

未来气候情境下渭河流域陕西段非点源污染负荷响应

刘吉开¹, 万甜¹, 程文¹, 任杰辉¹, 陈瑶²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101)

摘要: [目的] 在全球气候变暖的背景下, 探讨气候条件变化对渭河流域陕西段非点源污染负荷的影响, 旨在为流域综合治理措施提供依据, 从而缓解气候变化对水环境的不利影响。[方法] 基于非点源污染分布式模拟模型(SWAT 模型), 分别对 2020、2030 和 2050 年气温和降雨等气候因子变化下渭河流域陕西段径流及非点源污染负荷进行模拟, 探讨了气候变化对该流域径流及水体中氮、磷年均负荷的影响。[结果] ①气候变化对流域径流量影响较大。随着未来气温升高降雨增加的共同作用下, 径流量增加; 到 2050 年, 在平均气温增加 2.2 °C, 降雨量增加 7% 的情况下, 渭河陕西段径流量将增加 11.9%。②在未来气候变化的影响下, 流域年均总氮负荷增加 20.9%; 总磷负荷增加 13.3%。[结论] 未来气温升高和降雨增多的气候变化共同作用下, 河道径流量增加, 总氮、总磷负荷增多, 农业非点源污染问题越来越突出。

关键词: 气候变化; 非点源污染; 渭河陕西段; 径流; SWAT 模拟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)04-0082-05

中图分类号: Q948

文献参数: 刘吉开, 万甜, 程文, 等. 未来气候情境下渭河流域陕西段非点源污染负荷响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 82-86. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.013. Liu Jikai, Wan Tian, Cheng Wen, et al. Effects of climate change scenarios on non-point source pollution load on Shaanxi section of Weihe River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 82-86.

Effects of Climate Change Scenarios on Non-point Source Pollution Load on Shaanxi Section of Weihe River Basin

LIU Jikai¹, WAN Tian¹, CHENG Wen¹, REN Jiehui¹, CHEN Yao²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 10010, China)

Abstract: [Objective] In the background of global warming, the impact of climate changes on non-point source pollution load in Shaanxi section of Weihe River Basin was discussed in order to provide a basis for comprehensive river basin management measures, and the adverse effects of climate changes on water environment can be mitigated. [Methods] Based on the non-point source pollution distributed simulation model (SWAT model), the runoff and non-point source pollution loads in Shaanxi section of Weihe River Basin were simulated under the changes of climate factors such as temperature and rainfall in 2020, 2030 and 2050, respectively. The impacts of climate change on runoff and average annual loads of nitrogen(N) and phosphorus(P) in water were analyzed. [Results] ① Climate changes had a great influence on runoff in Weihe River Basin. The runoff increased with the future climate changes due to the increased temperature and precipitation. By 2050, in the case of the mean temperature increased by 2.2 °C and the rainfall increased by 7%, the runoff in the Weihe River will increased by 11.9%, which were comparing with the temperature, rainfall and runoff in 2012. ② Under the influence of the rising temperature and increasing in the future, the annual average total phosphorus load will increase. By 2050, in the case of the average temperature increased by 2.2 °C and the annual rainfall increased by 7%, the average annual nitrogen load in the basin increased by 20.9% and the total phosphorus load increased by 13.3%, which were comparing with 2012. [Conclusion]

收稿日期: 2018-02-07

修回日期: 2018-03-23

资助项目: 陕西省水利科技项目“渭河陕西段水环境特征及水质演变过程分析”(2016slkj-10)

第一作者: 刘吉开(1994—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为水环境污染与防治。E-mail: 804600169@qq.com。

通讯作者: 万甜(1984—), 女(汉族), 湖北省天门市人, 博士, 讲师, 主要从事水环境模拟与预测研究。E-mail: wantian@xaut.edu.cn。

Under the future climate changes with the coefficient of rainfall increase and warming, the runoff of the river increased, and the total load of N and P in water environment increased, which will result in a rather serious problem of agricultural non-point source pollution.

