

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.007.

王倩华, 张攀, 王伟, 等. 黄河中游典型流域土地利用对径流的调控作用[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 61-68, 78.

Wang Qianhua, Zhang Pan, Wang Wei, et al. Regulation of Land Use on Runoff in Typical Watersheds of the Middle Reaches of the Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 61-68, 78.

黄河中游典型流域土地利用对径流的调控作用

王倩华^{1,2}, 张攀², 王伟³, 肖培青², 吴晓玲¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210024; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院 水利部
黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003; 3. 河南省水土保持监测总站, 郑州 450008)

摘要: [目的] 深入研究黄河中游不同土地利用对径流变化的调节效应及其阈值, 对于山洪防治和流域高质量发展至关重要。[方法] 以大理河流域为重点研究区域, 分析其近 20 年来的土地利用变化特征, 基于流域月尺度 SWAT 模型定量分析了土地利用变化对径流年内分配的影响; 通过设置 4 种极端土地利用情况研究了不同土地利用类型对于汛期径流的影响; 并通过设置 12 种不同的土地利用覆盖度情景, 揭示了影响流域径流的土地利用的覆盖临界。[结果] 大理河流域主要的土地利用方式为耕地、草地和林地, 草地和林地对径流有抑制作用, 耕地对径流存在促进作用, 三者的影响系数分别为 -0.125, -0.130, 0.122。土地利用对径流的年内分配有一定的调控作用, 但当土地利用变化较小时, 这种调控作用不明显。土地利用覆盖度存在明显的边际效应, 其下临界约为 5%, 草地的上临界为 95%, 林地的上临界为 91%。[结论] 由于流域内实际的植被条件较差, 林草覆盖度仍处于较低水平, 因此修复植被和适当地退耕、退草还林仍能对该流域的水土保持工作和防洪建设起到促进作用。

关键词: SWAT 模型; 土地利用变化; 阈值; 大理河流域

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0061-08

Regulation of Land Use on Runoff in Typical Watersheds of the Middle Reaches of the Yellow River

Wang Qianhua^{1,2}, Zhang Pan², Wang Wei³, Xiao Peiqing², Wu Xiaoling¹

(1. College of Hydrological and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024,
China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau, Ministry of
Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

3. Soil and Water Conservation Supervision Central Station in Henan Province, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to examine the regulatory effects and thresholds of different land uses on runoff variations in the middle reaches of the Yellow River, which is crucial for flood control and the high-quality development of the watershed. [Methods] Focusing specifically on the Dali River Basin, the characteristics of land use changes over the past 20 years were analyzed, and the impact of these changes on the annual distribution of runoff was quantitatively assessed by using a monthly scale SWAT model of the basin. Four extreme land use scenarios were set to study the impact of different land use types on flood season runoff. Additionally, 12 different land use coverage scenarios were used to determine the critical coverage of land use that affected watershed runoff. [Results] The predominant land use modes in the Dali River Basin included arable land, grassland, and forest land. Grassland and forestland exhibited an inhibitory effect on runoff, while arable land promoted runoff. The impact coefficients for these land use types were

收稿日期: 2023-06-21

修回日期: 2023-07-12

资助项目: 国家自然科学基金专项项目(42041006); 国家自然科学基金联合资助项目(U2243210); 河南省自然科学基金优秀青年科技项目(212300410060); 河南省水利科技攻关项目(GG202149)

第一作者: 王倩华(1998—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态治理。E-mail: wqh981218@163.com

通信作者: 张攀(1982—), 女, 河南洛阳人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持与生态治理。E-mail: zpyrcc@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

-0.1252, -0.130 1, and 0.122 3, respectively. Land use had a certain regulatory effect on the annual distribution of runoff. However, this effect was not significant when land use changes were small. [Conclusion] Notably, land use coverage demonstrates a significant marginal effect, with a lower critical value of approximately 5% for grasslands and an upper critical value of 95%, as well as an upper critical value of 91% for forests. These findings can provide valuable insights for soil and water conservation efforts, flood control initiatives, and the high-quality development of the watershed.

Keywords: SWAT model; land use change; threshold; Dali River Basin

植被恢复是黄河中游地区最重要的水土保持措施之一^[1],由植被恢复引起的土地利用变化可以通过改变降雨在下渗、蒸发等各个水文循环中的比例进而对流域的径流造成影响^[2]。不同土地利用对径流的调控作用存在差异,由于气候和下垫面条件普遍存在的空间异质性,相同的土地利用在不同流域的调控作用也不尽相同^[3-4]。如有学者认为林地、草地覆盖度的增加可以有效的削减洪峰和洪量^[5-7],有的学者则认为林地的增加会导致洪量的增加^[8-9]。一些研究表明,植被覆盖对径流的调控存在阈值现象,即随着植被覆盖度的增加,径流量不断减小,当植被覆盖度达到某一值时,对于径流的削减作用不再明显^[10-11]。

黄河中游黄土高原地区土质疏松、沟壑纵横、地形破碎、降雨集中,是我国水土流失最严重、生态环境最脆弱、最易发生山洪灾害的地区之一^[12],而目前针对该区域的研究主要集中于水沙变化、土壤侵蚀和植被恢复等方面,对于土地利用的调控作用及临界的研究相对较少,且现有成果大多来自室内、室外小区试验,这些试验往往忽略气候和下垫面等因素空间异质性带来的影响,无法得到流域尺度上分布式的变化结果,直接影响黄河中游地区的生态建设和防洪安全。黄河中游支流众多,考虑到降雨等气象特征、地形地貌以及水土保持措施等因素,本文以大理河流域为重点研究区域,分析不同土地利用情景下的径流过程,探明径流对土地利用变化的响应机制,揭示不同土地利用对径流的调控作用及临界,以为黄河中游地区的水土保持、生态建设以及流域高质量发展等工作提供理论支撑和科学性依据。

