

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.010.

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 Weilin, LI Xiang, WU Bin, 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.

修河中上游流域土地利用变化对径流的影响

刘卫林, 李香, 吴滨, 曹辛格, 黄一鹏, 刘丽娜

(南昌工程学院 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 南昌 330099)

摘要: [目的] 土地利用的变化对流域水文过程产生了重要的影响, 研究土地利用变化下的水文响应已成为水文学科研究的一个热点。[方法] 以修河中上游流域作为主要研究区域, 分析了 35 年来修河中上游流域各种土地利用类型的变化特征, 并利用 1987—2000 年水文气象数据资料, 构建了 SWAT 模型, 通过设置 1980 年、1990 年、2005 年和 2015 年 4 种土地利用情景, 定量分析了修河中上游流域土地利用变化对径流的影响。[结果] SWAT 模型在研究区具有较好的适用性。1980—2015 年, 修河中上游流域主要用地类型为林地、耕地和草地, 三者面积之和占流域的 98%。其中高利用城市用地和耕地对径流的影响系数是正值, 说明高利用城市用地和耕地对径流起促进作用; 林地、草地对径流的影响系数均表现为负值, 说明林地和草地对径流有抑制作用, 且草地的抑制作用更加显著。此外, 林地和草地在丰水季会减少径流, 在枯水季会增加径流, 有类似海绵的作用。[结论] 模拟研究土地利用变化对修河中上游流域径流的影响在合理规划水土资源、改善生态环境方面具有十分重要的现实意义。

关键词: 土地利用变化; SWAT 模型; 径流模拟; 修河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0111-10

Impact of Land Use Change on Runoff in the Middle and Upper Reaches of Xiuhe River Basin

LIU Weilin, LI Xiang, WU Bin, CAO Xinge, HUANG Yipeng, LIU Lina

(Jiangxi Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Water Environment,

Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: [Objective] The change of land use will have an important impact on the hydrological process of the basin. The study of hydrological response under land use change has gradually become a hot topic in the discipline of hydrology. [Methods] The middle and upper reaches of Xiuhe river basin was taken as research area. The variation characteristics of land use types in the middle and upper reaches of Xiuhe River in the past 35 years were analyzed. Then, based on the data of hydrometeorology from 1987 to 2000, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was established to simulate runoff variation. Moreover, four scenarios of land uses were set in combination of SWAT model to quantitatively analyze the impact of land use change on runoff. [Results] SWAT model had a good simulation effect in the study area. From 1980 to 2015, woodland, cultivated land and grassland were mainly the land use types in the middle and upper reaches of Xiuhe River basin. In the meantime, the sum of the three types of land use areas accounted for more than 98% of the total basin area. The influence coefficients of high utilization of urban land and cultivated land on runoff were positive, indicating that high utilization of urban land and cultivated land played an important role in increasing runoff. The influence coefficients of woodland and grassland on runoff were negative, which showed that woodland and grassland had the function of intercepting runoff, and the role of grassland

收稿日期: 2021-06-16

修回日期: 2021-12-08

资助项目: 江西省自然科学基金(20192BAB206047); 国家自然科学基金(52069015); 江西省教育厅科技项目(GJJ170980)

第一作者: 刘卫林(1978—), 男, 江西新余人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: weilin_liu@nit.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

was more significant. Besides, results of SWAT model showed that woodland and grassland could reduce runoff in the wet season, but could increase the runoff in the dry season, which was similar to sponge. [Conclusion] It is of great practical significance in rational planning of water and soil resources and improving ecological environment that simulates the impact of land use change on runoff in the middle and upper reaches of Xiuhe river basin.

