

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.035.

庄秋雨, 崔艳欣, 张玉虎, 等. 基于 SWAT 的乌伦古河流域气候和土地利用变化对径流和总磷的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 1-10.

Zhuang Qiuyu, Cui Yanxin, Zhang Yuhu, et al. Effects of Climate and Land Use Change on Runoff and Total Phosphorus in the Ulungu River Basin Based on SWAT Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 1-10.

基于 SWAT 的乌伦古河流域气候和土地利用变化对径流和总磷的影响

庄秋雨, 崔艳欣, 张玉虎, 蒲 晓

(首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘 要: [目的] 定量探讨气候和土地利用变化对径流和总磷负荷的影响, 为新疆乌伦古河流域未来水土资源的合理开发利用及水污染的防控提供科学参考。[方法] 通过构建 SWAT 分布式水文模型, 采用情景分析法设定 6 种不同的变化情景, 预测了流域在变化环境下的径流和总磷负荷。[结果] 径流和总磷在率定期和验证期的决定系数 R^2 和纳什系数 E_{ns} 均达到 0.75 以上, 构建的 SWAT 模型在乌伦古河流域径流和总磷负荷变化的模拟中具有较好的适用性。气候和土地利用变化共同影响下, 年均径流量分别上升 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$, S_4 情景年均总磷负荷下降 894.5 t , S_5 情景增加 7.41 t 。气候变化影响方面, 径流量与降水变化呈正相关, 降水变化是乌伦古河流域径流变化的主要驱动因素, 而总磷负荷与气温和降水变化均呈正相关, 但降水对总磷负荷的影响更显著; 土地利用变化影响方面, 径流和总磷与土地利用变化均呈负相关关系, 土地利用变化是总磷负荷增加的主要影响因素之一。[结论] 气候和土地利用变化对新疆乌伦古河流域的径流和总磷负荷的产生分别具有促进和抑制作用, 未来面临降水增多与水体污染问题时, 需同时考虑气候和土地利用变化的影响来制定相应政策。

关键词: SWAT 模型; 气候变化; 土地利用变化; 径流与总磷; 乌伦古河流域

中图分类号: P333; P467; X52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0001-10

Effects of Climate and Land Use Change on Runoff and Total Phosphorus in the Ulungu River Basin Based on SWAT Model

Zhuang Qiuyu, Cui Yanxin, Zhang Yuhu, Pu Xiao

(College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to quantitatively explore the effects of climate and land use changes on runoff and total phosphorus loading, and to provide scientific references for the future rational development and utilization of soil and water resources as well as the prevention and control of water pollution in the Ulungu River Basin in Xinjiang. [Methods] Runoff and total phosphorus loads from the watershed under changing environments were predicted by using the SWAT distributed hydrological model and setting up six different change scenarios using scenario analysis. [Results] The coefficients of determination R^2 and Nash coefficient E_{ns} of runoff and total phosphorus in the rate period and validation period reached more than 0.75, and the established SWAT model had good applicability in the simulation of runoff and total phosphorus loading changes in the Ulungu River Basin. The combined effects of climate and land use change increase runoff volume by $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ and $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$, respectively, and the average annual

收稿日期: 2024-01-09

修回日期: 2024-03-12

资助项目: 国家“山水林田湖草”生态保护修复工程项目(HNS-QR-022); 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(42220104004); 国家自然科学基金项目(42377337)

第一作者: 庄秋雨(1999—), 女, 四川成都人, 硕士, 研究方向为气候变化与水土资源。E-mail: zqy99993@163.com

通信作者: 张玉虎(1975—), 男, 江苏徐州人, 教授, 主要从事环境系统分析及模型研究。E-mail: zhang_yuhu@163.com

蒲晓(1984—), 男, 山东淄博人, 副教授, 主要从事水环境模拟与污染控制研究。E-mail: xiao.pu@cnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

total phosphorus load decreases by 894.5 t under the S_4 scenario and increases by 7.41 t under the S_5 scenario. As for the impact of climate change, runoff was positively correlated with precipitation changes, which was the main driver of runoff changes in the Ulungur River Basin, while total phosphorus loads were positively correlated with both temperature and precipitation changes, but the effect of precipitation on total phosphorus loads was more significant. As for the impact of land use change, both runoff and total phosphorus were negatively correlated with land use change, and land use change was one of the main influencing factors for the increase of total phosphorus load. [Conclusion] Climate and land use changes have contributed to and inhibited runoff and total phosphorus loading in the Ulungur River Basin in Xinjiang. The impacts of climate and land use changes need to be taken into account in the formulation of policies when facing the problems of increased precipitation and water pollution in the future.

Keywords: SWAT model; climate change; land use change; runoff and total phosphorus; Ulungur River Basin

气候与土地利用/覆被变化(LUCC)是影响流域水量与水质的两个主要因素^[1]。气候变化会影响降雨、气温和蒸发,甚至导致全球许多地区极端降水强度增加,进而改变流域的水文循环和径流的形成过程^[2]。土地利用变化会影响流域下垫面条件和水资源的时空分配过程,对流域产汇流、土壤湿度及蒸散发产生显著影响^[3],导致地表水下渗、土壤侵蚀和营养物随地表径流流失等问题。这些变化因素会影响水文循环过程,进而带来水资源和水环境问题^[4]。因此,气候和土地利用变化对径流和流域面源污染的影响成为环境领域的热点问题。

我国西北干旱地区对全球气候变化的响应更为敏感,近几十年来,受气温升高、降水增多及冰冻圈退缩的影响,西北干旱区气候逐渐由暖干向暖湿的趋势发展^[5]。张红丽等^[6]研究结果表明 1960—2021 年西北地区整体呈显著暖湿化趋势。杜懿等^[7]基于 CM-FD 再分析数据集和 CMIP5 全球气候模式输出数据,分析了中国西北地区历史及未来气候的演变特征和趋势,结果表明其历史气候呈现出高度的暖湿化演变倾向且具有未来持续性。Zhang 等^[8]研究结果表明西北地区过去 60 年的气温和降水表现出一致的增加趋势,且干燥度明显呈持续减小趋势,气候暖湿化趋势毋庸置疑。乌伦古河流域位于西北干旱区,近年来对其裸地的开发力度逐渐加大,土地利用类型发生了较大的变化。同时,由于畜禽养殖业迅速发展,使得乌伦古河流域农业面源污染负荷增加,流域径流及总磷负荷呈现上升趋势^[9-10]。因此,探究气候和土地利用变化对流域径流和总磷负荷的影响对于流域水环境保护具有重要现实意义。