1 研究区概况

大理河流域位于 109°14'—110°13'E, 37°30'—37°56'N, 属黄河二级支流,干流全长 170 km,河道平均比降 3.16‰,流域面积 3 906 km²,流域内设有青阳岔、李家河、曹坪和绥德 4 个水文站,见图 1。流域地势西高东低,起伏较大,主要的土壤类型为黄绵土和新积土,易受水力侵蚀。依据地形地貌和土壤类型等特征,将大理河流域划分为两个不同的地貌类型区,即青阳岔以上

的河源梁涧区(河源区)和以下的黄土丘陵沟壑区(丘陵区)。河源区谷坡坡度多在 40°以上,沟壑密度为 3~4 km/km²,植被覆盖度约在 20% 以下,以抗旱耐寒的杂草和灌木为主;丘陵区地形破碎,梁峁起伏,沟壑密度为 5~6 km/km²,该区域地处干旱草原和落叶阔叶林的过渡带,人类活动较为剧烈,主要的植被类型为柠条、狼牙刺、山杨、马牙草和蒿类等^[13-14]。

该流域属温带大陆性季风气候,冬季干旱少雨雪,11 月至次年 3 月的降水不足全年的 10%;夏季温暖多暴雨,7—9 月的降水量占全年的 60% 以上。流域年平均气温 7.8~9.6℃,平均风速 2.6 m/s,多年平均蒸发量为 1 515 mm。流域出口水文站绥德站的年平均流量 5.83 m³/s,年平均径流总量 1.453 亿 m³,汛期(6—9 月)径流占全年径流的 50% 以上。

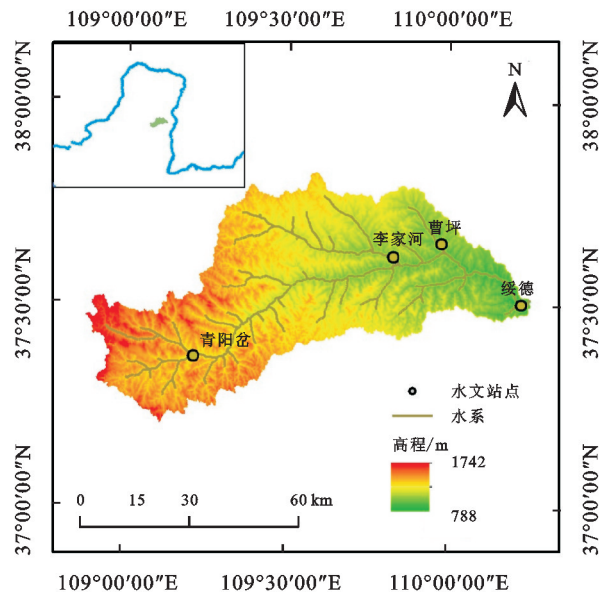


图1 大理河流域地理位置

Fig. 1 The geographical location of the Dali River Basin

2 数据及研究方法

2.1 数据来源

SWAT 模型的构建需要输入大量的数据,主要包括空间数据(DEM、土地利用数据、土壤类型)和属性数据(气象数据和水文数据)。DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),分辨率为

30 m;本文共收集 2000 年、2010 年、2013 年、2020 年四期土地利用数据,均来自中国科学院地理科学与资源研究所,分辨率为 1 km;土壤数据来自世界粮农组织的世界土壤数据库(HWSD),分辨率 1 km,包括黏土含量、砾石含量、沙土含量、淤泥含量、有机碳含量、电导率等,模型需要的其他土壤数据如土壤容重、有效持水量等采用美国农业部开发的土壤特性计算软件 SPAW 进行计算^[15]。考虑到研究区所在位置,将所有空间数据的坐标系设置为投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_49 N。

气象数据采用中国大气同化驱动数据集 CMADS V1.1 版本,年限为 2008—2018 年。CMADS 数据集融合卫星数据产品,采用数据嵌套、重采样和双线性插值等科学方法建立,并按照 SWAT 模型气象数据的输入格式进行了整理,故而可以不做更改直接使用^[16-17]。近年来国内外诸多学者对该数据集的精度和适用性进行了评估,结果表明由 CMADS 数据集驱动的 SWAT 模型径流模拟的结果总体优于由传统气象站数据驱动的径流模拟结果^[18]。水文数据为绥德站 2008—2018 年的逐月径流量,来自黄河流域水文年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 SWAT 模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型以 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basin)模型为基础发展而来,具有强大的物理基础^[19]。SWAT 模型可以用来流域内的各种水文过程,其考虑了气候和下垫面条件的时空分异性,适用于各种复杂的流域。水文循环是采用 SWAT 模型研究各种问题的关键驱动力。模型将水文循环分为两部分,即陆面部分和水面部分,前者指产流和坡面汇流过程,后者指河道汇流过程。

模型采用水量平衡方程模拟水文循环过程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中: SW_t 表示第 t 天的土壤含水量(mm); SW_0 表示第 i 天土壤初始含水量(mm); t 表示时间(d); R_{day} 表示第 i 天降水量(mm); Q_{surf} 表示第 i 天地表径流量(mm); E_a 表示第 i 天的蒸散发量(mm); W_{seep} 表示第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量(mm); Q_{gw} 表示第 i 天地下水回流量(mm)。