Keywords: land use change; SWAT model; runoff simulation; Xiuhe River basin

近年来,随着人类活动不断地对自然进行改造,导致土地利用/覆被不断发生变化,也引起全球陆面过程发生明显的改变^[1-2]。自1970年以来,国内外大批学者先后开展了土地利用变化对水文水资源的影响研究。Matheussen等^[3]对哥伦比亚河流域研究发现植被覆盖率变化与地表径流具有直接的关系。Debbage等^[4]研究结果表明城市化进程加快可以导致大部分流域径流量均有所增加。李慧等^[5]依托水文数据研究城市化对西安市和河流水文过程的影响,发现快速的城市化建设能够改变研究区的自然降水机制并在影响下游径流的作用上愈发显著。随着水文模型的出现与完善,“3S”技术的不断发展与成熟,更多的研究者选择水文模型对水文影响机制进行分析研究。其中SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型在流域水文模拟及污染模拟方面有十分明显的优势,得到了很多学者的研究与使用,也在国内的水文模拟研究中应用的越来越广泛。张国栋等^[6]通过研究汾河流域38年土地利用的变化情况,发现林地和草地面积的扩大以及农业用地面积的减少都会减少汾河的径流量和汛期的径流。葛志楠等^[7]对渭河流域研究发现随着研究区内水土保持工作进行和城市化进程加快,该区土地利用变化对径流的作用不太显著,其影响低于10%。刘斯文等^[8]运用SWAT模型研究新疆开都河流域土地利用变化对径流的影响,发现内陆河干旱区的植被覆被增加导致流域大部分月均径流量减少,少数枯水月份增加,且林地的影响作用较草地更为显著。李建庆等^[9]研究表明在北江流域农业用地和森林转换为建设用地,可以增加径流、产水量和地表径流,减少侧流量、地下含水量和蒸发量。

城市化、大面积的植树造林、农田开垦等各种土地利用方式的变革都会对流域的水文过程产生剧烈的影响,并且伴随着现代社会经济飞速发展,人类活动的不断加剧,城镇化快速推进,造成了植被覆盖率的下降、不透水区域面积的增加,引起土地利用的急剧变化^[10],继而引发水土流失、土地退化、极端水文事件频发等生态环境问题。目前我国对于土地利用变化对径流影响研究,在研究区域上多集中在大中流域和平原地区,在研究内容上多局限于研究土地利用变化对径流量数值改

变的影响,缺乏关于土地利用变化对径流的影响作用的研究。因此本文研究区域选择在修河中上游流域,选取月均径流量和年均径流量指标,在此基础上分析土地利用变化对径流影响系数,以此研究修河中上游流域土地利用变化对径流的影响。

土地利用的急剧变化,直接或间接的改变流域内产、汇流过程,进一步引起水循环的变化,从而导致水资源在时空上产生与以往不同的配置^[11]。修河位于赣西暴雨区,是鄱阳湖水系的五大河流之一。目前,对于修河流域水文演变特征及影响机制的研究主要包括气候变化对径流的影响^[12]、修河中上游森林类型对水源的功能作用等,而缺少了对该流域土地利用的水文过程的影响机制研究。因此,本文以修河中上游流域为研究实例,基于水文、气象和土地利用等数据,构建SWAT流域水文模型,分析不同土地利用类型面积的变化对修河中上游径流的影响,以揭示该流域土地利用变化对于径流的水文响应规律,为该地区土地规划管理、水资源管理和城市建设管理方面提供科学的理论基础。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

修河位于江西省西北部,东经114°14′、北纬28°31′,流域面积为14 797 km²,全长419 km。修河从铜鼓县修源尖东南部出发,自西向东于九岭山与幕阜山之间蜿蜒穿行,最终流入鄱阳湖,见图1。修河流域属亚热带季风气候区,气候舒适宜人,年均气温17℃,年平均水面蒸发量786 mm,年平均降水量达到1 663 mm,55.8%的降水发生在4—7月的河流主汛期。修河上下游被秀水县和柘林县分割,中上游地区的山区明显要多于尾部地区。修河流域属于典型的南方山区河流,每年主要的暴雨洪水多发生在4月至6月,在特殊年份里受到强烈台风的影响时,部分地区在9月份还可能会出现暴雨和洪水。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 水文气象数据 水文数据和气象数据来自水利部水文局编制的水文年鉴和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。水文数据为高沙站(1988—2000年)的逐日径流量统计资料;气象数据为研究区

附近平江、修水、宜丰、武安的 4 个气象观测站的日数据,包括每日的最低和最高温度、降水量、太阳辐射、风速和相对湿度。修水站、平江站、宜丰站以及武安站气象数据均是从中国气象数据网中获取的,其他数据可通过 Cligent 天气发生器生成。

