

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200020

基于 SWAT 模型的妫水河流域径流空间分布特征

安 晨^{1,2}, 方海燕^{1,2}

(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院重点实验室,北京 100101;
2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘 要:水资源短缺已成为全球性的环境问题,妫水河作为官厅水库的主要入库河流,其径流量会对库区产生直接影响,研究其径流空间分布特征具有重要的理论和现实意义。以妫水河流域为研究对象,基于 2006~2016 年的气象和水文数据,使用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型,研究该流域的径流空间分布特征。结果表明:(1)SWAT 模型模拟结果为 $R^2=0.62$, $E_{ns}=0.61$,校准期和验证期结果均满足 $R^2>0.60$, $E_{ns}>0.50$ 。(2)流域内径流量分布呈现东西两侧大、中间小的规律,与地势两侧高中间低、坡度和降雨两侧大中间小的规律相符,林地产流较大。(3)径流深最大的子流域位于流域上游的东北部,降雨量大,坡度大,林地为主。径流深最小的子流域位于流域中部,降雨量小,耕地为主,地势平坦。流域内径流空间分布受坡度和降雨的影响较大;该模型在妫水河流域的水文模拟效果较好,未来可以此模型为基础进一步研究该流域的产沙和污染物空间分布特征。

关键词:SWAT;妫水河;径流量;空间分布

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2021)04-0081-07

0 引言

随着 21 世纪经济和社会的快速发展,人口密度不断增加,全世界都面临着水资源短缺问题,受气候变化和人类活动的共同影响,许多河流的径流量发生了明显地改变,严重威胁着区域的水资源状况^[1]。Milliman 等^[2]指出 20 世纪后期,由于人类活动的影响,全球大部分中纬度河流径流量减少了 60%。河川径流是组成水资源的重要部分,其空间变化特征是研究流域水资源特性和空间分配的基础。国内外研究者对湄公河^[3]、黄河^[4]、三江源^[5]、叶尔羌河^[6]等诸多河流进行了径流时间和空间演变分析。在北京地区,作为第一水源地的密云水库上游潮河和白河流域的径流空间分布得到诸多深入研究^[7-8]。

官厅水库是北京市第二大水库,最大库容 $41.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,地处河北怀来县和北京延庆县之间,妫水河是官厅水库主要的入库河流,其水量和水质都会对库区产生直接影响。20 世纪 90 年代,水库遭受严重污染,水质恶

化,1997 年官厅水库曾因富营养化严重,被迫退出北京饮用水源,只作为灌溉、工业用水和城市河湖补给。然而,北京市用水形势严峻,自 2004 年开始使用黑土洼人工湿地净水,可削减 14% 的永定河入库污染物,随着水质不断提升,2007 年官厅水库恢复了水源地功能,成为京西城乡居民生产、生活用水的重要来源。近年来,由于人口增加、经济发展与人类活动增强,水资源的供需矛盾日渐突出,妫水河流域的入库水量更应引起研究者的广泛关注。目前针对官厅水库上游的研究相对较少,现有研究主要集中在水文模拟^[9]、水生动植物对水质的影响、非点源污染^[10]和生态净化^[11]等问题上,流域的径流空间分布特征有待深入探讨。

水文模型是开展流域非点源污染物模拟和关键源区识别的重要手段,曾有研究者利用 HSPF (The Hydrological Simulation Program-FORTRAN) 模型时空数据库^[12]或 Thornthwaite 水文模型^[13]研究妫水河流域的水文过程。其中,SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型作为分布式水文模型,以其诸多

收稿日期:2020-02-15

基金项目:北京市自然科学基金资助项目“密云水库上游流域板栗林下水土流失对入库水质的影响”(8202045)

作者简介:安晨(1996—),女,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:604379821@qq.com

通信作者:方海燕(1977—),男,山东济宁人,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的工作。E-mail:fanghy@igsrr.ac.cn