目前 SWAT 模型已经是对流域面源污染进行研究的主要工具^[11]。国内外已将 SWAT 模型广泛应用于径流和面源污染研究中,如 Santhi 等^[12]以德克萨斯州流域为研究区,应用 SWAT 模型对畜禽养殖

业产生的面源污染负荷进行了模拟估算。Ottar 等^[13]使用 SWAT 模型对波罗的海东部流域径流在气候和土地利用变化单一要素与两者协同要素综合影响进行探究,结果表明气候和土地利用变化对径流的综合影响是非累积性的。王一帆等^[14]基于 SWAT 模型,通过设置 3 种土地利用变化情景,探讨了不同土地利用类型对径流的影响。邹凯波等^[15]以新疆乌伦古河为研究区构建 SWAT 模型,设置不同气候变化情景进行模拟分析,结果表明降水增加是流域径流和面源污染负荷的主要影响因素之一。汪飞等^[16]利用 SDSM 统计降尺度及大气环流模式生成的未来不同情景下的气温和降水数据驱动 SWAT 模型,分析了气候变化条件下的径流特征。周凡等^[17]建立 SWAT 模型,量化了清水河流域在气候和土地利用变化的共同影响下 2025 年水量平衡要素的变化。

以上基于 SWAT 模型的研究大多只涉及单一要素变化对径流或者面源污染负荷的影响,很少有研究将 SWAT 模型应用于西北干旱地区探究气候和土地利用变化共同影响下流域径流和总磷负荷的响应。因此,本文以新疆乌伦古河流域为研究区,构建 SWAT 模型预测不同情景下的流域径流和总磷负荷,重点探讨气候与土地利用变化对径流和总磷负荷的单一与协同影响。以期干旱区气候和土地利用变化情景下的流域水资源管理和水环境保护提供科学支撑。

1 研究区概况

乌伦古河位于新疆阿勒泰地区,发源于青河县境内的阿尔泰山,自东向西经过富蕴县、福海县,最终汇入乌伦古湖。乌伦古河流域的地理坐标为 $46^{\circ}10' - 47^{\circ}28'N, 87^{\circ}05' - 90^{\circ}45'E$,主要包括大青格里河、小青格里河、查干郭勒河及布尔根河四条支流,流域总面积 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中位于我国境内的面积为 $2.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域属于大陆性寒温带干旱气候,多年平均降

雨量为 490.84 mm,多年平均气温为 4.52 ℃,气温年较差和日较差极大,光照丰富。青河县、富蕴县、福海县是乌伦古河流域包含的 3 个县级行政单位,共涉及 17 个乡镇、2 个农场和 1 个兵团,流域 DEM 见图 1。

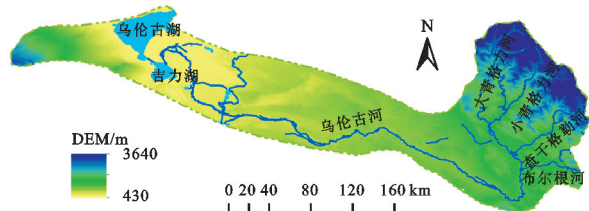


图 1 乌伦古河流域 DEM 图

Fig. 1 Elevation map of the Ulungu River Basin

表 1 数据库所需数据类型与来源

Table 1 Data types and sources required for the database

数据类型	数据名称	年份	分辨率	来源
空间数据库	数字高程(DEM)	2020	30 m×30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
	土地利用	2000—2020	30 m×30 m	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)
	土壤类型	—	30 m×30 m	HWSD(世界土壤数据库)
	气象数据	2010—2020	—	阿勒泰水文局
属性数据库	土壤属性	—	—	HWSD, SPAW
	水文、水质	水文 2011—2020 水质 2017—2020	—	阿勒泰水文局

2.2 模型率定与验证

本文利用 SWAT-CUP 软件内置的 SUFI-2 算法进行模型的校准与参数敏感性分析,选择全局敏感性分析方法选取参数,该方法通过 P-Value 和 t-Stat 值来评估参数的敏感性,P-Value 值越接近于 0 或 t-Stat 绝对值越大,参数就越敏感^[18]。本研究设置 2010—2011 年为模拟的预热期,2012—2018 年为率定期,2019—2020 年为验证期,径流和总磷设置的迭代次数分别为 2000 次和 800 次。

2.3 模型适用性评价

本文以流域中段的二台站 2012—2020 年的月尺度水文数据和 2019—2020 年的水质数据分别对径流和总磷进行率定和验证,采用 Nash 系数(Nash Sutcliffe- E_{ns})和相关系数(Correlation Coefficient- R^2)两个评价指标对模型的适用性进行评价。通常认为, $R^2 > 0.60$ 且 $E_{ns} > 0.50$,认为模型具有较好的模拟结果;当 $R^2 \leq 0.50$ 且 $E_{ns} \leq 0.50$ 时,认为模拟结果不可靠。

2.4 CA-Markov 模型

Markov 模型在“无后效性”的地理事件中较为常用^[19]。因此,Markov 模型是土地利用变化模拟的良好工具。CA 模型即元胞自动机模型,该模型可对复杂系统下的时空特性进行模拟。CA-Markov 模型是 CA 模型和 Markov 模型优势的结合,弥补了 Markov 模型对空间属性不敏感的缺陷^[20]。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型构建数据准备

本文构建 SWAT 模型所使用到的数据主要包括空间数据和属性数据,数据的具体类型与来源见表 1。SWAT 模型数据库的构建需要统一坐标系和投影类型^[15]。根据研究区的地理位置,本研究的投影坐标系一致选取 WGS_1984_UTM_Zone_45N,基准面为 D_WGS_1984,采用栅格类型的数据格式。针对气象数据中的缺失数据,采用 SWATWeather 软件生成天气发生器(WXGEN)对气象数据进行插值填补。

本文利用 IDRISI17.0 软件中 CA-Markov 模型对流域 2030 年、2050 年土地利用空间格局进行预测,以 2000 年和 2010 年的土地利用数据为基础建立土地利用类型转移矩阵,构建土地利用类型适宜性图集,利用 CA-Markov 模型模拟得到流域 2020 年的土地利用数据,并采用 Kappa 系数对 2020 年土地利用数据模拟值与实测值进行检验。Kappa 系数常被用于检验土地利用变化模拟的精度^[21],公式如下:

$$\text{Kappa} = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (1)$$

式中: P_o 为正确模拟的栅格比例; P_c 为随机情况下正确模拟的栅格比例;1 为理想状况下正确模拟的栅格比例。初步模拟得到的 Kappa 系数为 0.88,模拟精度较高,表明预测与实测的土地利用类型存在良好的一致性。因此,本研究建立的 CA-Markov 模型可以用于模拟乌伦古河流域未来的土地利用变化。预测得到的 2030 年和 2050 年的土地利用类型见图 2,各期土地利用类型面积占比见表 2。