Keywords: climate changes; non-point source pollution; Weihe River; runoff; SWAT model

近年来,随着社会的快速发展,全球气候变暖成为当今社会关注的热点问题^[1],联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中指出^[2]:气候变化正在全世界范围内发生,全球气温变暖是毋庸置疑的趋势,由此导致的降雨量和气温的变化必然会对水体污染产生深远的影响^[3]。水体污染通常分为点源污染和面源污染(即非点源)^[4],其中非点源污染因具有模糊性、潜伏性,信息获取较难、危害规模大,研究、管理不好控制等特点^[5],所以对其监测和处理工作较为复杂,再加上非点源污染的统计资料少而且不好收集,所以对非点源污染效果定量的预测变得十分困难^[6]。而降雨和地表径流是非点源污染发生的主要驱动因素,气候变化对降雨温度的影响将直接作用于水环境中污染物迁移转化过程^[7]。因此,探讨气候条件变化对流域非点源污染负荷的影响可以为流域综合治理措施提供理论依据,具有重要的实践意义。模型模拟是非点源污染的量化和防治研究的有效方法。长期的非点源污染防治过程中产生了大量的模拟非点源污染的模型,如:SWMM模型、STORM模型、AGNPS模型、SWAT模型等,不同的模型有各自的机理和适用的范围^[8]。其中,SWAT(soil and water assessment tool)模型是目前非点源污染模拟中应用最广、最具代表性、前景最广阔的一种模型^[9-10]。近年来,SWAT模型已成功应用到我国黑河、泔河和渭河等在内的很多流域^[11-12],并取得了很好的模拟效果。渭河是黄河的第一大支流,养育了陕西64%的人口,集中着陕西省65%的国内生产总值^[13],渭河流域陕西段的非点源污染控制对渭河的

污染控制有举足轻重的作用。因此,本研究将以渭河流域陕西段为研究区,采用SWAT模型,通过对模型进行校准验证,在保证模型良好模拟效果的前提下,以近10a来的气象资料为基础,对未来30a气温和降雨等气候因子变化下渭河流域陕西段径流及非点源污染负荷进行模拟,探讨气候变化对该流域径流及水体中氮、磷年均负荷的影响,以期对未来气候变化情境下渭河流域非点源污染的预测和防治提供技术支持。

1 研究区概况

渭河发源于甘肃省鸟鼠山,东至陕西省潼关县最后汇入黄河,是黄河最大的支流,也是陕西关中最大的河流,渭河陕西段灌溉了关中两岸 $9.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 多良田,养育着陕西64%的人口,对于推动陕西社会的经济发展起到至关重要的作用。渭河干流在陕境内,流长502.4 km,流域面积67 108 km^2 ,占陕境黄河流域总面积的50%。全河多年平均径流量 $1.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中陕境产流 $6.27 \times 10^9 \text{ m}^3$;每年输入黄河泥沙达 $5.80 \times 10^8 \text{ t}$,约占黄河泥沙总量的1/3。

2 数据与方法

2.1 数据及来源

SWAT模型需要的数据包括空间数据和属性数据^[14-16]。空间数据包括数字高程图(DEM)、土地利用图、土壤类型图;属性数据包括气象数据、水文数据、水质数据、土壤数据、土地管理数据、点源污染负荷。表1为模型数据库所用的空间数据和属性数据。