模型将流域细分为若干子流域,再按照不同的土地利用和土壤类型划分水文响应单元。分别模拟各个水文响应单元的水文过程,最后演算得到整个流域的径流量,该方法可以有效反映水量平衡的物理过程。

本文选用决定性系数 R^2 和纳什系数 NS 来对模

型的模拟结果进行评价,当 R^2 和 NS 越趋近于 1 时说明模拟效果越好。一般来说,当 $R^2 > 0.6$ 且 $NS > 0.5$,即可认为模拟结果可信^[20]。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^T (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: O_i, S_i 表示观测值和模拟值; \bar{O}, \bar{S} 表示观测序列和模拟序列的均值。

SWAT 模型的评价标准见表 1^[21]。

表 1 SWAT 模型模拟结果评价标准

Table 1 Evaluation criteria for SWAT model simulation results

模拟精度	R^2	NS
甲级(极好)	$R^2 > 0.85$	$0.75 < NS \leq 1$
乙级(较好)	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.65 < NS \leq 0.75$
丙级(可信)	$0.5 < R^2 \leq 0.75$	$0.5 < NS \leq 0.65$
不可信	$R^2 < 0.5$	$NS \leq 0.5$

2.2.2 多目标决策函数法 不同的植被类型对于径流的调控作用有所差别,本文采用多目标决策函数法来定量分析不同植被类型对于径流变化的影响系数^[22-24]。

年平均径流深的表示方法为:

$$\begin{bmatrix} R_{x1} - R_{x2} \\ R_{x3} - R_{x4} \\ R_{x5} - R_{x6} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x1} - A_{x2} & F_{x1} - F_{x2} & G_{x1} - G_{x2} \\ A_{x3} - A_{x4} & F_{x3} - F_{x4} & G_{x3} - G_{x4} \\ A_{x5} - A_{x6} & F_{x5} - F_{x6} & G_{x5} - G_{x6} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R_{xi} 为第 i 期土地利用下的径流深(mm); A_{xi} 为第 i 期土地利用中耕地所占面积(km^2); F_{xi} 为第 i 期土地利用中林地所占面积(km^2); G_{xi} 为第 i 期土地利用中草地所占面积(km^2); M_a, M_b, M_c 分别为耕地、林地、草地对径流的影响系数。

2.2.3 汛期径流分配不均系数与完全调节系数 采用汛期径流分配不均系数 C_v 和完全调节系数 C_r 来表示汛期各月径流分配的不均匀程度 C_v 和 C_r 值越大表明汛期内各月平均径流深相差越大,分配越不均; C_v 和 C_r 的计算公式为:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (R_i / \bar{R})^2}{4}} \quad (6)$$

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^4 \Phi_i (R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^4 R_i}, \quad \Phi(t) = \begin{cases} 0 & R_i < \bar{R} \\ 1 & R_i \geq \bar{R} \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_i 为各月径流深(mm); \bar{R} 为平均径流深(mm)。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型建立与评价

依据 DEM 建立河网,设置子集水区阈值为 2 500 hm^2 ,将大理河流域划分为 86 个子流域,并依据不同的土地利用、土壤类型和坡度将流域细分为 876 个水文响应单元。输入气象数据初步构建大理河流域的 SWAT 模型,其中土地利用数据采用 2013 年。

经过前期多次试验发现率定期的选择对模拟的

精度存在一定的影响,考虑到大理河流域气候和地质条件的复杂性,最终选择 2014—2018 年为模型的率定期,2009—2013 年为模型的验证期。为减小运算量,采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对选取 32 个参数进行敏感性分析,并选择敏感性较高的参数进行模型率定与验证。敏感性分析的结果用统计量 t (t -Stat) 值和显著性指标 p (p -value) 值来表征, $|t|$ 和 p 的值与参数的敏感性成正比。敏感性排名前 10 的参数及其最终取值见表 2。

表 2 参数敏感性排名和最终取值

Table 2 The parameter sensitivity ranking and the final value

敏感性较强的 参数排序	参数及调参方法	t	p	初始范围	最终取值
1	R_CN2.mgt	-20.766	0.000	-0.3~0.3	0.084
2	R_SOL_BD.sol	-14.213	0.000	-0.3~0.3	0.211
3	V_HRU_SLP.hru	-13.725	0.000	0~1	0.661
4	V_ALPHA_BNK.rte	-4.519	0.000	0~1	0.855
5	V_CANMX.hru	3.997	0.000	0~10	3.056
6	V_SLSUBBSN.hru	3.035	0.000	0~150	146.609
7	R_SOL_K.sol	-2.928	0.004	-0.3~0.3	-0.279
8	V_GW_DELAY.gw	2.107	0.036	0~500	357.320
9	R_SOL_Z.sol	1.963	0.050	-0.3~0.3	0.467
10	V_SMTMP.bsn	1.721	0.086	-5~5	1.723

注:调参方法中的 R 表示初始值 $\times (1 + \text{设定值})$, V 表示对初始值进行替换。

图 2 为对大理河流域绥德站全年径流的模拟结果,其率定期的 R^2 为 0.87, NS 为 0.85,模拟精度达到乙级;验证期的 R^2 为 0.58, NS 为 0.50,精度勉强达到 SWAT 模型的可信范围。图 3 为对绥德站汛期径流的模拟结果,率定期的 R^2 为 0.91, NS 为 0.89;验证期的 R^2 为 0.63, NS 为 0.6,虽然验证期的精度仍未达到乙级,但模拟效果优于全年径流。考虑到模型精度的影响,为提高结果的可信程度,本文后续研究均采用汛期数据进行。