2.5 气候与土地利用变化情景设置

本文采用情景设置法设定不同的气候与土地利用变化情景(表 3)。 S_0 情景是基准情景,采用 2020 年的土地利用类型数据和 2011—2020 年的气候数据驱动模型。土地利用变化情景中的 2030 年和 2050 年土地利用数据是将 2020 年的土地利用作为初始状

态,按照自然发展情景模拟得到的结果,即采用 2010—2020 年的各土地利用类型的转移概率和面积矩阵,并添加高程、坡度等影响因子来约束不同土地利用类型的变化,得到土地利用类型转移的适应性图集,最后利用 CA-Markov 模型进行模拟。气候变化情景中的流域未来降水和气温数据是根据 1971—

2020 年降水、气温等系列数据,采用时间序列法对乌伦古河流域福海、富蕴、哈巴河、阿勒泰以及布克赛尔 5 个气象站点的降水、气温进行预测,选择与预测降水相近的年份作为典型年,并以典型年为基础采用同倍比缩放法进行换算,最后利用泰森多边形法得到流域面平均降水、气温数据。

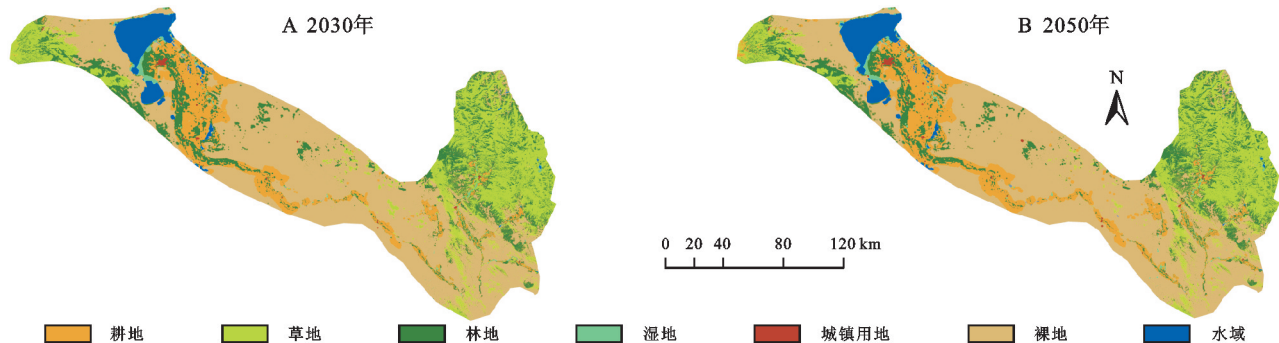


图 2 乌伦古河流域未来土地利用数据

Fig. 2 Future land use data of Ulungur River Basin

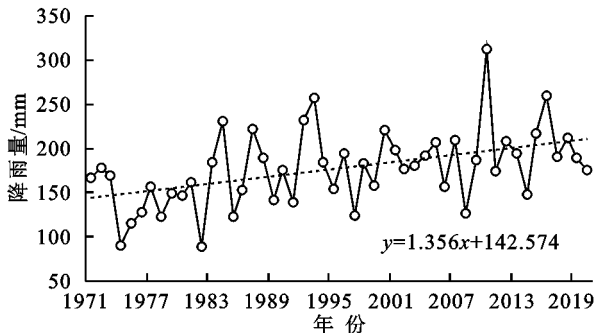
表 2 2010—2050 年乌伦古河流域土地利用类型面积占比

Table 2 Land use type area ratio for the Ulungu River Basin from 2010 to 2050 %				
土地利用类型	各期土地利用类型面积占比			
	2010 年	2020 年	2030 年	2050 年
耕地	5.26	6.53	9.14	11.21
草地	18.82	18.42	18.03	16.97
林地	12.14	12.44	16.93	18.86
湿地	0.26	0.44	0.83	0.97
城镇用地	0.11	0.15	0.20	0.30
裸地	59.09	57.51	50.77	48.19
水域	4.32	4.51	4.10	4.24

3 结果与分析

3.1 气候与土地利用变化特征分析

3.1.1 气候变化特征分析 乌伦古河流域 1971—2020 年的年均气温和降水量变化趋势如图 3 所示,



经分析可知该流域年平均气温呈现波动上升的趋势,增加速率为 0.41℃/10 a,多年平均降雨量为 177.31 mm,降雨量增加速率为 13.56 mm/10 a,说明 1971—2020 年乌伦古河流域气候变化朝暖湿化发展。本文进一步采用 Mann-kendall 突变检验方法对年均气温和降水进行了突变分析(图 4),发现降水和气温的突变点都出现在 20 世纪 90 年代,都发生“由少到多”突变,且气温突变点出现早于降水突变点。

表 3 气候与土地利用情景设置

Table 3 Climate and land use scenario setting	
情景	模型设置
S ₀	2020 年土地利用数据;2011—2020 年气候数据
S ₁	2030 年土地利用数据;2011—2020 年气候数据
S ₂	2050 年土地利用数据;2011—2020 年气候数据
S ₃	2020 年土地利用数据;2021—2050 年气候数据
S ₄	2030 年土地利用数据;2021—2050 年气候数据
S ₅	2050 年土地利用数据;2021—2050 年气候数据

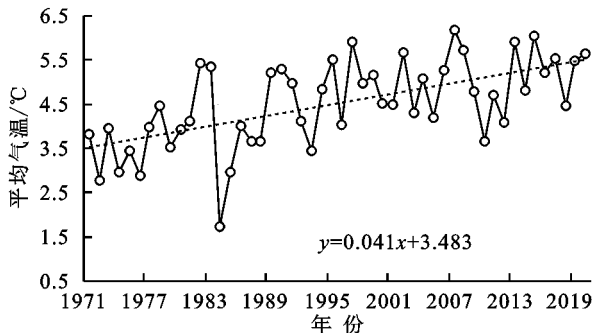


图 3 乌伦古河流域平均降水和气温年际变化趋势

Fig. 3 Interannual trends in mean precipitation and air temperature in the Ulungu River Basin

