicate that the distribution of pollution load was uneven, most of pollution loads concentrated in the flood season covering the period from April to September. The spatial distributions of pollution loads of total nitrogen and total phosphorus in the basin were similar, the pollution load was large in the northeast area of the upper reaches of the basin where the villages clustered and the proportion of cultivated land was large. Moreover, the output of pollutants in the lower reaches of the basin is large because of the influence of the human activities. The differences of pollution load transports per unit area of different land use types were significant and the loss intensities of sediment, organic phosphorus and organic nitrogen transport of each land type increased in the order: forest land<construction land<grassland<farmland. Farmland was the key source area of non-point source pollution loss. If the measures of returning farmland to forests were implemented, the pollution loads of sediment, TN and TP would reduce by 35.8%,

收稿日期:2020-08-18

修回日期:2020-10-08

资助项目:国家自然科学基金(51209096);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018MS62)

第一作者:冯麒宇(1991—),男,重庆市云阳县人,硕士,研究方向为水文水资源。E-mail:394963409@qq.com

通信作者:胡海英(1983—),女,湖南省临武县人,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为水文学及水资源。E-mail:cthyhu@scut.edu.cn

46.1% and 35.8%, respectively. Moreover, nitrogen and phosphorus fertilizer applications reduced by 50%, which decreased TN and TP loads by 18.1% and 8.9%, respectively. Therefore, reducing the amount of fertilizer and implementing the measures of returning farmland to forest are the keys to control the non-point source pollution in Siheshui Basin. This study can provide the theoretical basis for watershed ecological environment management.

Keywords: SWAT model; watershed within limited data; mean concentration method; non-point source pollution; temporal and spatial distribution characteristics

随着社会经济的迅速发展,水资源、水环境问题日益突出。非点源污染具有随机性、广泛性、潜伏性和滞后性等特点,是影响水体质量的重要污染源。目前国内外学者对非点源污染的研究大都采用机理模型法^[1]。国外应用广泛的非点源污染机理模型有 SWAT^[2-5]、HSPF^[6-9]和 Ann AGNPS 等^[10-12]。但是目前我国许多流域都缺乏常规水质观测资料,这使模型参数的率定产生不确定性,影响了非点源污染模型的应用效果。SWAT 模型适用性较好,可用于缺资料地区,在国内外许多流域得到广泛地应用。Gerald Whittaker 等^[13]对西北太平洋非点源污染问题进行了研究,指出 SWAT 模型与经济管理模型的联合有助于环境和政策方针的分析;Gitau 等^[14]利用 SWAT 模型在 Arkansas 无资料流域进行水文模拟,结果较好;胡连伍等^[15]利用 SWAT 模型对丰乐河流域的水文和水质进行了模拟和校核;吴碧琼等^[16]在西充河流域利用 SWAT 模型构建了流域非点源污染模拟方案;胥彦玲等^[17]利用水量、泥沙和水质资料对 SWAT 模型进行参数率定,结果表明模型在黑河流域适用效果较好。

华南地区尤其是珠江三角洲地区,河网密集,社会经济发展迅猛,快速城镇化和人口增长,导致水环境问题日益突出。本研究以广东省江门市潭江泗合水小流域为典型研究对象,基于 8 场降雨事件的水质、水量同步监测数据,构建泗合水流域的非点源污染 SWAT 模型,探讨机理模型在华南地区有限水文水质资料流域的应用问题。研究中利用平均浓度法^[18]估算得到非点源污染年负荷,从年、月两种尺度对 SWAT 模型进行参数率定。最后分析得到流域非点源污染时空分布规律并进行情景模拟,其成果可为珠江三角洲地区水资源保护和水污染控制提供参考依据。

1 研究方法

1.1 区域概况

泗合水流域地处广东省鹤山市双合镇境内,位于东经 112°25′—112°36′,北纬 22°34′—22°44′。泗合水流域面积为 131 km²,地表起伏变异大,植被生长