3.2 不同土地利用类型对径流的影响

本文选取 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数据

来分析不同土地利用类型对径流量的影响。大理河流域 2000—2020 年的土地利用变化情况见表 3。

林地、耕地、草地是大理河流域最主要土地利用类型,三者的覆盖面积达到流域的 95% 以上。在过去的 20 年中,耕地的变化率最大,平均每年减少 9.45 km^2 ,草地的变化程度次之,平均每年增加 7.35 km^2 。除此之外,林地的变化也相对明显,平均每年增加 1.9 km^2 。2000—2020 年,大理河流域土地利用主要由耕地向草地进行转变,这一结果与进入 20 世纪以来黄河流域实施的退耕还林、还草政策相对应。

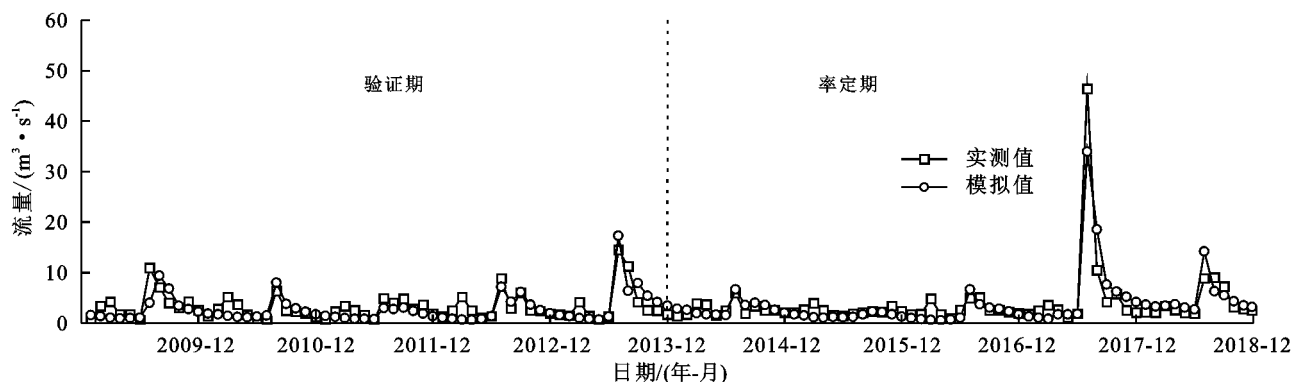


图 2 绥德站 2009—2018 年月径流率定期和验证期模拟结果

Fig. 2 Simulation results of monthly runoff sequence at Suide Station from 2009 to 2018

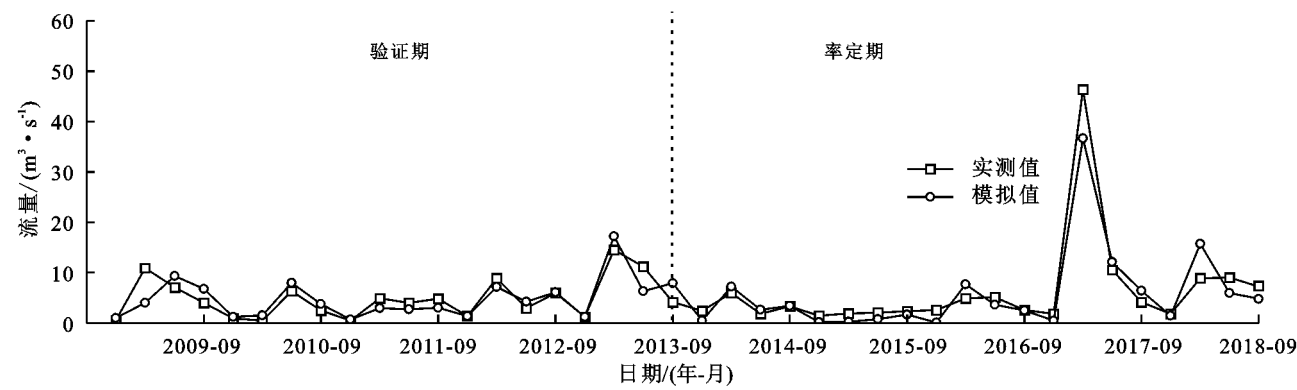


图 3 绥德站 2009—2018 年汛期月径流率定期和验证期模拟结果

Fig. 3 Simulation results of monthly runoff sequence during the flood season at Suide Station from 2009 to 2018

基于流域的实际情况,本文主要计算林地、耕地、草地对汛期径流量的影响系数。影响由大小排序林地>草地>耕地。林地、草地的影响系数为负值,说明其变化与径流呈负相关,即随着土地利用面积的增大,汛期径流量将有所减小。而耕地的影响系数为正值,说明随着耕地面积的增加,径流量随之增加。

将各个年份不同土地利用的面积和其对应的年均径流量代入函数矩阵,计算出其影响系数 M_a , M_b , M_c 为 0.122, -0.130, -0.125。从数值上来看,土地利用对径流

表 3 大理河流域 2000—2020 年土地利用变化情况

Table 3 Land use changes in the Dali River Basin from 2000 to 2020

年份	项目	林地	耕地	草地	水体	居民区	裸地
2000	面积/km ²	280	2101	1507	8	6	0
	占比/%	7.18	53.84	38.62	0.21	0.15	0
2010	面积/km ²	334	2072	1480	10	6	0
	占比/%	8.56	53.10	37.93	0.26	0.15	0
2020	面积/km ²	318	1912	1654	6	11	1
	占比/%	8.15	49.00	42.39	0.15	0.28	0.03
2000—2020	变化速率/(km ² · a ⁻¹)	1.9	−9.45	7.35	−0.1	0.25	0.05