3.1.2 土地利用变化特征分析 2000—2020 年各土地利用类型面积变化如图 5 所示。在 2000—2020 年

期间,耕地面积变化最明显,由 951.08 km² 增加至 1 753.44 km²,增长率为 84.37%,其中由裸地转化成

耕地的面积最多,为 737.17 km²,其次为林地转化为耕地的面积,为 219.81 km²;草地面积有所减少,其中草地主要转化为林地与裸地。林地面积增加相对较少,但在 2000—2020 年期间林地与其他土地利用

类型之间的转化较为明显。

总体来看,2000—2020 年耕地面积增加最多,裸地面积持续减少,林地面积整体变化较小,但林地的变化幅度较大。

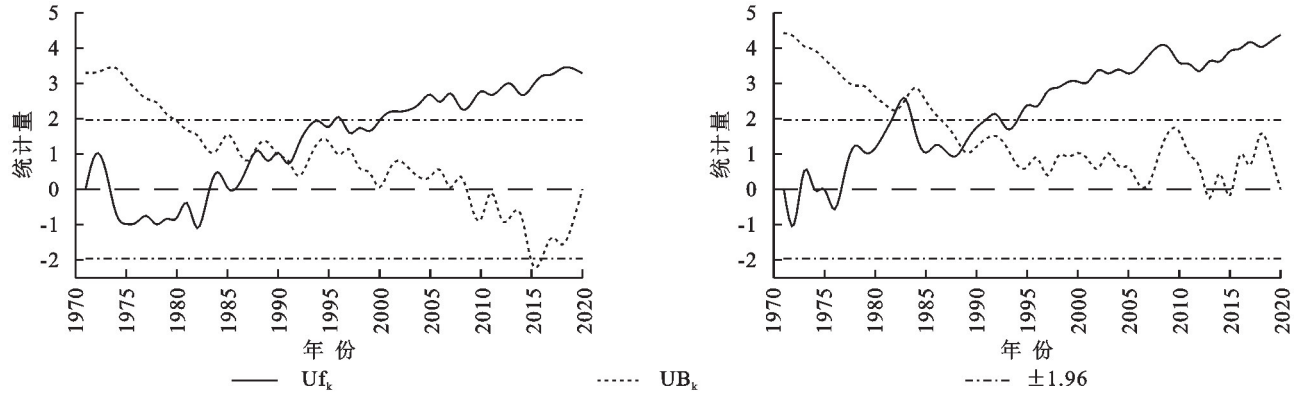


图 4 乌伦古河流域年平均降水和气温突变性分析

Fig. 4 Analysis of the abrupt variability of mean annual precipitation and air temperature in the Ulungu River Basin

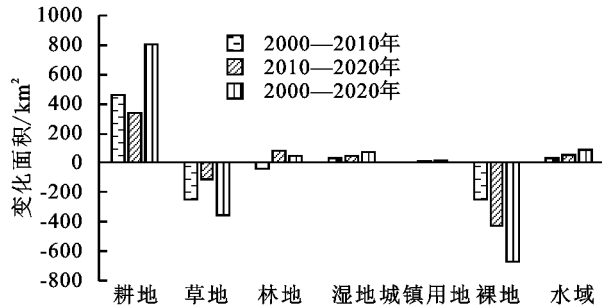


图 5 2000—2020 年各土地利用类型面积变化

Fig. 5 Change in area by land use type from 2000 to 2020

3.2 模型的率定与验证

本文初步选择 21 个和 13 个敏感性参数分别对

径流和总磷进行敏感性分析,得到 10 个对径流模拟结果影响较大的参数及 8 个对总磷模拟结果影响较大的参数。在对流域径流和总磷依次进行率定和验证后,对选取的参数进行调整,最终得到径流和总磷参数的取值范围与最优值见表 4。

由流域月径流量和总磷模拟精度结果可知(表 5 和图 6),率定期对月径流和总磷模拟的相关系数 R^2 分别为 0.77, 0.92, Nash 系数 E_{ns} 分别为 0.76, 0.87;验证期对月径流和总磷模拟的相关系数 R^2 分别为 0.83, 0.84, Nash 系数 E_{ns} 分别为 0.80, 0.81。这表明 SWAT 模型在乌伦古河流域径流和总磷的模拟具有较好的适用性。

表 4 径流和总磷最终参数取值范围与最优值

Table 4 Range of values and optimum values for final parameters of runoff and total phosphorus

	参数	含义	参数取值范围	参数最优取值
径流	R_CN2	SCS 径流曲线系数	-0.5~0.5	-0.01
	V_GWQMN	浅层水补给深	0~50	30.65
	R_SLSUBBSN	平均坡长因子	-0.8~0.8	-1.05
	R_HRU_SLP	坡度起伏因子	-0.8~0.8	-0.69
	V_ESCO	土壤蒸发补偿因子	0~1	1.19
	R_CANMX	最大冠层蓄水量	-0.5~0.5	-0.24
	R_SOL_AWC(1)	土壤层有效含水量	-1~1	1.17
	R_SOL_BD(1)	土壤湿容重(表层)	-0.5~0.8	0.51
	R_SOL_K(1)	土壤饱和导水率(表层)	-0.8~0.8	0.26
	V_RCHRG_DP	地下水含水层渗透系数	0~1	0.84
	V_PSP	磷吸附系数	0.01~0.7	0.49
	V_PHOSKD	土壤磷分配系数	100~200	137.45
	V_ERORGP	有机磷富集率	0~5	0.03
总磷	V_P_UPDIS	磷吸收分布	0~100	40.14
	V_SOL_ORGP(1)	表层土壤初始有机磷浓度	0~100	35.00
	R_USLE_P	USLE 方程中水土保持措施因子	-0.5~0.5	-0.21
	V_GWSOLP	可溶性磷浓度	0~1	0.51
	V_LAT_ORGP(1)	基流中的有机磷	0~1	0.30

表 5 月径流量和总磷模拟精度结果

Table 5 Simulation accuracy results for monthly runoff and total phosphorus

站点	率定期/验证期	R^2	E_{ns}
二台站	径流率定期(2012 年 1 月至 2018 年 12 月)	0.77	0.76
二台站	径流验证期(2019 年 1 月至 2020 年 12 月)	0.83	0.80
二台站	总磷率定期(2019 年 1 月至 2019 年 12 月)	0.92	0.87
二台站	总磷验证期(2020 年 1 月至 2020 年 12 月)	0.84	0.81