优点在不同国家和地区的产流产沙和污染物输移方面得到广泛应用^[14]。SWAT 模型适用于具有不同的土壤类型、土地利用方式和管理条件下的复杂大流域,可将大流域划分为多个子流域,同时具备运算效率高、时间连续、易于获取数据源等优点,且能在资料缺乏的地区建模^[15]。因此,本文以官厅水库上游的妫水河流域为研究对象,利用 2006~2016 年的径流和气象数据构建 SWAT 径流模型,分析径流空间分布特征,为区域水资源规划和管理提供理论依据。研究流域内的径流空间分布特征,对研究水库上游的非点源污染特征、水质安全和防治水土流失也具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

妫水河流域地处北京市延庆区,属海河流域永定河水系,地势东北高、西南低,东、南、北三面环山,河流穿过延庆山间盆地向西汇入官厅水库(见图 1a),其自东向西的流向在我国西高东低的地形下显得尤为特别,有“首都西北大门”之称。本文选取延庆东大桥水文站以上流域为研究区,集水面积 738.70 km²,位于北纬 40°22′23″N~40°38′27″N,东经 115°49′3″E~116°20′32″E,海拔 475~2 218 m,地势平缓。

该研究区为大陆性季风气候,冬季盛行偏北风,寒冷干燥,夏季盛行偏南风,炎热多雨,雨热同期,春季干燥多风,秋季冷暖适宜^[16]。研究区年均气温 10.4℃,年均降水量 474.03 mm,主要集中在 6~9 月,占全年降水量的 58.00%~90.20%。土地利用类型以耕地和林地为主(见图 1b),植物资源较丰富,乔木树种多为油松、侧

柏、栓皮栎等,灌木树种多为三裂叶绣线菊、荆条、山杏等。土壤类型以褐土为主,西北部山区多为棕壤,潮土主要分布于妫水河及官厅水库沿岸。

1.2 数据来源

本次研究使用 2006~2016 年的气象数据、数字高程图、土地利用图、土壤类型图、水文数据等,采用 SWAT 模型,研究流域径流量的空间分布特征。具体数据特征和来源见表 1。

1.3 SWAT 模型建立

SWAT 模型是一个半分布式水文模型,基于 DEM 数据和河网分布,将大流域划分成多个子流域,以相对均质的水文响应单元(HRU)为模拟单元精确地模拟复杂流域中的径流、泥沙、氮-磷等产出量,累计到子流域,并能预测土地利用变化、土地管理措施和气候条件变化对产出量的影响^[17]。

本次建立 SWAT 的气象数据时间序列是 2006~2016 年,土地利用数据为 2015 年。首先将所用到的空间数据统一转换为 Krasovsky_1940_Albers 投影。以延庆东大桥水文站作为妫水河流域的出口,汇水面积 738.70 km²,SWAT 模型将流域自动划分成 43 个子流域(见图 2),流域出口在第 36 号子流域。SWAT 模型根据模型提供的土地利用数据库和土壤类型数据库建立起土地利用索引表和土壤类型索引表,再对其进行重分类(见表 2)。利用数字高程图将坡度划分为 ≤5°,5°~8°,8°~15°,15°~25°,≥25°五个等级(见图 1a)。本次建模设置 2006 年为缓冲年,即 NYSKIP 为 1,输出选择 monthly 建立月尺度模型。