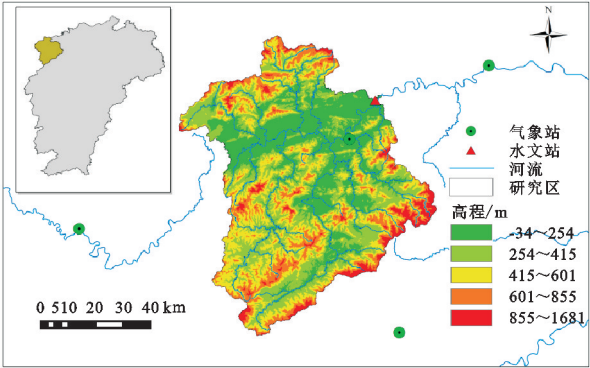


图 1 修河中上游流域水系及水文气象站点分布

1.2.2 土地利用数据 在建立 SWAT 模型时,土地利用数据则是必不可少的,其内容包含有土地利用类型以及土地类型索引表,其分类使用土地覆盖/植被类型的二级分类。本次研究用土地利用数据是从中国科学院资源环境数据中心([http:// www.resdc. cn/](http://www.resdc.cn/))获取的,数据精度为 1 : 10 万的矢量数据。收集了四期修河中上游流域的土地利用遥感监测数据,分别为 1980 年、1990 年、2005 年及 2015 年,见图 2。

流域内土地利用类型包括灌溉水田、林地、城镇用地等 22 种类型,为了充分适应 SWAT 模型的模拟需要,采用 ArcGIS 软件对 4 期研究区的影像遥感监测数据进行了重新分析归类,并结合修河中上游流域实际的土地利用情况,将研究区的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、高利用城市用地和低利用城市用地 6 类,具体见表 1。

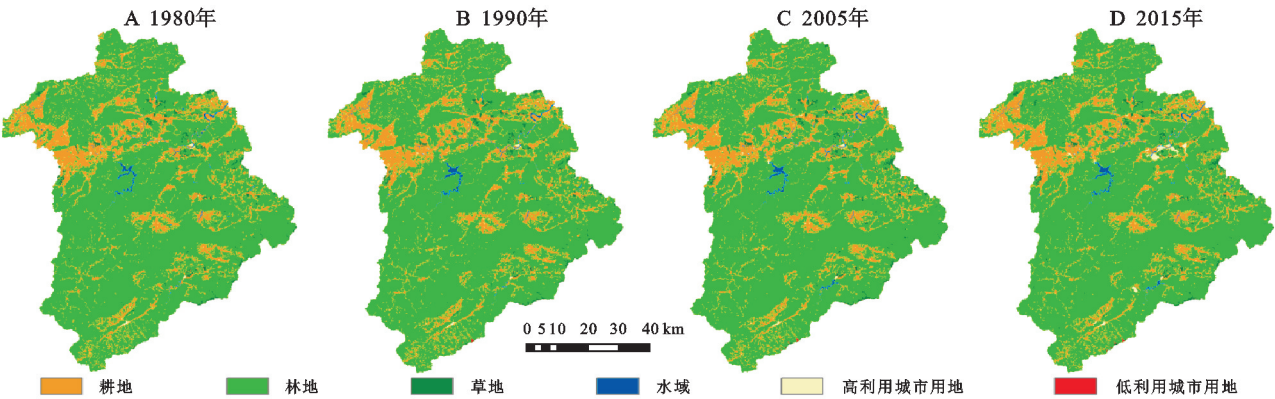


图 2 修河中上游流域土地利用分布情况

表 1 土地利用类型重分类统计

一级分类	二级分类	SWAT 代码
耕地	水田	AGRL
	旱地	
林地	有林地	FRST
	灌木林地	
	疏林地	
	其他林地	
草地	高覆盖度草地	PAST
	中覆盖度草地	
	低覆盖度草地	
水域	河渠、湖泊	WATR
	水库、塘坝	
高利用城市用地	城镇用地、农村居民点	URHD
低利用城市用地	其他建设用地	URLD
	裸岩石质地	

1.2.3 土壤数据 土壤数据来源于 HWSO 全球土壤数据库 1 : 100 万数据集,可以从黑河数据中心上进行下载。该数据集是由联合国粮农组织、中国科学院南京土壤研究所等在 2009 年 3 月联合公开发布的