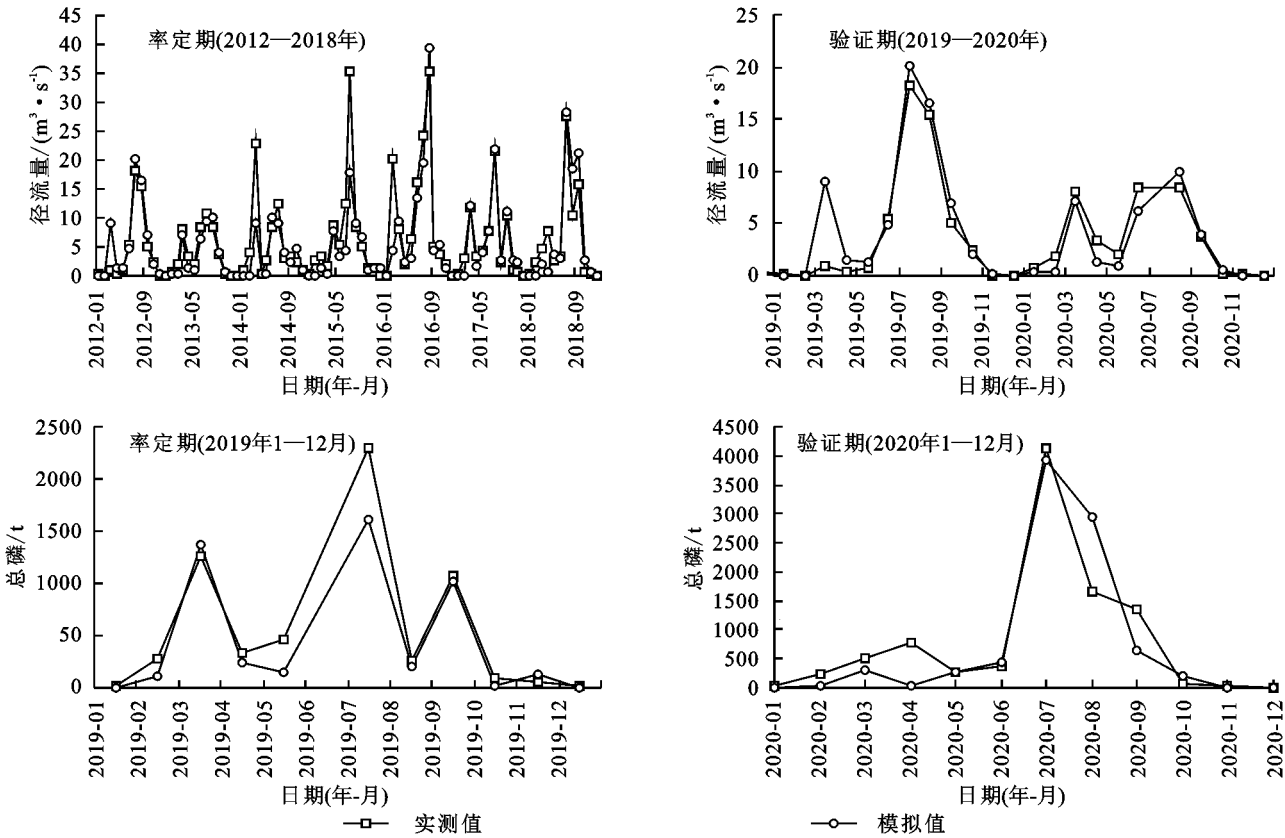


图 6 乌伦古河流域二台水文站径流及总磷率定期和验证期模拟结果

Fig. 6 Simulation results of calibration and validation period of runoff and total phosphorus in Ertai station in Ulungu River Basin

3.3 变化情景下流域径流模拟分析

3.3.1 气候变化对径流的影响 在 S_0 和 S_3 情景下的年均径流及在 S_3 情景下相对于基准情景径流的变化比例见表 6。 S_0 情景与 S_3 情景下年均径流量分别为 $34.37\text{ m}^3/\text{s}$, $42.75\text{ m}^3/\text{s}$, S_3 情景相对于 S_0 情景年均径流量上升了 $8.38\text{ m}^3/\text{s}$, 增幅为 24.38% 。将 S_0 与 S_3 情景下年内径流变化数据与年内降雨、气温变化数据进行整理, 得到两种情景下径流与降雨量、径流与平均气温的变化趋势图(图 7)。结果表明, 两种情景下径流的变化与降雨变化趋势趋于一致, 但与气温变化的一致性并不是很强, 且 1 月和 2 月 S_3 情景的平均气温高于 S_0 情景时, 径流却低于 S_0 情景, 观察降雨量可以发现 S_3 情景在 1 月和 2 月的降雨量低于 S_0 情景, 说明在土地利用保持不变的情况下, 流域降雨是造成径流变化的主导因素。因为河川径流的补给主要来自降水, 而气温通常通过使冰雪消融来补给高寒地区的径流^[22]。

3.3.2 土地利用变化对径流的影响 本文主要探讨

耕地、林地、草地及城镇用地的变化对径流的影响。由模拟结果可知(表 6), S_1 情景的年均径流量最小为 $29.33\text{ m}^3/\text{s}$, 相对 S_0 情景的径流下降了 $5.04\text{ m}^3/\text{s}$, 径流变化率为 -14.66% , 其次为 S_2 情景下年均径流为 $31.47\text{ m}^3/\text{s}$, 相对于 S_0 情景的径流也下降了 $2.9\text{ m}^3/\text{s}$, 径流变化率为 -8.44% 。 S_1 与 S_2 情景相对于 S_0 情景的径流均有所下降, 主要原因是 2030 年与 2050 年林地面积的增加量大于耕地、城镇用地面积的增加量与草地面积减少量之和, 从而导致径流量相比 S_0 情景有所减少。 S_2 情景下模拟的径流多于 S_1 情景, 通过分析发现与 2020 年相比 2050 年林地面积虽有所增加, 但其相对于 2030 年的增加量占比较少, 有更多的裸地转化成了耕地和建设用地, 耕地、城镇用地面积的增加量与草地面积的减少量之和相比 2030 年占比较多, 进而导致 S_2 情景的径流量多于 S_1 情景的径流量, 但也可能受到土地利用预测与 SWAT 模型模拟过程中模型计算的不确定性带来的影响。由于耕地的