表 1 模型所需的空間数据及属性数据

类型	名称	数据格式	数据概述	数据来源
空间数据	DEM图	Grid	分辨率为30 m×30 m	地理空间数据(http://www.gscloud.cn/)
	土地利用图	Shape	1:250 000的土地利用图	中科院资源环境科学数据中心
	土壤类型图	Shape	1:1 000 000的土壤类型图	中科院地理所
属性数据	气象数据	DBF	逐日降雨量、最高和最低气温、太阳辐射、风速和相对湿度	12个水文气象站点(2006—2011年)
	水文数据、水质数据	DBF	2006—2011年水文站日均流量、逐日含沙量以及氮、磷含量	渭华县总站
	土壤数据	DBF	土壤物理性质、土壤化学性质	中国土壤数据库(http://www.soil.csdb.cn/)
	土地管理数据	DBF	作物生育期、施肥等	地方统计资料、年鉴
	点源污染负荷	DBF	点源排放口位置、污染物负荷	地方统计资料、污染源调查

2.2 子流域及水文响应单元的划分

用高程图(DEM)对流域水系进行提取,然后设定河道阈值以及流域出口,进行流域子流域的划分。子

流域划分是非点源污染模型模拟的第一步,直接影响最终模拟结果的精确性^[17-18]。本研究在划分子流域时,将子流域划分的阈值定为60 000 hm^2 ,选择华县

作为流域总出口,将研究区域划分为 35 个子流域,总出口在 10# 子流域。河网及子流域的划分如图 1 所示;依据子流域输出报表,设置土地利用面积阈值为 0%,土壤类型阈值为 5%,坡度阈值为 5%,经计算,SWAT 模型将全流域 35 个子流域共划分为 634 个水文响应单元。

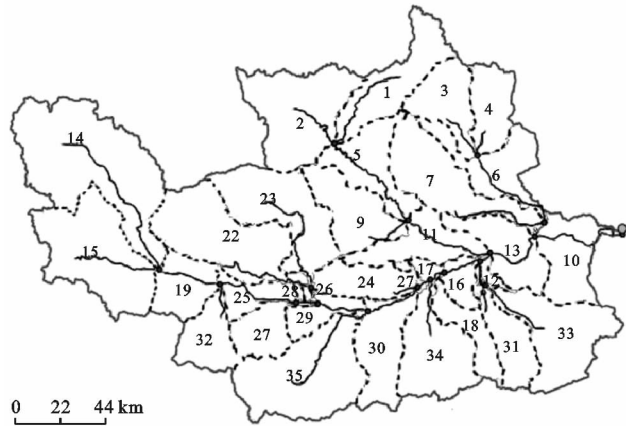


图 1 研究流域子流域划分

2.3 参数率定及验证

由于渭河华县站的实测流量是整个渭河汇水面积得到的流量,而渭河陕西段只是其中的一部分,渭河干流是由林家村站进入陕西省,所以渭河陕西段的实测流量是由渭河华县站的流量减去林家村站的流量得到,以 2006—2011 年的的实测资料与模拟资料作为率定与验证的基础,2006—2008 年作为率定期,2009—2011 年作为验证期。根据实测资料,以总磷总氮为指标,采用 LH-OAT 分析法对 SWAT 模型进行敏感性分析,参数的选择及校正结果详见表 2。完成敏感性分析后,采用模型中 SCU-UA 算法对模拟值和实测值进行率定和验证,当模拟值与实测值的相对误差 $r < 20\%$,决定系数 $R^2 > 0.6$,Nash-suttcliffe 模拟效率系数 $Ens > 0.5$,说明二者吻合较好,可以满足要求。表 3 为 SWAT 模型径流、泥沙和总氮、总磷率定和验证结果。结果表明:实测值与模拟值之间的拟合度较好,反映出 SWAT 模型与渭河陕西段适应的比较好,可以适用于渭河陕西段。

表 2 SWAT 模型校正参数阈值

模拟项目	模型变量	参数调整阈值	变量名	率定值
地表径流	CN ₂	35~98	径流曲线数	63
	ESCO	0~1	土壤蒸发补偿系数	0.68
	SOL_Z	0~3 000	土壤底部的埋深	2 600
泥沙	USLE_P	0~1	水土保持因子	0.5
	SPCON	0~0.01	水流挟沙能力函数的线性系数	0.006
	SPEXP	1~1.5	水流挟沙能力函数的幂指数	1.3
营养物	NPERCO	0~1	氮的下渗系数	1
	PPERCO	10~17.5	磷的下渗系数	12