良好,森林覆盖率为 81.5%。流域属亚热带季风气候,季风显著,风暖湿润,春夏季雨热相宜。流域内雨量充沛,多年平均降水量为 1 661.1 mm,降水量年际变化大。流域多年平均蒸发量和径流量分别为 877.7 mm 和 1.145 3 亿 m³。流域内土壤类型以麻赤红壤和页赤红壤为主,土地利用类型以林地和耕地为主,主要分布在流域中下游以及河网附近水资源丰富区域。经调查流域内农作物以水稻和粉葛为主,施用化肥主要为氮肥和磷肥。本流域属天然流域,区域内无污染企业,可排除点源污染对流域污染负荷的影响。

1.2 数据采集

为估算泗合水流域非点源污染负荷用于 SWAT 模型参数的率定和验证,在该流域出口处设立径流观测和取样断面。野外监测试验共获取了 8 场降雨事件的降雨量、水位、径流量和各污染物输出浓度的同步监测数据。8 场降雨事件均发生在汛期的 5—9 月,每次降雨事件降雨前对河水先采样一次。降雨开始后不久流域产流时测流并同步采样,一般一小时采集一次,降雨后期雨量变小则逐步延长采样间隔时间。采集的水样当场密封、编号,并于 24 h 内及时送回实验室进行污染物测定。

用于 SWAT 模型构建和参数率定的基础数据包括空间和属性数据。空间数据库主要包括数字高程模型(DEM 数据)、土壤类型图、土地利用类型图以及流域水系图等。属性数据库包括水文数据库、气象数据库、土壤属性数据库和农业管理措施数据等^[19]。其中 DEM 数据来源于国家地理信息中心,分辨率 90 m;土地利用数据来源于广东省国土资源厅(2006),对其重分类后划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 种类别;土壤类型主要分为麻赤红壤和页赤红壤,根据土壤资料参照 SWAT 模型土壤数据库建立方法^[20]计算得到土壤理化属性;模型所需气象数据包括气温、太阳辐射、风速、相对湿度数据,由邻近流域阳江气象站监测得到;泗合水流域周边设置的雨量站有布尚、棠密、吉塘、板村和双桥,降雨资料由雨量站监测所得;流域出口处设置有双桥水文站,径

流数据由测站监测获得;流域的作物可概化为水稻和粉葛两种。SWAT 模型通过流域—子流域—水文响应单元(HRU)的空间离散方法反映子流域内不同土地利用方式和土壤类型的空间组合情况^[21]。设定泗合水子流域划分的集水面积阈值为 4 km²,生成 23 个子流域。设定土地利用类型、土壤类型、坡度类型分别占子流域面积 3%,5%,5%以上部分参与生成 HRU,最终生成 127 个水文响应单元。

1.3 平均浓度法

基于若干场降雨事件水文、水质监测资料计算流域年非点源污染负荷。假定单次降雨事件污染物平均浓度为 C_j , C_j 可表示为:

$$C_j = \frac{W_L}{W_A} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Ti} \cdot C_{Ti} - Q_{Bi} \cdot C_{Bi}) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{Ti} - Q_{Bi}) \Delta t_i} \quad (1)$$

式中: W_L 为该次降雨事件携带的负荷量(g); W_A 为该次降雨事件产生的径流量(m³); Q_{Ti} 为 T_i 时刻的实测流量(m³/s); C_{Ti} 为 T_i 时刻的污染物浓度(mg/L); Q_{Bi} 为 T_i 时刻的枯季流量(m³/s); C_{Bi} 为 T_i 时刻的枯季污染物浓度(mg/L); n 为该次降雨事件监测次数; $\Delta t_i = (t_{i+1} - t_{i-1})/2$ 。

多次降雨事件污染物的加权平均浓度为 C_m , 将其近似作为年地表径流污染物的平均浓度。 C_m 可表示为:

$$C_m = \frac{\sum_{j=1}^m C_j W_{Aj}}{\sum_{j=1}^m W_{Aj}} \quad (2)$$

非点源污染年负荷量为 W_n , 可表示为:

$$W_n = W_s \cdot C_m \quad (3)$$

式中: m 是降雨事件次数; W_s 为年地表径流总量(m³); C_j 为第 j 场暴雨产生的非点源污染平均浓度; W_{Aj} 为第 j 场暴雨产生的径流量(m³)。