产流能力强,其面积增多在一定程度上会增加径流^[23-24],主要由于人类耕作活动会增加土壤的紧实度,从而导致耕地地表径流较大,地下径流及土壤水的流动较小。城镇用地比耕地对径流的增加作用更明显,因为不透水面增加使土壤的下渗能力降低,且城市的调蓄能力较弱,因此城镇用地面积的增多会加快径流的汇流速度。林地、草地对径流的作用与耕地、城镇用地相反,它们对径流有一定的减少作用,因为林地、草地能够涵养水源和保持水土,林地、草地植物的截留作用较明显,会增加冠层水分的截留与蒸发,使下渗水量增大,地表径流的水量减少^[25]。

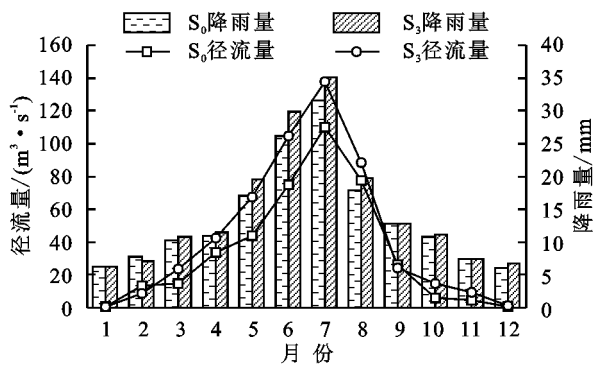


图7 S_0 和 S_3 情景下年内径流与降雨、平均气温的变化趋势图

Fig. 7 Trends in intra-annual runoff versus rainfall and intra-annual runoff versus mean temperature for S_0 and S_3 scenarios

3.3.3 气候与土地利用共同变化对径流的影响 综合气候与土地利用变化,由表6可知, S_4 与 S_5 的径流量分别上升 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$, $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$,径流变化率分别为 0.64% , 14.95% 。因径流变化与乌伦古河流域土地利用变化呈负相关,而与气候变化呈正相关,两种因素对径流的影响趋向于单个影响因素的中和,但 S_4 (S_5)情景下的径流量变化并不等于 S_1 与 S_3 (S_2 与 S_3)情景下的径流变化之和,因此两种因素对径流的共同影响并不是单个因素的简单叠加,而是呈现非线性的影响。气候变化对径流的影响占主要地位,特别是降雨量增加会弱化土地利用变化对产流的影响。

3.4 变化情景下流域总磷模拟分析

3.4.1 气候变化对总磷的影响 对 S_0 , S_3 气候变化情景下年均总磷负荷与总磷变化率的模拟结果见表7。在未来气候变化下,乌伦古河流域 S_3 情景产生的总磷负荷为 8566.26 t ,较基准期总磷负荷增加 17.63% 。增加的原因主要是乌伦古河流域气候变化呈现暖湿趋势,降雨量增加导致更多的总磷进入地表径流。将 S_0 情景与 S_3 情景的总磷月负荷分别与降水、气温进行相关分析,得到总磷月负荷和月降水量呈现正相关,不同情景下两者的相关系数达到 $0.982\sim 0.987$,与气温的相关系数 $0.751\sim 0.781$,小于总磷负荷与降水之间的相关系数,说明降水对总磷负荷的影响更大。

表6 各情景下年均径流量与径流变化率

Table 6 Average annual runoff volume and rate of change in runoff for each scenario

情景	年均径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流变化率/%
S_0	34.37	—
S_1	29.33	-14.66
S_2	31.47	-8.44
S_3	42.75	24.38
S_4	34.59	0.64
S_5	39.51	14.95

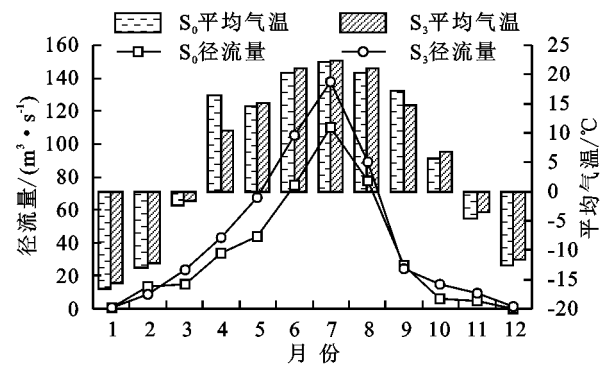


表7 各情景下年均总磷负荷与总磷变化率

Table 7 Average annual total phosphorus load and rate of change of total phosphorus under each scenario

情景	年均总磷/t	总磷变化率/%
S_0	7365.91	—
S_1	5897.60	-19.93
S_2	6808.24	-9.46
S_3	8566.26	17.63
S_4	6471.41	-10.44
S_5	7373.32	0.11

3.4.2 土地利用变化对总磷的影响 土地利用变化对总磷负荷的影响通常是通过改变产流和产沙能力来实现的^[26]。 S_1 , S_2 情景下模拟得到的总磷负荷均低于基准期总磷负荷, S_1 情景下的总磷负荷为 5897.6 t ,减少了 1468.31 t ,降幅为 19.93% , S_2 情景下的总磷负荷略高于 S_1 ,为 6808.24 t ,相对于 S_0 情景下降了 557.67 t ,降幅为 9.46% 。根据前期对土地利用变化对径流影响的分析可知, S_1 和 S_2 情景相对于 S_0 情景下的径流量有所减少,这与两种情景下的总磷负荷相比 S_0 情景有所下降相对应。

从空间分布上来看, S_0 , S_1 , S_2 三种情景下模拟得到的乌伦古河流域年均单位面积总磷负荷的空间分布特征差距较小(图8)。所有子流域年均单位面积总磷负荷为 $0.014\sim 48.43 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,总体上流域上游地区总

磷负荷低于下游地区。通过分析基准情景 S_0 的单位面积总磷负荷空间分布特征,得到 1 号子流域输出量最大,为 $6.74 \sim 48.43 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,主要因为该区域分布着大量的畜禽养殖场且位于流域下游末端,上游的负荷随着径流部分汇聚到该区域导致总磷负荷较大;子流域 15,19 次之,其单位面积总磷负荷输出量为 $1.08 \sim 6.74 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,子流域 21,23 相对次之,单位面积总磷负荷输出量为 $0.74 \sim 1.08 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;子流域 7,12,14,24 输出量更小,为 $0.34 \sim 0.74 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;子流域 9,17,20 更次之,为 $0.11 \sim 0.34 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;子流域 2,3,4,5,6,8,10,11,13,16,18,22 单位面积总磷负荷最小,为 $0.01 \sim 0.11 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