表 3 SWAT 模型参数评价结果

模拟期	径流			泥沙			总磷			总氮		
	$r/\%$	R^2	Ens	$r/\%$	R^2	Ens	$r/\%$	R^2	Ens	$r/\%$	R^2	Ens
率定期	8.2	0.846	0.841	-19.8	0.85	0.83	-13.6	0.853	0.857	-11.7	0.853	0.84
验证期	4.3	0.788	0.879	2.5	0.875	0.76	-3.5	0.805	0.83	-13.9	0.805	0.769

注: r 、 R^2 、Ens 分别为相对误差,决定系数和 Nash-suttcliffe 模拟效率系数。

3 未来气候变化情景下的非点源污染响应

3.1 未来气候变化情景

气候变化情景中主要考虑气温和降水的变化,《气候变化 2013:自然科学基础》提出,2016—2035 年全球地表温度可能会升高 0.3~0.7 °C,降水也会在不同地区出现不同程度的增加趋势,到 2050 年可能增加 5%~7%。秦大河也在《未来 100 年全球气候将继续变暖》中提到,到 2020—2030 年全国气温将上升

1.7 °C,到 2050 年全国气温将上升 2.2 °C,变暖幅度由南向北增加,不少地区降水也会出现增加趋势^[19]设置未来 2020,2030 和 2050 年的温度和降水变化情况详见表 4。

表 4 未来气候变化情景

情景代码	预计出现年份	温度/°C	降水/%
情景 1 暖湿变化	2020	+0.5	+3
情景 2 强化暖湿	2030	+1.7	+5
情景 3 高强暖湿	2050	+2.2	+7

3.2 径流对气候变化的响应

径流是非点源污染的主要驱动力,研究区域径流变化直接影响非点源污染负荷的变化,而径流是气候条件与流域下垫面综合作用下的产物,直接受气候因素的影响,研究表明气候变化在较长时间尺度上是流域水资源变化的一个主要驱动因素因此,要确定研究区域内未来气候变化的非点源污染响应,首先应该对华县水文站径流对气候变化的响应进行研究,其中基准期的净流量为2006—2015年的气象资料模拟的年径流量的平均值。由图2可知,径流变化与气温、降水等气候因素的关系密切,2020年在气温增加0.5℃,降水量增加3%的情况下,径流量增加了5.6%,2030年在气温增加1.7℃,降水量增加5%的情况下,径流量增加了8.5%,2050年在气温增加2.2℃,降水量增加7%的情况下,径流量增加了11.9%,这数据说明随着未来气温升高降水变多的气候变化共同作用下,径流量也会随之增大。

3.3 气候变化情况下的非点源污染响应

利用SWAT模型对气候变化下的非点源污染进行模拟,可得到气候变化条件下的氮、磷年均负荷量,其中基准期的TN,TP年负荷为2006—2015年的气象资料模拟的的TN,TP年负荷平均值。由图3可以看出,2020年在气温增加0.5℃,降水量增加3%的情况下,总氮产量增加了7.5%,2030年在气温增加

1.7℃,降水量增加5%的情况下,总氮增加了16.7%,2050年在气温增加2.2℃,降水量增加7%的情况下,总氮增加了20.9%,未来在气温上升,降水增加的气象变化影响下总氮的产量会一直处于上升状态。由图3还可看出,2020年在气温增加0.5℃,降水量增加3%的情况下,总磷产量增加了5.7%,2030年在气温增加1.7℃,降水量增加5%的情况下,总磷增加了9.8%,2050年在气温增加2.2℃,降水量增加7%的情况下,总磷增加了13.3%,未来在气温上升,降水增加的气象变化影响下总磷的产量会一直处于上升状态,而且对比发现总磷上升的百分率小于总氮的百分率,说明未来的气候变化对总磷的影响是小于总氮的。