本研究利用 SWAT-cup (SWAT-Calibration and

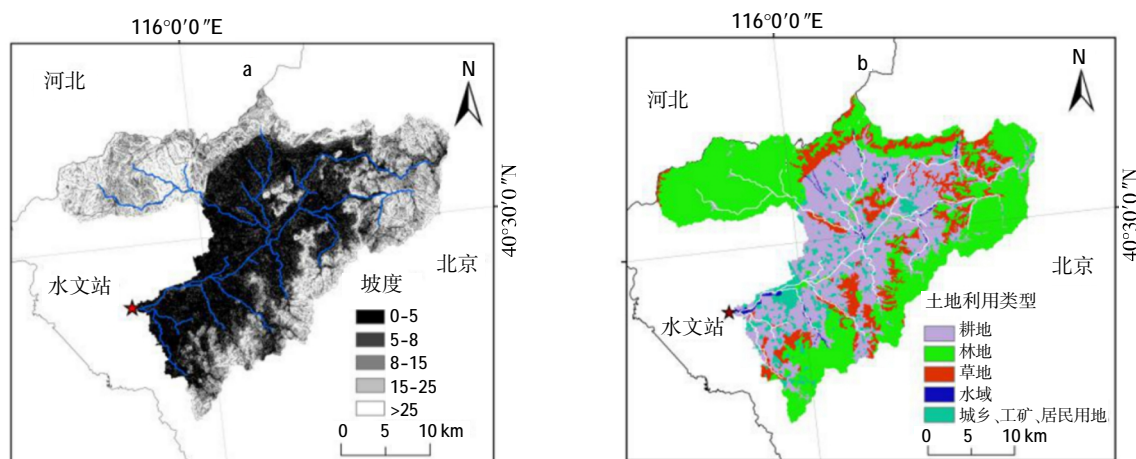


图 1 妫水河流域(a)地理位置和(b)土地利用

Fig.1 The geographical location (a) and land use (b) of the Guishui River basin

Uncertainty Programs)2012 软件的 SUFI-2 算法^[18]和 2007~2016 年的水文站 120 个月径流数据对构建的 SWAT 模型进行参数敏感性分析,模型校准和验证。参考已有研究者基于 SWAT 模型对北方流域的相关研究^[18-19,19-20],结合妣水河流域的特征,选取初始参数,参数的初始范围设置为模型给定的最大范围。按照所建模型的实际情况完成所有参数设定,开始进行 100、200、500 次迭代,模型运行结束后输出最优一次的结果,由 p-factor,r-factor, 相关系数 R² 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{ns} 的值来判断, 根据运行结果中输出的参数敏感性分析和最佳参数范围推荐, 进行参数的删减或范围修改^[21]。本研究选取相关系数 R²、Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 和标准误差 RMSE 三个指标对 SWAT 模型在妣水河流域的适用性展开评价^[22]。肖军仓等^[23]认为, E_{ns}>0.50,R²>0.60 时,模拟效果令人满意。若指标满足要求,可继续进行下一步的校准验证;若不满足要求,则根据推荐参数范围调整参数起始范围,或增减参数,

再次运行,不断重复直到满足要求。另外,p-factor 的范围是 0~1,r-factor 的范围是 0~正无穷,理想情况是 p-factor 尽可能大,r-factor 尽可能小,但通常较大的 p-factor 会对应较大的 r-factor,因此要权衡二者的

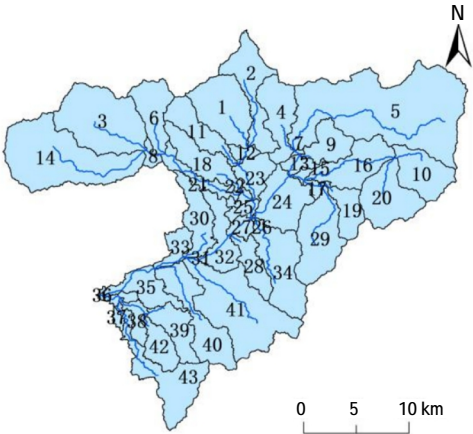


图2 妣水河流域子流域划分
Fig.2 The sub-basin division of the Guishui River basin

表1 数据特征和来源
Table1 The data characteristics and sources

数据名称	数据描述	数据来源
气象数据	2006~2016 年气象站点的逐日气象数据 (降雨量/mm、最高温/℃、最低温/℃、 相对湿度/1%、日照时数/h、风速/m·s ⁻¹)	中国气象数据网 http://data.cma.cn/user/toLogin.html
水文数据	2007~2016 年的妣水河延庆大桥水文站 (115.97°E,40.45°N)的月径流量	《海河流域水文资料,第 3 册.内陆河流域、海河、永定河水系》
数字高程图	高程、坡度(30m×30m)	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
土地利用类型图	2015 年土地利用/覆被空间分布(30m)	中国科学院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
土壤类型图	土壤空间分布图(1km)	中国科学院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/