2 模型适用性分析

2.1 径流参数率定及验证

模型径流参数率定主要以流域出口双桥水文站流量过程拟合度作为判别标准,选取 Nash-Sutcliffe 系数和相对误差作为评价指标。根据资料收集情况,选定 2010—2012 年为率定期,2013—2014 年为验证期,模型运行成功后基于 SUFI-2 算法对径流计算所采用的共计 28 个参数进行敏感性分析^[22]。通过参数自动率定 1 000 次,得到年径流率定及验证结果见图 1。从对比结果可得,率定期和验证期年径流相对误差为 4.4%~17.3%。月径流过程实测值与模拟值对比见表 1。结果显示,月径流率定期和验证期结果相对偏差均小于 10%,Nash 系数较高,分别为 0.83, 0.92。结果表明 SWAT 模型在泗合水流域的径流模拟效果较好。

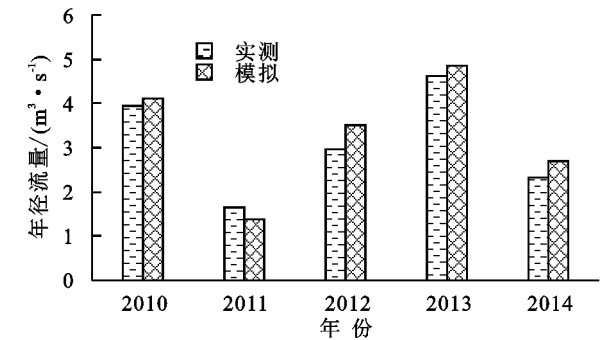


图 1 实测和模拟年径流量对比

表 1 月径流率定与验证

时期	实测月均值/ (m ³ · s ⁻¹)	模拟月均值/ (m ³ · s ⁻¹)	相对 误差/%	Nash 系数
率定期	2.859	2.99	4.64	0.83
验证期	3.48	3.77	7.95	0.92

2.2 水质参数率定及验证

模型径流参数校验完成后,进一步对水质参数进行率定及验证。利用平均浓度法根据 8 场降雨事件水文污染物监测数据估算流域非点源污染年负荷。根据估算得到的流域 2011 年污染负荷数据采用试错法对影响模型泥沙、总氮、总磷输出的模型参数进行率定,并根据 2014 年污染负荷数据对模型参数进行验证。率定及验证成果见图 2 和图 3。从污染物负荷率定及验证结果可以看出,泥沙、总氮、总磷年负荷模拟误差均控制在 30% 以内,说明 SWAT 模型能够较好地反映泗合水流域非点源污染变化情况,可用于该流域非点源污染的描述及预测。