3.3 不同土地利用对汛期径流的调控

分别将 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数据输入 SWAT 模型,根据模拟结果计算得到不同土地利用下的汛期各月平均径流深,见图 4。2000 年土地利用下的汛期径流深为 14.57 mm,2020 年的为 14.23 mm,共减小 0.34 mm,减小幅度为 2.4%。从各月来看,7 月份的径流变化幅度最大,8 月次之,6 月、9 月相对较小,由此可见土地利用对丰水期调控作用强于枯水期。

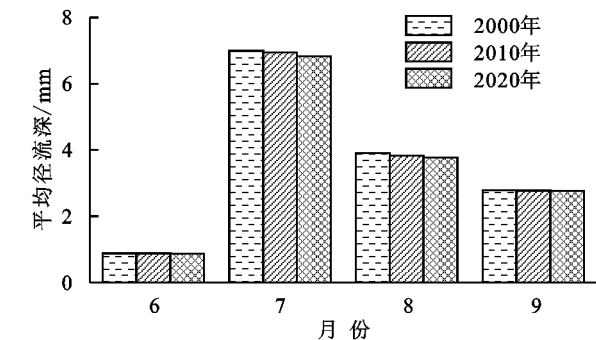


图 4 不同土地利用下的汛期各月平均径流深

Fig. 4 The monthly average runoff depth under different land uses during the flood season

2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用下汛期径流的分配不均系数与完全调节系数见图 5。

整体上看值都呈下降趋势,说明随着土地利用的变化,汛期径流的分配不均匀程度不断降低。但二者的线性变化系数分别为 -0.009 与 -0.007 5,减小趋势相对较小。

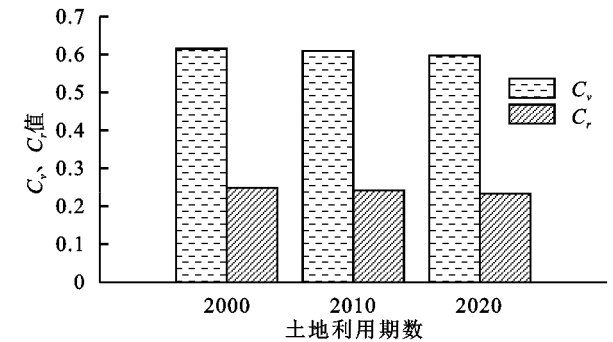


图 5 大理河流域不同土地利用下的 C_v 和 C_r 值

Fig. 5 C_v and C_r values under different land uses in the Dali River Basin

综上所述,大理河流域的土地利用对径流的年内分配存在一定的调控作用,但由于近 20 年来该流域土地利用的变化幅度相对较小,所以调控作用不明显。

为定量分析土地利用对于汛期径流的年际调控作用,采用极端土地利用法设置林地、草地、耕地以及原始土地利用(2013 年)4 种不同的土地利用情景,基于构建的月尺度 SWAT 模型进行径流模拟。该法可以忽略不确定因素的影响,更加直观地体现不同植被类型下的汛期流量差异。设置的 4 种土地利用情景

如下,模拟结果见图 6。

原始情景(S0):2013 年土地利用;林地情景(S1):除流域内的水体和居民区以外,其他区域全部转化为林地;草地情景(S2):除流域内的水体和居民区以外,其他区域全部转化为草地;耕地情景(S3):除流域内的水体和居民区以外,其他区域全部转化为耕地。

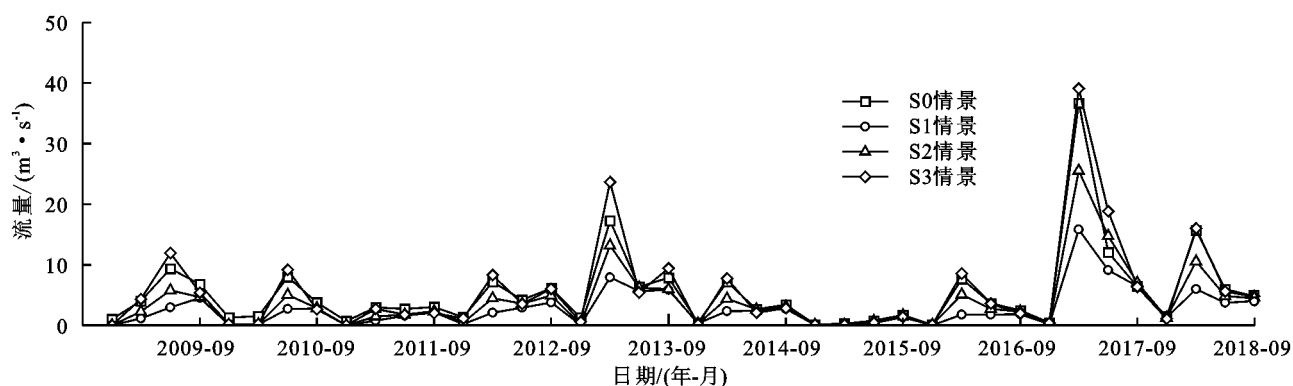


图 6 4 种情景下的绥德站汛期流量过程

Fig. 6 The flood season flow process at the Suide station under four hypothetical conditions