表2 2015年妣水河流域土地利用类型
Table2 The types of land use in the Guishui River basin in 2015

编号	一级分类	二级分类	代码	面积/km ²	百分比/%
1	耕地	水田(11)旱地(12)	AGRL	276.87	33.85
2	林地	有林地(21)灌木林(22)疏林地(23)其他林地(24)	FRST	370.56	45.31
3	草地	高覆盖度次(31)中覆盖度草地(32)低覆盖度草地(33)	PAST	102.26	12.50
4	水域	河渠(41)湖泊(42)水库坑塘(43)永久性冰川雪地(44)滩涂(45)滩地(46)	WATR	7.33	0.90
5	城乡、工矿、居民用地	城镇用地(51)农村居民点(52)其它建设用地(53)	URML	60.83	7.44

大小。

此次模型参数率定后的最佳结果为 $R^2=0.62$, Nash-Sutcliffe 系数 $E_{ns}=0.61$, p -factor=0.31, r -factor=0.26, 模拟值小于实测值, 分别为 $0.27\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.28\text{m}^3/\text{s}$, 最终得到的 14 个最佳敏感性参数值见表 3。在此模型中, GW_DELAY.gw (地下水滞后系数) 和 TLAPS.sub (气温直减率) 的参数敏感性最高, 刘昭等^[9]的研究也强调了 GW_DELAY.gw (地下水滞后系数) 对妣水河流域径流模型的重要性。相关系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 和标准误差 RMSE 的计算公式^[9]如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})(S_i - S_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - S_{avg})^2} \quad (1)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (3)$$

式中: N 为数据个数; O 为实测径流量; O_{avg} 为实测径流量的平均值; S 为模拟径流量; S_{avg} 为模拟径流量的平均值, 单位均为 m^3/s 。 R^2 越接近 1, 表明模拟值与实测值的变化趋势越一致; E_{ns} 越接近 1, 表明模拟值越接近实测值; $RMSE$ 越接近 0, 表明模拟值越符合实

测值。

2 结果与分析

2.1 模型校准和验证

在进行妣水河流域的 SWAT 模型校准验证时, 将 2006 年作为预热期, 以降低初始条件的影响, 在具体分析计算时不采用, 2007~2013 年作为校准期, 2014~2016 年作为验证期。运用公式(1)、(2)进行月径流模型的校准验证, 校准和验证结果见表 4 和图 3。校准期的实测径流量小于验证期的实测径流量, 2014 年后该流域的径流量出现增大趋势。其中, 校准期的结果为 $R^2=0.61$, $E_{ns}=0.52$, $RMSE=0.01$, 模拟值小于实测值, 分别为 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.27\text{m}^3/\text{s}$; 验证期的结果为 $R^2=0.68$, $E_{ns}=0.64$, $RMSE=0.04$, 模拟值大于实测值, 分别为 $0.31\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.29\text{m}^3/\text{s}$ 。上述结果均满足肖军仓^[23]的评价标准, 说明经过参数率定后的 SWAT 模型, 在妣水河流域具备良好的适用性。

2.2 妣水河流域径流空间分布

妣水河流域 2007~2016 年的多年平均径流深为

表4 月径流模拟结果

Table4 The simulation results of monthly runoff

	月均实测值 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	月均模拟值 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	R^2	E_{ns}	RMSE
校准期	0.27	0.25	0.61	0.52	0.01
验证期	0.29	0.31	0.68	0.64	0.04