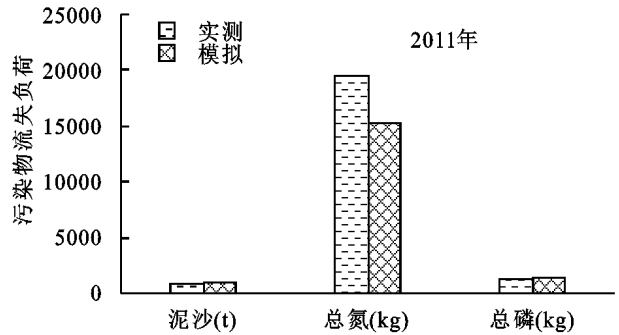


图 2 年污染负荷率定

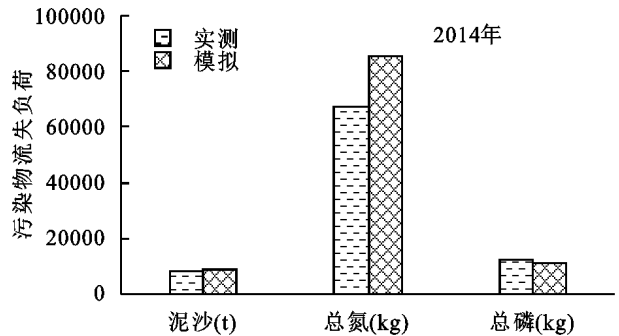


图 3 年污染负荷验证

3 结果与分析

3.1 污染物时空变化特征

应用 SWAT 模型对泗合水流域泥沙、总氮、总磷负荷进行模拟和计算,分析得出 2010—2014 年汛期污染物输出总量占全年的比例。从表 2 可以看出,流域内全年非点源污染负荷分布不均,80%以上都集中在汛期(4—9 月)。2012 年、2013 年流域非点源污染负荷年内分布与降雨量分布对比见图 4。可以得出流域泥沙、氮磷污染物年内各月分布与降雨量分布较同步,降雨对非点源污染输出起着重要作用,这与国

内许多研究是一致的^[23-24]。非点源污染物在日常非降雨条件下积累在地表,降雨时通过径流冲刷迁移进入水体,降雨过程中的雨滴溅击和径流冲刷搬运是水土流失的基本动力。

表 2 2010—2014 年汛期污染输出总量占全年比例			
项目	汛期(4—9 月)	全年	比例/%
泥沙/t	36693	45575	81
总氮/kg	302203	364288	83
总磷/kg	49354	61713	80
降雨/mm	6928	8784	79

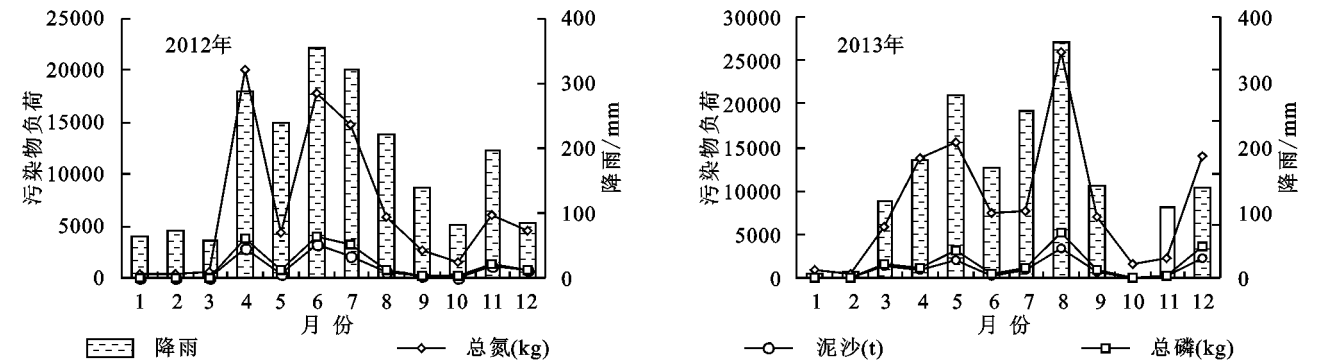


图 4 2012—2013 年月均污染负荷输出分布

2010—2014 年期间泗合水流域总氮负荷输出范围介于 13.05~65.61 kg/hm²,总磷负荷输出范围介于 1.66~10.66 kg/hm²。泗合水各子流域总氮、总磷负荷空间分布见图 5。从图 5 可知,泗合水流域总氮和总磷污染负荷空间分布较相似,污染负荷主要分布在流域下游和上游东北部区域。流域下游人口密度大,人类活动影响显著,污染负荷输出较大;流域上游

东北部村落富集,耕地比例较大,因此污染负荷输出也较大。非点源污染流失的关键源区主要分布在农业和坡耕地区^[25]。农业坡耕地区土壤中的非点源污染物极易在降雨冲刷作用下随径流进入到河流造成水体污染,其中坡度对泥沙和非点源污染物迁移有重要影响。此外,城镇居民建筑用地和工矿用地单位面积的贡献率也不容忽视。