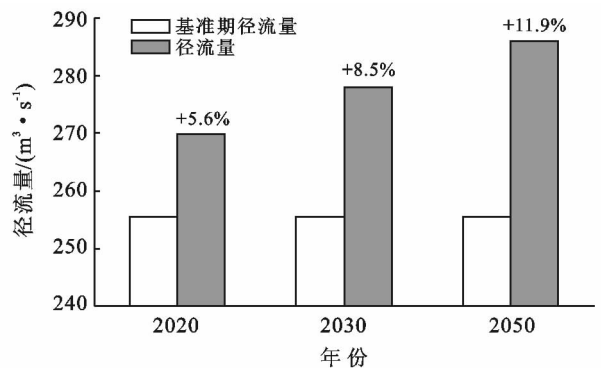


图2 流域年径流量随气候变化关系

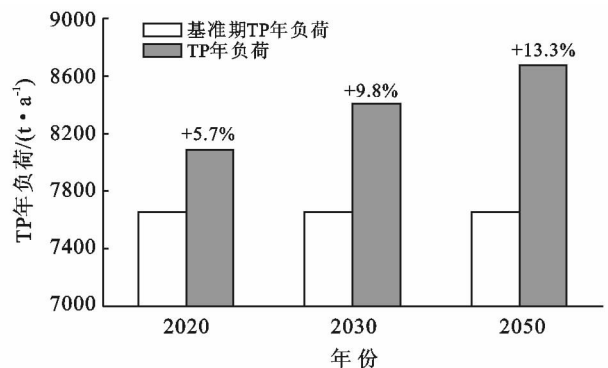
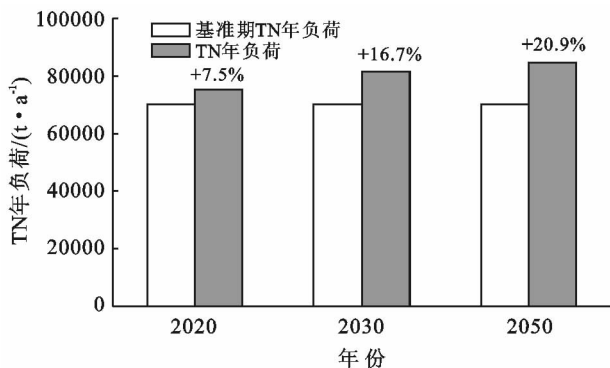


图3 研究流域 TN 和 TP 年负荷随气候变化关系

4 结论

(1) 气候变化对流域径流量影响较大。在未来气温升高、降雨增加等气候变化的共同作用下,径流量将有所增加:在气温增加0.5℃,降水量增加3%的情况下,径流径流量增加了5.6%;气温增加1.7℃,降水量增加5%的情况下,径流量增加了8.5%;在气温增加2.2℃,降水量增加7%的情况下,径流量增加了11.9%。

(2) 在未来气候变化气温升高、降雨量增大的影响下,流域年均总氮、总磷负荷量增加:2020年总氮、总磷产量增加了7.5%和5.7%,2030年总氮、总磷增加了16.7%和9.8%,2050年总氮、总磷增加了20.9%和13.3%,总氮的增长高于总磷。说明在未来气温升高和降雨增多的气候变化共同作用下,河道径流量增加,总氮、总磷负荷增多,农业非点源污染问题越来越突出。

(3) 今后针对渭河的非点源污染治理应该注重

增加沿岸防护林带的面积及水系绿化,加强水土流失治理,加强植树种草、退耕还林,增加地表覆盖,保护生态环境;减少化肥的施用,调整不合理施肥,更进一步改善重氮肥、轻磷肥现象,推广使用有机肥;加强居民生活污水处理,特别是没有成熟污水收集与处理措施的农村地区。