表3 参数敏感性分析结果

Table3 The analysis results of parameter sensitivity

参数名称	参数定义	初始值范围	最适值	P-Value
r_CN2.mgt	径流曲线系数	[-0.80,0.80]	-0.58	0.18
v_GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	[0,500]	421.81	1
v_GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	[0,5 000]	3 461.82	0.49
v_GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	[0.02,0.20]	0.19	0.83
v_CH_N2.rte	河道曼宁系数	[-0.01,0.30]	0.03	0.50
r_SOL_K().sol	土壤饱和水力传导系数	[-0.80,0.80]	-0.78	0.25
r_SOL_BD().sol	土壤湿密度	[-0.60,0.50]	-0.32	0.67
v_ALPHA_BF.gw	基流消退系数	[0,1]	0.72	0.49
v_CANMX.hru	最大蓄水量	[0,100]	86.21	0.96
v_REVAPMN.gw	浅层地下水再蒸发系数	[0,500]	6.03	0.85
v_OV_N.hru	坡面漫流曼宁系数	[0.01,30]	0.09	0.62
v_PLAPS.sub	降水递减率	[-1 000,1 000]	-751.36	0.82
v_SFTMP.bsn	降雪气温	[-20,20]	19.51	0.86
v_TLAPS.sub	气温直减率	[-10,10]	7.24	0.97

注: r_{-} 表示参数值被赋予原值的若干倍数; v_{-} 表示参数值被赋予给定值取代原始值; P -value 值越大, 代表参数越敏感。

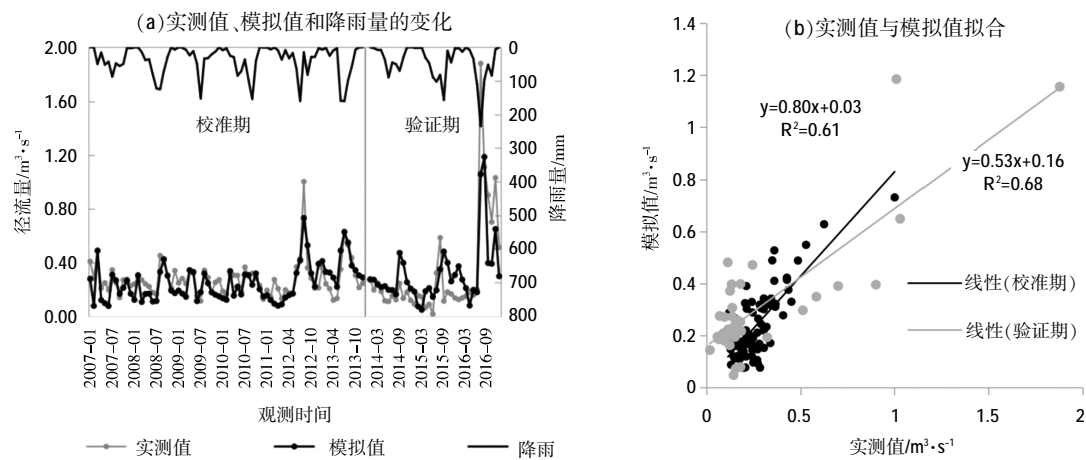


图 3 径流的校准和验证

Fig.3 The calibration and verification of runoff

8.43 mm,多年平均降雨量为 474.03 mm。根据率定后的 SWAT 模型,得到流域内 43 个子流域的多年平均径流深和降雨量(见图 4)。整体来看,流域两侧径流深较大,中部径流深较小,结合图 1 分析原因,流域两侧的高径流深是坡度大和降雨量大共同作用的结果。和继军等^[24]提出,在临界值下,坡面的产流产沙量均随坡度的增大而增大,流域两侧为山区,坡度多在 15°以上,另外,子流域的多年平均径流深和降雨量呈正相关关系,相关系数 $R=0.92$,从图 4 可看出东西两侧的降雨量比中部地区大。其中,子流域的降雨量范围在 421.29~606.47 mm 之间,年均降雨量>500 mm 的共 4 个子流域,分别是 5、10、16、20 号子流域,位于流域上游东北部。子流域的径流深范围在 0.33 ~53.36 mm 之

间,径流深>30 mm 的 4 个子流域与降雨量最大的 4 个子流域一致,径流深分别为 35.88mm、37.17mm、39.99mm、53.36mm。剩余 39 个子流域中,除 37 号子流域径流深达 18.44 mm 外,其他子流域的径流深均小于 10 mm。