1 km 格网世界土壤数据库。使用 SPAW (Soil-Plant-Air-Water) 软件获取土壤数据库中所需使用的参数值和土壤类型分布图(图 3)。

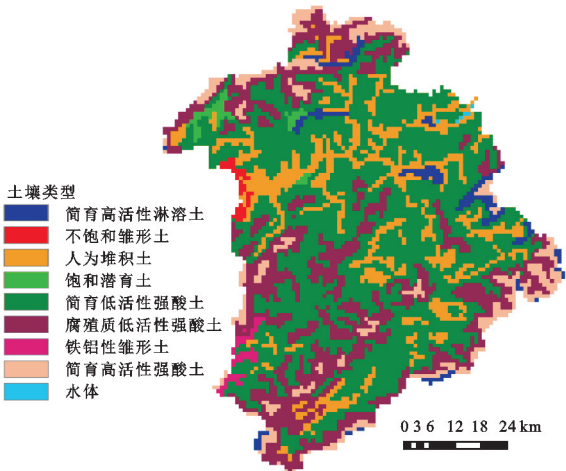


图 3 修河中上游流域土壤类型分布

1.2.4 数字高程数据 SWAT 模型可以利用 ArcGIS 平台根据数字高程模型(DEM)数据将流域划分为各不相同的子流域,利用 DEM 数据来建立河网与子流域之间的拓扑关系。本次研究的高程数据采用

了从地理数据空间数据云下载的 GDEM V2 DEM 30 m 分辨率数字高程图。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT 模型模拟法 SWAT 模型是由美国农业部(USDA)于 1994 年开发的,旨在让研究者通过该模型可以预测大流域的各个子流域在复杂多样的土地利用方式及土壤资源类型的环境条件状况下,采取不同的土地管理方式和保护措施对径流、泥沙和化学物质所产生的影响^[13]。这是一种基于 GIS/RS 技术的较大空间范围内的流域水文模型,主要目的就是利用遥感影像、地理信息系统等提供的空间数据资料,模拟出土地利用的变化对流域水文过程的影响^[14]。SWAT 模型中所使用的水量平衡公式^[15]显示如下:

$$W_T = W_0 + \sum_{i=1}^t (P_d - Q_d - E - W_{dp} - Q_n) \quad (1)$$

式中: W_T 为该土壤最终含水量(mm); W_0 为土壤前期的含水量(mm); t 为计算的时间步长(d); P_d 为第 i 天降水量(mm); Q_d 为第 i 天地表径流量(mm); E 为第 i 天蒸散发量(mm); W_{dp} 为第 i 天进入地下含水层的水量(mm); Q_n 为第 i 天地下径流量(mm)。

本文通过比较选取相对误差 R_e 、决定性系数 R^2 、Nash-Sutcliffe 效率系数 E_s 来作为评价模型的模拟精度的指标,各计算公式^[16-17]如下所示:

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^n (M - S)}{\sum_{i=1}^n (S)} \times 100\% \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})(S - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S - \bar{S})^2} \quad (3)$$

$$E_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S - M)^2}{\sum_{i=1}^n (S - \bar{M})^2} \quad (4)$$

式中: M 为模拟值; S 为实测值; \bar{M} 为模拟平均值; \bar{S} 为实测平均值; n 为实测值个数。 $R_e > 0$, 模拟值偏大; $R_e < 0$, 模拟值偏小; $R_e = 0$, 模拟结果与实际情况恰好吻合。 R^2 的取值在 0~1 之间, $R^2 = 1$ 为变化趋势一致; $R^2 = 0$ 则为毫无关系; R^2 越大则说明模拟程度越好。 $E_s < 0$, 模型模拟结果不可信; $E_s = 1$, 模拟结果精确度较好;当 $E_s > 0.5$ 时,模型可采用。

1.3.2 土地利用动态度 单一土地利用类型动态度是指在一定时间范围内对某一个地区的某一种土地利用类型变化速率的定量分析,一般用 K 表示,计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: U_a, U_b 分别代表了在研究初期、末期同一种土地利用类型的总面积(km^2); T 表示研究时段长,当 T 的研究时段被设置为年时; K 值表示为该研究区某种土地利用类型年变化率^[18]。

1.3.3 土地利用变化的径流影响系数法 定义年平均径流量为 X ,各土地利用类型对年平均径流量 X 的影响系数为 M 。

年平均径流量 X_n 可以表示为在一定的时间步长内不同的土地利用类型对于径流量的影响程度之和,用下式表示:

$$X_n = M_a \times A_n + M_b \times F_n + M_c \times P_n + M_d \times H_n \quad (6)$$