通过对比不同土地利用情景下的汛期流量过程可知,S0 情景下的汛期平均径流深为 14.3 mm,林地、草地情景下的汛期平均径流深分别为 7.34 mm, 10.4 mm,相较于原始情景来说,林地、草地下的汛期流量均大幅度减少。而耕地的情景下的汛期径流深相较于原始情景增长了 0.23 mm,为 14.53 mm。通过研究发现林地和草地能够有效的拦截汛期径流,降低洪量,而耕地的增加对于消减洪量起负作用。

3.4 不同类型土地利用的覆盖度阈值

林地、草地对汛期径流有消减作用,但这一作用并非一直存在,也并非随着覆盖度的提高无限扩大,

而是存在边际效应,当覆盖度小于某一值时,植被对于洪峰洪量的拦截并不明显;当覆盖度大于某一值时,随着植被面积的增大,洪量不再明显减少。因此,探明不同土地利用的覆盖度阈值,无论是在经济层面或是生态层面都有巨大的意义。

大理河流域地面坡度组成中,小于 5°的坡面占比 7.27%,5°~15°的占比 38.48%,15°~25°的占比 35.46%,25°~35°的占比 15.38%,35°以上的占比 3.42%。将坡度进一步细分,按照由缓到陡的顺序依次在坡面上布设植被,最终得到 12 种不同的植被覆盖度,详见图 7。

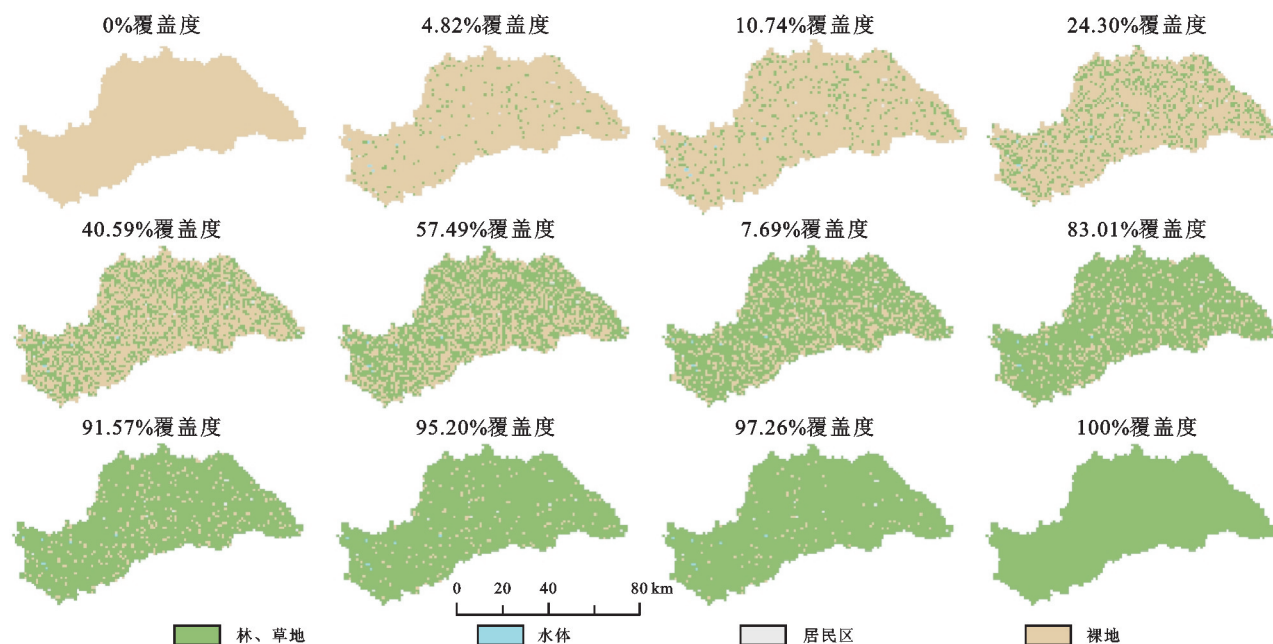


图 7 大理河流域不同覆盖度下的土地利用分布

Fig. 7 Land use distribution under different coverage levels in the Dali River Basin

将设置土地利用数据输入构建好的 SWAT 模型,即可得到不同植被覆盖度下的径流过程。

对比不同土地利用类型及覆盖度下的汛期平均径流深(图 8)可见,土地利用覆盖度对径流的影响存在两个阈值。当覆盖度小于 5%时,其对径流的拦截能力可忽略不计;当覆盖度大于 5%时,随着土地利用面积的增加,汛期平均径流深呈现明显的下降趋势。当覆盖度较小时,两种土地利用类型在拦洪能力上的差异较小,而当覆盖度超过 25%时,差异逐渐增大,这种差异造成了林地和草地在覆盖度上临界的不同。当草地覆盖度超过 95%时,汛期平均径流深不再随着面积的增加而增加。林地覆盖度的上临界则要小一些,当覆盖度达到流域的 91%时,林地面积的增加将不再能有效地减少径流。

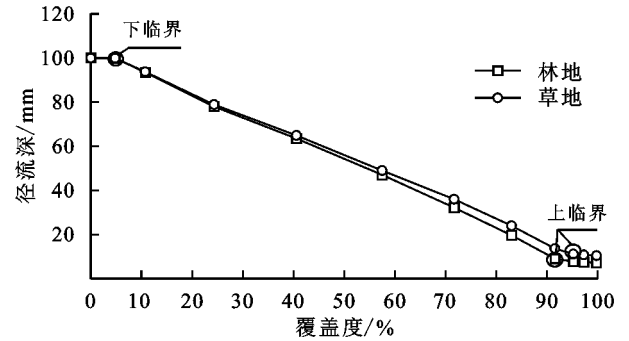


图 8 不同土地利用的覆盖度阈值

Fig. 8 Coverage thresholds for different land uses

4 结论

(1) 大理河流域主要的土地类型为耕地、草地、林地 3 种,其面积占流域总面积的 99%以上。近 20 年来,林地、草地以及居民区呈增加的趋势,而耕地和水体呈减少的趋势。该流域土地利用主要的变化为耕地向草地转化。