当 S_0 情景变为 S_1 情景时,乌伦古河流域单位面积总磷负荷输出量最大的区域依然是 1 号子流域,但较基准情景下其总磷负荷有所降低。这主要由于流域 2030 年林地面积的增加量大于耕地面积的增加量,且林地具有保持水土、抑制径流形成和减少泥沙输送等水文生态功能。 S_1 情景下 12 号与 24 号子流域的单位面积总磷负荷量均有所下降,因为较多的土地利用类型转换为林地与草地,使它们的总磷负荷降低。当 S_0 变为 S_2 情景时,1 号子流域总磷负荷量依然有所下降,但各子流域年均单位面积总磷负荷差异不大,保持在一个稳定的范围, S_2 情景整体的总磷负荷低于基准情景。

3.4.3 气候与土地利用共同变化对总磷的影响 综合气候与土地利用变化的影响得到年均总磷负荷与总磷变化率见表 7。 S_1 情景的年均总磷负荷为 6 471.41 t,下降 894.5 t,降幅为 10.44%, S_2 情景的年均总磷负荷为 7 373.32 t,与基准情景相比有所上升,涨幅为 0.11%。 S_4 情景降雨量增加,但 2030 年与 2020 年土地利用相比,林地增加面积远大于耕地和城镇用地增加面积与草地减少面积之和,导致其年均总磷负荷相对 S_0 情景有所下降。与 S_0 情景相比, S_5 情景下的林地面积增加量较大,但接近于耕地和城镇用地面积增加量与草地面积减少量之和,因此降雨量增加对年均总磷负荷增加的影响中中和了林地面积增加对总磷负荷减少的影响。两种情景下模拟得到的乌伦古河流域年均单位面积总磷负荷的空间分布图如图 8 所示。当 S_0 情景变为 S_4 , S_5 时,1 号子流域仍然是单位面积总磷负荷输出量最大的区域, S_4 , S_5 情景总体相对于基准情景变化不大。但 S_5 情景下的 17 号和 23 号子流域的年均单位面积总磷负荷相比 S_0 情景有所上升,主要原因是 2050 年相比 2020 年 17 号和 23 号子流域的耕地面积增加显著,同时降雨量相对 S_0 情景也有所增加,农田中的总磷随降雨径流流出,导致这两个子流域的单位面积总磷负荷输出量上升。

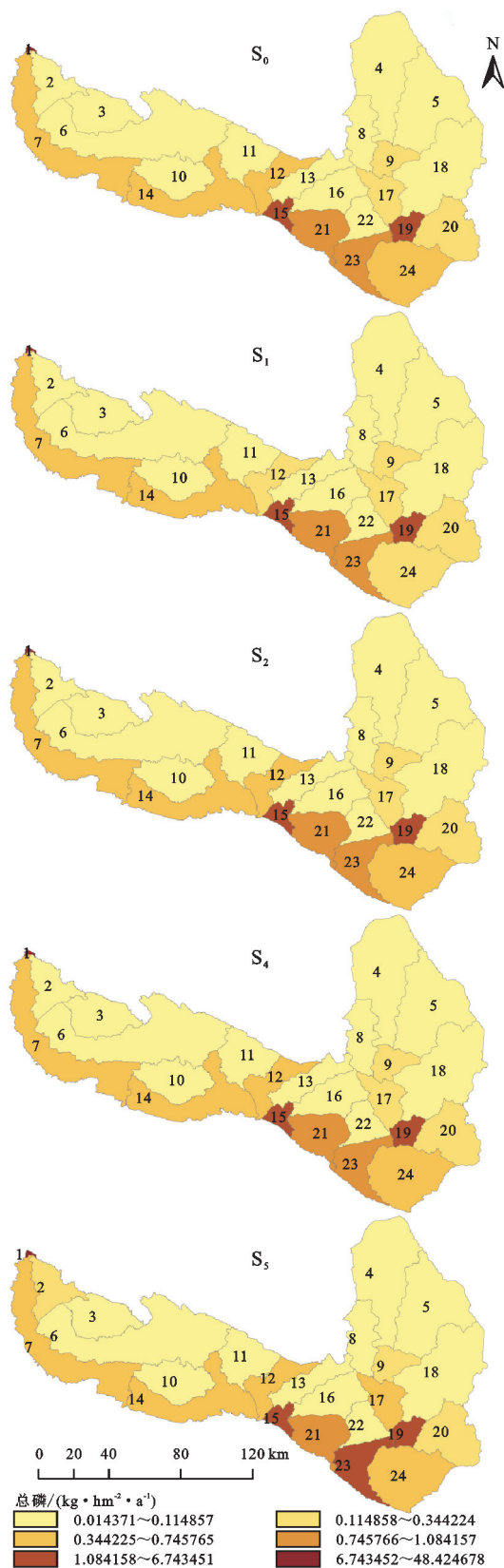


图 8 S_0 , S_1 , S_2 , S_4 和 S_5 情景下年均单位面积总磷负荷输出空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of annual average total phosphorus load output per unit area under S_0 , S_1 , S_2 , S_4 and S_5 scenarios

经分析可知,乌伦古河流域的总磷负荷对土地利

用变化的响应呈负相关,而总磷负荷对气候变化的响应呈正相关,但两种因素对总磷的影响并不是单个因素影响的直接相加,而是存在非线性相关,且土地利用变化对总磷负荷的影响更明显。虽然气候变化会导致流域总磷负荷增加,但其不良影响在一定的程度上可以通过土地利用规划和其他面源污染削减措施进行抵消。

4 结论

(1) 构建的 SWAT 模型在乌伦古河流域径流和总磷模拟中有很好的适用性,月径流模拟率定期和验证期的 R^2 , E_{ns} 均达到 0.75 以上,总磷模拟率定期和验证期的 R^2 , E_{ns} 均达到 0.8 以上。

(2) 气候变化情景下,降水是驱动径流和总磷负荷变化的主要因素。土地利用变化情景下,耕地和城镇面积增加导致年均径流增加,且城镇用地增加径流的作用更明显,林地和草地增加导致年均径流减少。林地面积增加使流域总磷负荷减少,耕地面积增加导致总磷负荷增加,由于林地面积增加量大于耕地面积,因此土地利用变化最终导致年均总磷负荷下降。