式中: X_n 为年平均径流量; A_n, F_n, P_n, H_n 分别为耕地、林地、草地、高利用城市用地的面积; M_a, M_b, M_c, M_d 为相应的单位面积(km^2)的耕地、林地、草地、高利用城市用地等土地利用类型所影响的径流量,即径流影响系数,单位均为 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$; n 为不同的土地利用情景。不同的土地利用类型对径流的影响系数可正可负,当其为正时,代表该土地利用类型与径流变化方向相同,反之,代表该土地利用类型与径流变化方向相反^[19]。

2 SWAT 模型构建及模拟效果评价

2.1 SWAT 模型构建

2.1.1 模型数据输入 SWAT 模型输入主要由 DEM 数据、土壤数据库、气象资料数据库、土地利用数据库和水文资料数据库组成。根据模型所需的各种数据建立相应的数据库,并输入到 SWAT 模型中去,进行模型数据输入。

2.1.2 子流域划分及水文响应单元(HRU)的生成 HRU(Hydrologic Research Unit)为各子流域内具有相同土地覆被、土壤类型及坡度级数区域的组合,是 SWAT 模型运算的最基本单元。首先,基于预处理后的 DEM 数据,利用 ArcSWAT 自动分析功能和流域阈值将流域划分成 25 个子流域。然后,再通过土地利用数据、土壤数据和坡度数据来把上述的子流域仔细地分为 315 个水文响应单元,这些单元是一些具有独特的土地利用和土壤组合的区域。之后每一个 HUR 独立计算水循环的各个环节及其转化关系,最后汇总进入河网得到流域总径流。其中,为了保证模型的准确性,本文采用了一定的面积阈值生成水文响应单元,即土壤类型 15%、土地利用类型 10%、坡度类型 10%^[20]

2.2 模拟效果评价

在对 SWAT 模型参数进行校准和验证时,本次选择了基于 SUFI-2 算法的软件 SWAT-CUP 对该模

型的参数进行优选,之后结合率定结果进行手动调参,最终选择出对流域模拟径流敏感性较强的 8 个参数^[21-22],具体结果见表 2。

表 2 径流率定参数结果

参数	文件类型	参数值	含义
r_CN2	mgt	0.09	SCS 径流曲线值
v_ALPHA_BF	gw	0.52	基流系数 α
v_GW_DELAY	gw	555.94	地下水滞后时间
v_GWQMN	gw	1.16	浅层地下水径流系数
v_GW_REVAP	gw	0.08	地下水再蒸发系数
$r_SOL_BD(1)$	sol	0.82	第一土壤层含水容重
v_CH_N2	rte	0.15	河道曼宁系数
v_CH_K2	rte	96.13	主河道水力传导率

注: r,v 表示参数的修改方式。

表 3 模型模拟评价结果

时期	月均值		相对 误差 $R_e\%$	决定 系数 R^2	效率 系数 E_s
	实测值/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	模拟值/ $(m^3 \cdot s^{-1})$			
率定期(1988—1995 年)	172.12	181.71	5.57	0.87	0.86
验证期(1996—2000 年)	187.89	205.61	9.43	0.91	0.89

模型的模拟径流值与实际径流值的散点和线性方程见图 4,其中图 4A 为率定期的模拟—实测径流散点图和趋势线,散点大多都位于图中的趋势线附近,说明模拟值能够很好且较为准确的反映实际的径流,相关系数 R^2 能够达到 0.87。

图 4B 为验证期的模拟—实测径流散点图和趋势线,散点相较于率定期的散点发生了一部分的离

将 1987—1988 年设置为模型的预热期,1988—1995 年设置为模型校准期,1996—2000 年设置为模型验证期,对修河中上游流域月径流过程来进行模拟。使用相对误差 R_e 、决定性系数 R^2 和效率系数 E_s 来作为评价该模型在研究区内进行实际应用的适合度指标。一般情况下, E_s 大于 0.70, R^2 大于 0.70, R_e 小于 20%,可以认为模型模拟效果较好。

模拟结果及评价结果见表 3 和图 4,由表 3 可以看出,率定期和验证期的决定系数 R^2 分别为 0.87,0.91,径流量相对误差 R_e 分别为 5.57% 和 9.43%,Nash-Sutcliffe 效率系数 E_s 分别达到 0.86,0.89,二者 E_s 值均大于 0.7,表明模拟值接近观测者,且拟合度较高,模型适用于修河流域。