该流域内耕地的径流深为 4.97mm,林地径流深为 16.65mm。通常,研究者们认为,林地的水土流失远小于耕地,林地能起到保持水土、涵养水源,减少水土流失的作用^[25],但也有研究者认为,林地尤其是经济林、纯林等人工林的水土流失同样严重^[26],袁正科等^[27]指出,在南方红壤区,尽管林地覆盖率在 50%以上,但林下缺少低矮的灌木或草本植被的覆盖,地表裸露度高,导致了中度甚至强烈以上的水土流失。降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度、坡长、生物和工程措施、耕作措施、土地利用压力等都是引起土壤侵蚀的因素。在该流域内,林地多分布在高程大、坡度大、雨量大的流域东西两侧,故径流量较大;耕地多位于流域中部 8°以下的平坦地区,并未引起较大的产流,且靠近居民生活区,用于生产生活的径流量消耗较大。

奶水河流域内多年平均径流深最大的是 10 号子流域,径流深 53.36 mm,降雨量 606.47 mm,位于流域上游东北部,地势偏高,符合奶水河水系由东北向西南流的特点。由表 5 可知,坡度在 15°以上的面积占流域的 72.90%,坡度在 25°以上的面积占流域的 35.30%,92.09%的流域面积为林地。10 号子流域的高产流量是雨量大、坡度大引起的,子流域内的林地未能起到明显的减水作用。径流深最小的是 7 号子流

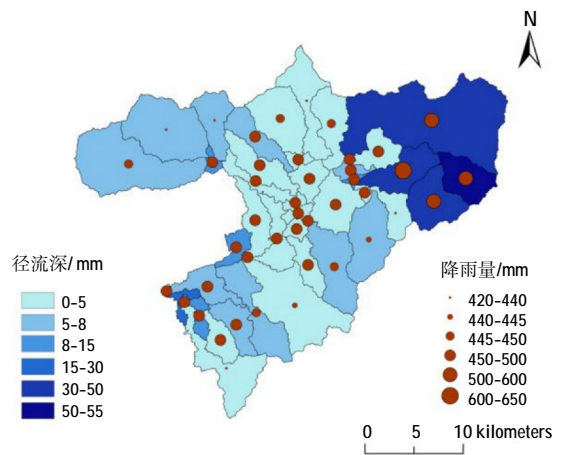


图 4 奶水河流域径流深和降雨量空间分布

Fig.4 The spatial distribution of runoff depth and precipitation in the Guishui River basin

表5 10号和7号子流域的各土地利用类型和不同坡度范围的面积占比

Table5 The proportion of different land use types and slope ranges area in No.10 and No.7 sub-basins

	不同土地利用类型的面积占比/%				不同坡度范围的面积占比/%				
	耕地	林地	草地	城乡、工矿、居民用地	0-5°	5°-8°	8°-15°	15°-25°	>25°
10 号	2.84	92.09	4.78	0.29	3.16	4.73	19.21	37.60	35.30
7 号	96.30	0	3.70	0	44.44	29.81	17.46	5.64	2.65

域,径流深 0.33 mm,降雨量 340.43 mm,位于流域中部。该子流域 74.25%的面积坡度在 8°以下,44.44%的面积坡度在 5°以下,96.30%的面积为耕地。

3 结论

本文基于 2006~2016 年的气象数据和延庆东大桥水文站的径流监测数据,利用 SWAT 模型,分析了位于官厅水库上游的妫水河流域的径流空间分布特征,主要结论如下:

(1) SWAT 径流模型的率定结果为 $R^2=0.62$, $E_n=0.61$,模拟值小于实测值,校准期 $R^2=0.61$, $E_n=0.52$,验证期 $R^2=0.68$, $E_n=0.64$,该模型在妫水河流域的水文模拟适用性较好。