(3) 在气候和土地利用变化综合影响下, S_4 情景与 S_5 情景的径流量分别上升 $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$, $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$, S_4 情景年均总磷负荷下降 894.5 t, S_5 情景增加了 7.41 t,所有子流域年均单位面积总磷负荷为 $0.014 \sim 48.43 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。1 号子流域单位面积总磷负荷最大,未来需对该区域面源污染进行重点防控,特别是畜禽养殖和农田径流这两类污染源。

(4) 乌伦古河流域径流对气候变化的响应更敏感,总磷负荷受土地利用变化的影响更明显。在对未来径流与总磷负荷的预估中,需同时考虑气候与土地利用变化的影响。本文没有具体量化相关要素的贡献率,在今后的研究中可增加相关要素对径流及面源污染负荷贡献率的量化分析,并采用更高精度的数据和方法预估未来的气候以提高对水文水质的模拟精度,在设置土地利用变化情景时需结合当地情况和政策考虑更多的限制和影响因素,使模拟结果更贴近现实情况。

致谢:此研究受国家“山水林田湖草”生态保护修复工程项目(HNS-QR-022)、国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(4220104004)及国家自然科学基金项目(42377337)资助,在此表示衷心的感谢!真诚感谢匿名审稿人为提高本稿件质量提出的宝贵意见和建议!

参考文献(References):

[1] Pan Z K, Liu P, Gao S D, et al. Improving hydrological projection performance under contrasting climatic condi-

tions using spatial coherence through a hierarchical Bayesian regression framework [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(8): 3405-3421.

[2] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.

Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790.

[3] 梁国付,丁圣彦.气候和土地利用变化对径流变化影响研究:以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学,2012,32(5):635-640.

Liang G F, Ding S Y. The impacts of climate and landuse changes on the runoff effects: Case in the upper reaches of the Yihe River, the yiluo river basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 635-640.

[4] 王浩,贾仰文,杨贵羽,等.海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J].科学通报,2013,58(12):1064-1077.

Wang H, Jia Y W, Yang G Y, et al. Integrated simulation of the dualistic water cycle and its associated processes in the Haihe River Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1064-1077.

[5] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J].气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.

Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview [J]. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 483-493.

[6] 张红丽,韩富强,张良,等.西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J].干旱区研究,2023,40(4):517-531.

Zhang H L, Han F Q, Zhang L, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(4): 517-531.

[7] 杜懿,王大刚,祝金鑫.基于 CMIP5 的中国西北地区暖湿化演变研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):61-69,77.

Du Y, Wang D G, Zhu J X. Study on warming and humidification evolution in Northwest China based on CMIP5 [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(5): 61-69, 77.

[8] Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113-127.

[9] 徐伟.乌伦古河流域非点源污染负荷估算探讨[J].能源与节能,2021(1):91-92,125.

Xu W. Discussion on estimation of non-point source pollution load in ulungur river basin [J]. *Energy and Energy*

- Conservation, 2021(1):91-92,125.
- [10] 邵芳霞. 乌伦古河流域水资源保护和治理措施研究[J]. 水电与新能源, 2019, 33(11):48-50.
- Shao F X. On the water resources protection and treatment measures of ulungur river basin[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(11):48-50.
- [11] Volk M, Bosch D, Nangia V, et al. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale[J]. Agricultural Water Management, 2016, 175:1-3.
- [12] Luo Y Z, Zhang M H. Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(12):3370-3378.
- [13] Tamm O, Maasikamäe S, Padari A, et al. Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea Region using the SWAT model[J]. Catena, 2018, 167:78-89.
- [14] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4):62-67, 74.
- Wang Y R, Ding W F, Zhang G H. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang watershed based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4):62-67, 74.
- [15] 邹凯波, 张玉虎, 刘晓伟, 等. 气候变化下乌伦古河流域农业面源污染负荷响应[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2):625-637.
- Zou K B, Zhang Y H, Liu X W, et al. Response of agricultural nonpoint source pollution load in the Ulungur River Basin under climate change [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2):625-637.
- [16] 汪飞, 洪林, 马田遥, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化条件下诺敏河流域径流变化研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6):67-77.
- Wang F, Hong L, Ma T Y, et al. Study on runoff change of Nuomin River Basin under climate change conditions based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6):67-77.
- [17] 周凡, 李涵, 刘瑞芬. 未来气候变化及土地利用情景下清水河流域径流模拟[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9):11-14, 102.
- Zhou F, Li H, Liu R F. Runoff simulation of Qingshui River Basin under future climate change and land use scenarios[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(9):11-14, 102.
- [18] 董立俊, 董晓华, 魏冲, 等. 土地利用变化对雅砻江流域水文极值的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(4):13-21.
- Dong L J, Dong X H, Wei C, et al. Research on the impact of LUCC on hydrological extremum in yalong river basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4):13-21.
- [19] Yin J, He F, Xiong Y J, et al. Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in Northwest China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1):183-196.
- [20] Agarwal C, Green G L, Grove J, et al. A Review and Assessment of Land Use Change Models dynamics of space, time, and human choice [R]. Newtown Square, Pa, Usa; Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2002.
- [21] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11):2307-2318.
- Tian J, Guo S L, Liu D D, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11):2307-2318.
- [22] Yang L S, Feng Q, Yin Z L, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(20):3592.
- [23] 杨妮娟, 王晓云, 李建柱, 等. 桃林口水库流域氮磷污染负荷对土地利用的响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(5):61-69, 79.
- Yang N J, Wang X Y, Li J Z, et al. Response of nitrogen and phosphorus pollution load to different land use patterns in Taolinkou Reservoir Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(5):61-69, 79.
- [24] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江流域土地利用/覆被变化的径流响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4):167-175.
- Cao C, Sun R, Wu Z X, et al. Responses of stream-flow to land use/cover changes in nandu river basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4):167-175.
- [25] 田皓予, 佟玲, 余国安, 等. 不同空间尺度河流水质与土地利用关系分析: 以泰国蒙河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9):2036-2047.
- Tian H Y, Tong L, Yu G A, et al. Relationship between water quality and land use at different spatial scales: A case study of the Mun River Basin, Thailand [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(9):2036-2047.
- [26] 张招招, 程军蕊, 毕军鹏, 等. 甬江流域土地利用方式对面源磷污染的影响: 基于 SWAT 模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3):650-658.
- Zhang Z Z, Cheng J R, Bi J P, et al. Impact of land use on non-point sources of phosphorus in the Yong River Basin: SWAT model analysis [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3):650-658.