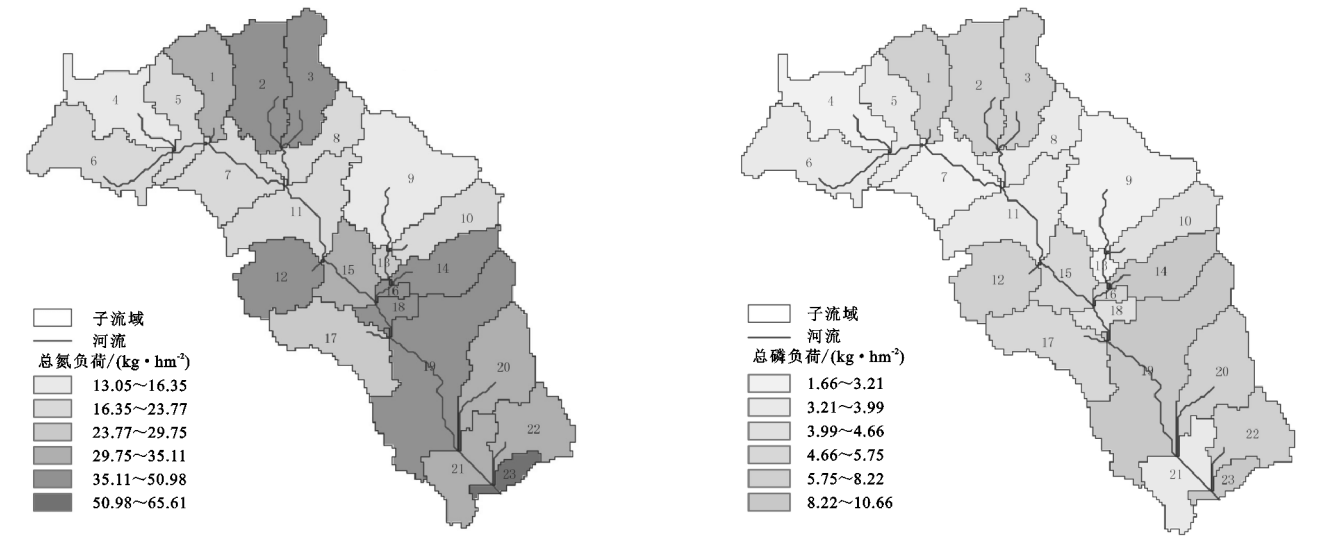


图 5 2010—2014 年总氮、总磷负荷空间分布

提取每一水文响应单元不同土地类型的污染负荷,得到耕地、林地、建筑用地、草地 4 种土地利用类型的非点源污染贡献率见图 6。可以看出,泥沙、有机氮、有机

磷和无机磷流失规律一致,流失强度由小到大分别为林地、建设用地、草地、耕地。硝基氮流失强度由小到大分别为:林地、建设用地、草地、耕地。溶解磷流失强度由

小到大分别为草地、耕地、林地、建设用地,但数量上 4 种土地类型差别并不大,溶解磷流失强度普遍偏低。总体上说,由于周期性农业耕作和施肥活动的影

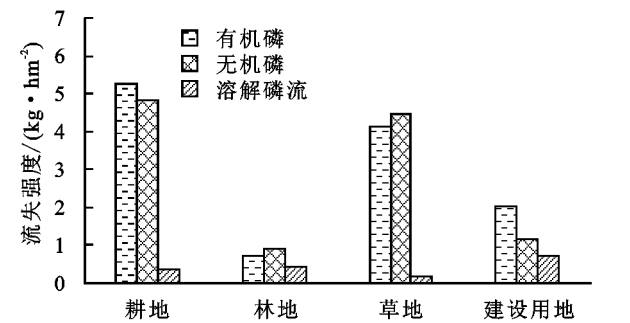


图 6 污染负荷流失强度对比

3.2 情景分析

各种土地类型对流域污染负荷的贡献不同,泗合水流域耕地对流域泥沙、总氮和总磷负荷的产出贡献较大。研究表明,耕地是流域氮磷污染的主要来源,流域退耕还林措施使得流域内坡耕地面积减少,林地面积增加,林草植被通过根系涵养水源,提高土壤的抗蚀性^[26]。下面我们调整变换不同土地类型参数来模拟退耕还林情景,得到各年污染控制效果见表 3。可以看出在 2010—2014 年期间,实行退耕还林措施将使流域径流量、泥沙、氮、磷负荷分别减少 3.2%, 35.8%, 46.1%, 35.8%。通过设置氮肥施用量减少 50%、磷肥施用量减少 50%两种情景来模拟施肥量减少对污染控制的影响,得到结果见表 4。可以看出,施肥量减少对流域产沙和径流几乎没有影响,减少 50%氮肥,可降低总氮负荷 18.1%;减少 50%磷肥,可降低总磷负荷 8.9%。由此可见,在流域内实施退耕还林措施和减少化肥施用量能有效控制非点源污染输出负荷^[27]。

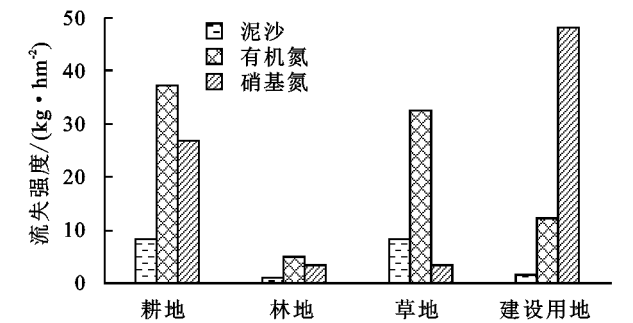
表 3 退耕还林对 2010—2014 年污染输出的影响

2010—2014 年	初始情景	退耕还林	削减率/%
泥沙负荷/t	45583	29246	35.8
总氮负荷/kg	364340	196247	46.1
总磷负荷/kg	61719	39650	35.8
流量/m ³	3.31	3.20	3.2