(2) 大理河流域耕地、草地、林地对汛期径流的影响系数分别为 0.122,−0.125,−0.130;即林地和草地对汛期径流能起到一定的消减作用,而耕地对径流有促进左右。土地利用对径流的年内分配有一定的调控作用,且这种作用在丰水期更加明显。但当土地利用变化较小时,这种调控作用不明显。

(3) 不同土地利用对径流的调节作用存在明显的边际效应。林地、草地的下临界均为 5%左右;草地的上临界为 95%左右,林地的上临界为 91%左右。

(4) 大理河流域从 20 世纪 70 年代就开始了大规模的流域生态治理,但时至今日该流域的治理程度仍然不高,虽然草地和林地两种土地利用占流域面积

的 50%左右,但由于流域内植被条件较差,实际的林草覆盖度达不到该水平。所以修复植被和适当地退耕、退草还林仍能对该流域的水土保持工作和防洪建设起到促进作用。

由于数据及模型结构等因素的局限性,本研究仍存在一些不足之处需进行后续的研究和改进,如优化模型提高模拟精度、考虑於地坝等其他因素的影响,并将研究在全年进行而不是局限于汛期,这将是未来的研究重点。

参考文献(References):

[1] 易海杰,张晓萍,何亮,等.黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化[J].农业工程学报,2022,38(18):255-263.

Yi H J, Zhang X P, He L, et al. Vegetation restoration potential and land use change in different geomorphological areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18):255-263.

[2] 牛凤娇,潘成忠,崔永生,等.晋西黄土区土地利用对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响试验研究[J].生态学报,2023,43(10):4154-4166.

Niu F J, Pan C Z, Cui Y S, et al. Experimental investigation to the effect of different land-use on rainfall infiltration runoff patterns and preferential flow distribution in the Loess area of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(10):4154-4166.

[3] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2014,34(6):1559-1567.

Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, et al. Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(6):1559-1567.

[4] 刘卫林,李香,吴滨,等.修河中上游流域土地利用变化对径流的影响[J].水土保持研究,2023,30(3):111-120.

Liu W L, Li X, Wu B, et al. Impact of land use change on runoff in the middle and upper reaches of Xiuhe river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):111-120.

[5] 傅春,毛安琪.抚河流域径流对土地利用变化时空响应[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):342-350.

Fu C, Mao A Q. Spatiotemporal responses of runoff to land use change in Fuhe river basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(2):342-350.

[6] 袁宇志,张正栋,蒙金华.基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J].应用生态学

- 报, 2015, 26(4): 989-998.
- Yuan Y Z, Zhang Z D, Meng J H. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 989-998.
- [7] 黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 渭河流域径流对土地利用变化的时空响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 232-238.
- Li Y Y, Chang J X, Wang Y M, et al. Spatiotemporal responses of runoff to land use change in Wei River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 232-238.
- [8] 程程. 基于 SWAT 模型的土地利用和土地覆被变化及气候变化对元江流域径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 52-59.
- Cheng C. Impacts of land use/land cover change and climate change on the runoff in Yuan River basin based on SWAT model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(5): 52-59.
- [9] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土区森林植被对流域径流和输沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 48-53.
- Zhang X M, Yu X X, Wu S H, et al. Influence of forest vegetation on runoff and sediment transport of watershed in loess area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(3): 48-53.
- [10] 陈戎欣, 吕锡芝, 倪用鑫, 等. 人工降雨下草被对黄土丘陵沟壑区坡面径流的调控及临界阈值[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 122-128.
- Chen R X, Lv X Z, Ni Y X, et al. Regulation and critical threshold of grass cover on slope runoff in Loess Hilly Gully region under artificial rainfall[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(1): 122-128.
- [11] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 植被覆盖下黄土凸型复合坡面水流特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 147-154.
- Wei X, Li X G, Li Z B, et al. Flow characteristics of convex composite slopes of loess under vegetation cover[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 147-154.
- [12] 孙萍萍, 张茂省, 程秀娟, 等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报, 2019, 37(5): 737-746.
- Sun P P, Zhang M S, Cheng X J, et al. On the Regularity of Geological Hazards on the Loess Plateau in China[J]. Mountain Research, 2019, 37(5): 737-746.
- [13] 贾路, 任宗萍, 李占斌, 等. 基于耦合协调度的大理河流域径流和输沙关系分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 86-94, 328.
- Jia L, Ren Z P, Li Z B, et al. Relationship between runoff and sediment load in Dali River Basin based on coupling coordination degree[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 86-94, 328.
- [14] 王民, 李占斌, 崔灵周, 等. 大理河流域地貌分形特征空间变异研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 104-107.
- Wang M, Li Z B, Cui L Z, et al. A study on spatial variation of geomorphologic fractal characters in Dali river watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(5): 104-107.
- [15] 徐冬梅, 胡昊, 王文川, 等. SWAT 模型土壤物理属性数据库本土化构建研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2018, 39(1): 36-41.
- Xu D M, Hu H, Wang W C, et al. Localization method for soil physical property database of SWAT model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 36-41.
- [16] Meng X, Wang H, Chen J. Profound impacts of the china meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model(CMADS)[J]. Water, 2019, 11(4): 832.
- [17] 孟现勇, 师春香, 刘时银, 等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用: 以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 1-19.
- Meng X Y, Shi C X, Liu S Y, et al. CMADS Datasets and its application in watershed hydrological simulation: A case study of the Heihe river basin[J]. Pearl River, 2016, 37(7): 1-19.
- [18] 陈世雪, 玉素甫江·如素力. CMADS 数据集用于开都河上游水文模拟的适用性评估[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 139-146.
- Chen S X, Yusupjiang R S L. Application of CMADS dataset for simulating hydrological processes in upper reach of the Kaidu river[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 139-146.
- [19] 赵雪岩, 张鑫, 孙媛. 2005—2030 年无定河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 24-31.
- Zhao X Y, Zhang X, Sun Y Y. Effects of different land use changes on runoff in Wuding river basin in 2005—2030 period[J]. Yellow River, 2023, 45(3): 24-31.
- [20] 钟小敏, 钟科元, 高怡婷, 等. SWAT 模型子流域划分引起的土地利用变化对径流和输沙模拟结果的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 52-58.
- Zhong X M, Zhong K Y, Gao Y T, et al. Effect of land use change caused by sub-watershed division in SWAT Model on runoff and sediment simulation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 52-58.