(2) 妫水河流域内径流深分布呈现东西两侧大、中间小的规律,符合该流域地势两侧高中间低、坡度两侧大中间小的特征。

(3) 子流域的径流深与降雨量成正相关关系,径流深最大的子流域,位于流域上游的东北部,林地为主,降雨量大,坡度大,72.90%的面积在 15°以上。径流深最小的子流域,位于流域中部,耕地为主,降雨量小,坡度小,74.25%的面积在 8°以下,地势平坦。

在以后的研究中,可以此模型为基础,结合未来气象数据,进行妫水河流域未来几十年的月径流量预测,也可以进一步研究该流域的产沙和污染物空间分布特征。

参考文献:

- [1] Zhang Q, Singh V P, Sun P, et al. Precipitation and streamflow changes in China: changing patterns, causes and implications [J]. Journal of Hydrology, 2011,410(3):204-216.
- [2] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000 [J]. Global & Planetary Change, 2008,62(3-4).
- [3] 周婷,于福亮,李传哲,等. 1960—2005 年渭公河流域径流量演变趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010,38(6):608-613. (ZHOU Ting, YU Fuliang, LI Chuazhe, et al. Evolution trend of runoff in

Mekong River basin during 1960-2005 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(6):608-613. (in Chinese))

- [4] 张为彬, 查小春, 马玉改. 1961-2010 年黄河源区蓝绿水资源时空变化[J]. 水土保持通报, 2014,34(6):338-343. (ZHANG Weibin, ZHA Xiaochun, MA Yugai. Spatio-temporal change of blue water and green water resources in source region of Yellow River during 1961-2010 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(6):338-343. (in Chinese))
- [5] 朱海涛. 长江源区长序列径流变化规律及其与气象要素的关系分析[J]. 中国农学通报, 2019,35(22):123-129. (ZHU Haitao. Long sequence runoff in the source of the Yangtze River: variation law and its relationship with meteorological elements [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019,35(22):123-129. (in Chinese))
- [6] 李智超. 1954~2015 年新疆叶尔羌河径流变化特征[J]. 人民长江, 2019,50(S1):68-70+89. (LI Zhichao. Variation characteristics of runoff in the Yeerjing River, Xinjiang from 1954 to 2015 [J]. Yangtze River, 2019,50(S1):68-70+89. (in Chinese))
- [7] 章燕喃. 密云水库流域近三十年径流变化及归因分析[D]. 北京: 清华大学, 2014. (ZHANG Yannan. Attribution Analysis on the Change of Runoff in the Upstream of Miyun Reservoir during Last 30 Years [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese))
- [8] 郭军庭. 潮河流域土地利用/气候变化的水文响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. (GUO Juntao. Hydrological Responses to Land Use Change and Climate Variability in the Chaohu Watershed, Beijing, China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese))
- [9] 李谦, 张静, 宫辉力. 基于 SUFI-2 算法和 SWAT 模型的妫水河流域水文模拟及参数不确定性分析[J]. 水文, 2015,35(3):43-48. (LI Qian, ZHANG Jing, GONG Huili. Hydrological simulation and parameter uncertainty analysis using SWAT model based on SUFI-2 algorithm for Guishui River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2015,35(3):43-48. (in Chinese))
- [10] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 妫水河流域农耕地非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. 环境科学, 2008(1):32-37. (LI Qi, CHEN Liding, QI Xin, et al. Identification of critical area of phosphorus loss in agricultural areas of Guishui River watershed by phosphorus loss risk assessment [J]. Environmental Science, 2008(1):32-37. (in Chinese))
- [11] 马小伟. 妫水河下游植被与土壤因子关系的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009. (MA Xiaowei. The Research on the Relationship