表 4 施肥措施对 2010—2014 年污染输出的影响

2010—2014 年	初始	氮肥	削减率/	磷肥	削减率/
		减少 50%	%	减少 50%	%
泥沙	45582.9	45506.9	0.2	45530.8	0.1
总氮	364340	298370	18.1	362420	0.5
总磷	61719	61731	0	56182	8.9
流量	3.307	3.307	0	3.307	0

响,单位面积耕地对泥沙侵蚀和氮磷污染负荷的贡献率最大。林地对于污染物质流失有较好的削减效果,单位面积林地非点源污染流失强度最小^[25]。



4 结论

(1) 以广东省江门市潭江泗合水流域为例,分析有限水文、水质资料条件下平均浓度法在 SWAT 模型参数率定中的应用问题。水质参数率定及验证结果表明利用平均浓度法对 SWAT 模型进行参数率定能使其具有较高的适用性。

(2) 流域内全年非点源污染负荷分布不均,80% 以上集中在汛期的 4—9 月。流域泥沙、总氮和总磷年内各月分布与降雨量分布非常一致,降雨对非点源污染输出起着重要作用。

(3) 流域总氮、总磷污染负荷空间分布较相似,表现出明显的区域性。流域下游受人类活动影响,污染负荷较大,流域上游东北部区域村落富集以及耕地比例较大,污染负荷较大。

(4) 不同土地利用类型泥沙流失强度差异显著,由低到高依次为:林地、建设用地、草地、耕地,有机氮、有机磷、无机磷流失规律与泥沙一致,硝基氮与溶解磷则有所不同。

(5) 降低施肥量和实施退耕还林措施可有效降低典型农业非点源污染物的输出。实行退耕还林措施,流域泥沙、TN 和 TP 负荷依次减少 35.8%, 46.1%和 35.8%;减少氮肥和磷肥施用量 50%,TN 和 TP 负荷分别减少 18.1%和 8.9%。

参考文献:

[1] Yu Jianguhua, Min K S, Kim Y. Development of EMC-based empirical model for estimating spatial distribution of pollutant loads [J]. Desalination and Water Treatment, 2011,27:175-188.