- [20] 刘迪,陈海,荔童,等.黄土丘陵沟壑区村域生态系统服务簇的时空分异及其地形梯度分析[J].地理科学进展,2022,41(4):670-681.
- Liu D, Chen H, Li T, et al. Spatiotemporal differentiation of village ecosystem service bundles in the loess hilly and gully region and terrain gradient analysis[J]. Progress in Geography, 2022,41(4):670-681.
- [21] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
- Bao W B, Li T, Liu H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi province by InVEST model[J]. Geographical Research, 2016,35(4):664-676.
- [22] Shi Q Q, Chen H, Liu D, et al. Exploring the linkage between the supply and demand of cultural ecosystem services in Loess Plateau, China: a case study from Shigou Township[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27:12514-12526.
- [23] 刘迪,陈海,张杰,等.黄土丘陵沟壑区村域客观福祉评估及其对农民主观福祉的影响:以陕西省米脂县为例[J].地理科学,2023,43(3):530-540.
- Liu D, Chen H, Zhang J, et al. Village's objective well-being assessment and its impact on farmer's subjective well-being in the loess hilly and gully region: A case study of Mizhi County, Shaanxi Province, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023,43(3):530-540.
- [24] Diedrich A, Stoeckl N, Gurney G G, et al. Social capital as a key determinant of perceived benefits of community-based marine protected areas[J]. Conservation Biology, 2017,31(2):311-321.
- [25] Islam G M N, Tai S Y, Kusairi M N, et al. Community perspectives of governance for effective management of marine protected areas in Malaysia [J]. Ocean & Coastal Management, 2017,135:34-42.
- [26] 白描.福祉视角下农民社会关系的现状分析[J].农业经济问题,2016,37(12):39-47,111.
- Bai M. Analysis of present situation of rural residents' social relationship based on the perspective of well-being[J]. Issues in Agricultural Economy, 2016, 37(12):39-47,111.
- [27] 白描.微观视角下的农民福祉现状分析:基于主客观福祉的研究[J].农业经济问题,2015,36(12):25-31,110.
- Bai M. Analysis of the status of rural residents' well-being under the micro perspective: A research based on the subjective well-being and objective well-being[J]. Issues in Agricultural Economy, 2015,36(12):25-31,110.
- [28] Leach M, Mearns R, Scoones I, et al. Environmental entitlements: dynamics and institutions in community-based natural resource management[J]. World Development, 1999,27:225-247.
- [29] 刘迪,陈海,张行,等.黄土丘陵沟壑区生态系统服务对人类福祉的影响及其群体差异[J].地理研究,2022,41(5):1298-1310.
- Liu D, Chen H, Zhang H, et al. The impact of ecosystem services on human well-being and its group differences in the loess hilly and gully region[J]. Geographical Research, 2022,41(5):1298-1310.
- [30] 蔡国英,尹小娟,赵继荣.青海湖流域人类福祉认知及综合评价[J].冰川冻土,2014,36(2):469-478.
- Cai G Y, Yin X J, Zhao J R. Recognition and comprehensive evaluation of human well-being in Qinghai Lake basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(2):469-478.

(上接第 68 页)

- [21] 龚珺夫.无定河流域水沙变化及侵蚀能量空间分布研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- Gong J F. Study on runoff and sediment variation and spatial distribution of erosion energy in Wudinghe watershed [D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2018.
- [22] 潘竞虎,石培基,赵锐锋.基于 LP-MCDM-CA 模型的土地利用结构优化研究:以天水市为例[J].山地学报,2010,28(4):407-414.
- Pan J H, Shi P J, Zhao R F. Research on optimal allocation model of land use structure based on LP-MCDM-CA Model: The Case of Tianshui[J]. Mountain Research, 2010,28(4):407-414.
- [23] 王学,张祖陆,宁吉才.基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J].生态学杂志,2013,32(1):186-194.
- Wang X, Zhang Z L, Ning J C. Runoff response to land use change in Baimahe basin of China based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(1):186-194.
- [24] 郑奕,魏文寿,崔彩霞.新疆焉耆盆地水资源承载力研究[J].中国人口资源与环境,2010,20(11):60-65.
- Zheng Y, Wei W T, Cui C X. Water resource carrying capacity in Yanqi basin based on multi-objective analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2010,20(11):60-65.