[参 考 文 献]

- [1] Change I P O C. Climate change 2007: The physical science basis[J]. Agenda, 2007,6(7):333.
- [2] 林榕杰,方国华,郭玉雪,等. RCP 情景下都柳江上游气候变化及径流响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(1):74-80.
- [3] 耿润哲,张鹏飞,庞树江,等. 不同气候模式对密云水库流域非点源污染负荷的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22):240-249.
- [4] 杨立梦,高红涛. 国内外非点源污染模型研究进展[J]. 资源节约与环保, 2016,23(5):151-155.
- [5] 高士平,杜丽娟,王瑞君,等. 基于 3S 技术的河北省泥石流灾害预测模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(4):93-96.
- [6] 路月仙,陈振楼,王军,等. 地表水环境非点源污染研究的进展与展望[J]. 环境保护, 2003(11):22-26.
- [7] 刘博,徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2011,27(5):52-61.
- [8] Lam Q D, Schmalz B, Fohrer N. Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(2):317-325.
- [9] 李家科. 流域非点源污染量化研究[D]. 陕西 西安:西安理工大学, 2009.
- [10] 张蕾,卢文喜,安永磊,等. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展[J]. 生态环境学报, 2009,18(6):2387-2392.
- [11] 杨寅群,李怀恩,杨方社. 基于数学模型的陕西黑河流域水源区植被过滤带效果评价[J]. 水科学进展, 2013, 24(1):42-48.
- [12] 李家科,李怀恩,董雯,等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. 环境科学学报, 2011,31(7):1470-1478.
- [13] 陈佳,宋进喜,杨小刚,等. 渭河陕西段潜流带污染特征及其对河水的影响[J]. 干旱区研究, 2015,32(1):140-148.
- [14] 郭子鹏. 基于 SWAT 模型的太行山区农业面源污染模拟研究[D]. 河北 石家庄:河北农业大学, 2013.
- [15] 宋东刚. 渭河流域水污染的成因及防治对策[J]. 陕西环境, 2001,8(1):22-25.
- [16] 彭殿宝,周孝德. 渭河流域(陕西段)水体现状及水污染综合治理研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010,21(1):129-131.
- [17] 邱临静,郑粉莉, Yin Runsheng, 等. DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响[J]. 生态学报, 2012,32(12):3754-3763.
- [18] 孟翠翠. 基于 SWAT 模型的黄水河流域非点源污染模拟研究[D]. 河南 郑州:郑州大学, 2010.
- [19] 秦大河. 未来 100 年全球将继续变暖[J]. 中国改革, 2009(11):10-13.
- [33] 谢贤健,张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2012,26(6):175-179.
- [34] 章明奎,何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997,6(3):198-202.
- [35] 熊毅. 土壤胶体(第三册):土壤胶体的性质[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- [36] Goldberg, Sabine, Suarez, et al. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid-zone soils[J]. Soil Science, 1988,146(5):317-325.
- [37] Schulten H R, Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: Composition, properties and models of molecular structure[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000,30(5):399-432.
- [38] Hou T, Xu R, Tiwari D, et al. Interaction between electrical double layers of soil colloids and Fe/Al oxides in suspensions[J]. Journal of Colloid&Interface Science, 2007,310(2):670.
- [39] 张琪,方海兰,史志华,等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. 林业科学, 2007,43(S1),77-82.
- [40] Barberis E, Marsan F A, Arduino E. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons[J]. European Journal of Soil Science, 1991,42(4):535-542.
- [41] Greathouse J, Johnson K, Greenwell H. Interaction of natural organic matter with layered minerals: Recent developments in computational methods at the nanoscale[J]. Minerals, 2014,4(2):519-540.
- [42] 魏朝富,谢德体,李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展[J]. 地球科学进展, 2003,18(2):221-227.

(上接第 81 页)