[2] 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 reduc-

- tion scenario for nitrogen[J]. Environmental Modelling & Software, 2011,26(1):44-51.
- [3] White M, Storm D, Busted P, et al. A quantitative phosphorus loss assessment tool for agricultural fields[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25: 1121-1129.
- [4] Douglas-Mankin K, Srinivasan R, Arnold J. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010,53(5):1423-1431.
- [5] Jha M, Schilling K, Gassman P, et al. Targeting land-use change for nitrate-nitrogen load reductions in an agricultural watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,65(6):342-352.
- [6] Albek M, Ogutveren U B, Albek E. Hydrological modeling of Seydi Suyu watershed (Turkey) with HSPF[J]. J. Hydrol., 2004,285:260-271.
- [7] Sangjun I, Brannan K M, Mostaghimi S. Simulating hydrologic and water quality impacts in an urbanizing watershed[J]. J. Am. Water Resour. Associat., 2003, 39:1465-1479.
- [8] Walton R S, Hunter H M. Isolating the water quality responses of multiple land uses from stream monitoring data through model calibration[J]. J. Hydrol., 2009, 378:29-45.
- [9] Ribarova I, Ninov P, Cooper D. Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study[J]. Bulgaria. Ecol. Modell., 2008,211:241-246.
- [10] 齐琳,林剑,马继力,等. Ann AGNPS 模型应用于辽河源小流域的主要参数确定方法[J].环境科学学报, 2012,32(4):865-870.
- [11] 王晓燕,林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 Ann AGNPS 模型模拟的影响[J].中国环境科学,2011,31(1):46-52.
- [12] Ming-Shu T. Estimation of runoff and sediment yield in the Redrock Creek watershed using Ann AGNPS and GIS[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004(5):865-867.
- [13] Gerald W. Application of SWAT in the evaluation of salmon habitat remediation policy[J]. Hydrological Processes, 2005,19:839-848.
- [14] Gitau M W, Chaubey I. Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds[J]. Water, 2010,2(4):849-871.
- [15] 胡连伍,王学军,罗定贵,等.基于 SWAT2000 模型的流域氮营素养环境自净效率模拟:以杭埠—丰乐河流域为例[J].地理与地理信息科学,2006,22(2):35-38.
- [16] 吴碧琼,黎小东,敖天其,等.基于参数移植法的 SWAT 模型在缺资料地区非点源污染模拟中的应用[J].四川大学学报:工程科学版,2015,47(S2):9-16.
- [17] 胥彦玲,秦耀民,李怀恩,等. SWAT 模型在陕西黑河流域非点源污染模拟中的应用[J].水土保持通报, 2009,29(4):114-117.
- [18] 李家科,李怀恩,沈冰,等.渭河干流典型断面非点源污染监测与负荷估算[J].水科学进展,2011,22(6):818-828.
- [19] 盛盈盈,赖格英,李世伟.基于 SWAT 模型的梅江流域非点源污染时空分布特征[J].热带地理,2015,35(3): 306-314.
- [20] 魏怀斌,张占庞,杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J].水利水电技术,2007,38(6):15-18.
- [21] 宋林旭,刘德富,肖尚斌,等.基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J].环境科学学报, 2013,33(1):267-275.
- [22] 陈强,苟思,秦大庸,等.一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J].水利学报,2010,41(1):113-119.
- [23] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民.不同降雨—径流过程中农业非点源污染研究[J].环境科学与技术,2008,31(10):5-8.
- [24] 刘平,程炯,刘晓南,等.广州流溪河流域典型农业集水区降雨径流污染物输出特征分析[J].生态与农村环境学报,2008,24(1):92-95.
- [25] 方玉杰.基于 SWAT 模型的赣江流域水环境模拟及总量控制研究[D].南昌:南昌大学,2015.
- [26] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10):1142-1149.
- [27] 马睿,程凯,郭莹莹,等.基于 SWAT 模型的石汶河流域农业非点源氮污染时空分布特征研究[J].中国水土保持,2020(7):61-64.