- Vegetation and Edaphic Conditions in Lower Watershed of Guishui River [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009. (in Chinese))
- [12] 郭彬斌, 张静, 宫辉力, 等. 妣水河流域未来气候变化下的水文响应研究[J]. 人民黄河, 2014,36(1):48-51. (GUO Binbin, ZHANG Jing, GONG Huili, et al. Research on the hydrological responses to future climate change in Guishui River basin [J]. Yellow River, 2014,36(1):48-51. (in Chinese))
- [13] 许海丽, 潘云, 宫辉力, 等. 1959-2000 年妣水河流域气候变化与水文响应分析[J]. 水土保持研究, 2012,19(2):43-47. (XU Haili, PAN Yun, GONG Huili, et al. Analysis of the climate change and hydrological responses in Guishui River basin from 1959 to 2000 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(2): 43-47. (in Chinese))
- [14] Yan T, Bai J, Arsenio T, et al. Future climate change impacts on streamflow and nitrogen exports based on CMIP5 projection in the Miyun Reservoir basin, China [J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2019,19(2):266-278.
- [15] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004(2):22-26. (HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River basin, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences), 2004(2): 22-26. (in Chinese))
- [16] 刘玉明. 北京市妣水河流域人类活动的水文响应研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013. (LIU Yuming. Hydrological Response of Human Activities in the Guishui River Basin, Beijing [D]. Beijing: Capital Normal University, 2013. (in Chinese))
- [17] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(5):121-130. (ZHANG Yinhui. Development of study on model-SWAT and its application [J]. Progress in Geography, 2005,24(5): 121-130. (in Chinese))
- [18] 宋增芳, 曾建军, 金彦兆, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J]. 水土保持通报, 2016,36(5): 172-177. (SONG Zengfang, ZENG Jianjun, JIN Yanzhao, et al. Distributed simulation of monthly runoff using SWAT and SUFI-2 algorithm in Shiyang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(5):172-177. (in Chinese))
- [19] 刘昭, 赵树旗, 刘培斌, 等. 妣水河流域水文模拟及参数不确定性分析[J]. 水力发电, 2020,46(2):27-30+122. (LIU Zhao, ZHAO Shuqi, LIU Peibin, et al. Hydrological modeling and uncertainty analysis of parameters for Guishui River basin [J]. Water Power, 2020,46(2):27-30+122. (in Chinese))
- [20] 丁洋. 基于 SWAT 模型的妣水河流域非点源污染最佳管理措施研究[D]. 济南: 济南大学, 2019. (DING Yang. Research on Best Management Practices for Non-point Source Pollution in the Qinsui River Watershed Based on SWAT Model [D]. Jinan: University of Jinan, 2019. (in Chinese))
- [21] 李朝月, 方海燕. 基于 SWAT 模型的寿昌江流域产沙模拟及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2019,33(6):127-135+142. (LI Chaoyue, FANG Haiyan. Simulation of sediment yield and analysis of influencing factors in the Shouchang River basin on SWAT model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6):127-135+142. (in Chinese))
- [22] Pinaras V, Petalas C, Gikas G D, et al. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the soil and water assessment tool (SWAT) [J]. Desalination, 2010,250(1):274-286.
- [23] 肖军仓, 周文斌, 罗定贵, 等. 非点源污染模型—SWAT 用户应用指南[M]. 北京: 北京地质出版社, 2010. (XIAO Juncang, ZHOU Wenbin, LUO Dinggui, et al. User Guide of Non-point Source Pollution Modelling with SWAT [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [24] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2012,23(5):1263-1268. (HE Jijun, CAI Qiangguo, LIU Songbo. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(5):1263-1268. (in Chinese))
- [25] Rong -Gang Y U. Hydrological effects of soil and water conservation forest in red-soil erosion region [J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2007.
- [26] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018,32(4):119-125. (SONG Yuejun, HUANG Yanhe, YANG Jie, et al. The characteristics of soil and water loss in Pinus massoniana forest in red soil region of Jiangxi province and the effect of soil and water conservation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(4):119-125. (in Chinese))
- [27] 袁正科, 袁穗波, 姚敏, 等. 板栗复合经营模式的土壤流失规律[J]. 中国水土保持科学, 2005(4):115-118+123. (YUAN Zhengke, YUAN Suibo, YAO Min, et al. Law of soil loss at agro-forest ecosystem of Castanea mollissima [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005(4):115-118+123. (in Chinese))

(下转第 47 页)