散,但大部分的散点依然主要集中在趋势线附近,并且对比验证期和率定期的径流的变化幅度,可以发现前者的幅度更大,且相关系数 R^2 大约为 0.91,表明验证期内模型对径流的模拟程度较好。因此,当前参数率定值可以满足修河中上游流域 SWAT 模型,且模型模拟的月径流量可信度较高,在研究区内的适用性较好。

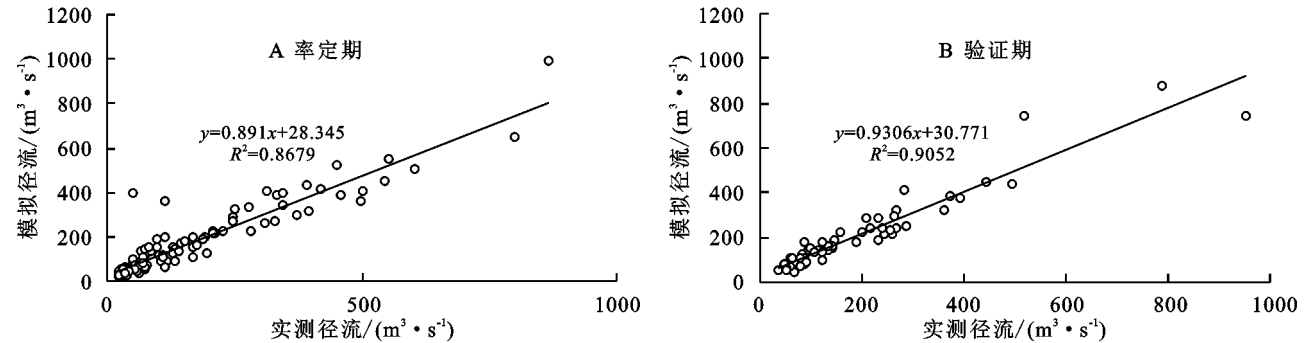


图 4 率定期和验证期月径流模拟—实测散点图

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用面积变化 利用 ArcGIS 软件的空间数据统计分析功能分别对 1980 年、1990 年、2005 年、2015 年的四期土地利用资料进行统计分析得到不同年份的各种土地利用类型面积占比及其年度变化率,见表 4。

由表 4 可知,修河中上游流域主要用地类型为林地、耕地和草地,三者面积之和所占比例较大,1980 年为 98.82%,1990 年为 98.75%,2005 年为 98.69%,

2015 年为 98.34%;而水域、高利用城市用地和低利用城市用地所占比例均较小。

从所研究时期的不同土地利用类型的面积变化趋势以及单一动态度来看,林地、耕地、草地整体均呈现下降趋势,水域、高利用城市用地、低利用城市用地整体均呈现上升的趋势。

其中,在 1980—2015 年期间,耕地呈现先增加后减少的变化趋势,整体减少了 13.17 km²,单一动态度为 -0.04%/a,整体变化较大。林地呈现先减少后增加最后减小的变化趋势,整体减少了 13.94 km²,单一动态度为 -0.01%/a,是流域内面积减少最多的

土地利用类型。高利用城市用地占流域总面积大约为0.52%,1980—2015年呈现先减少后增加的变化趋势,整体增加了19.77 km²,单一动态度为2.44%/a,是流域内变化幅度最大的土地利用类型。特别是2005—2015年较1990—2005年增长了约1 904.3%。低利用城市用地和水域在1980—2015年呈现出持续快速增长的变化趋势,分别比研究期的初期增加了

0.9 km²、5.87 km²,但由于低利用城市用地面积初始基数较小,仅为0.07 km²,故低利用城市用地成为流域内土地利用变化率最大的土地利用类型,单一动态度高达36.73%/a。草地面积在35 a间整体呈现先增加后减少最后增加的变化趋势,整体增加了0.57 km²,单一动态度为0.02%/a,是流域内变化幅度最小的土地利用类型。

表4 1980—2015年修河中上游流域土地利用变化情况

土地利用 类型	1980年		1990年		2005年		2015年		1980—1990年	1990—2005年	2005—2015年	1980—2015年	1980—2015年单一土地
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	变化面积/km ²	变化面积/km ²	变化面积/km ²	变化面积/km ²	利用动态度/(%·a ⁻¹)
耕地	887.71	16.23	887.8	16.23	882.75	16.14	874.54	15.99	0.09	-5.05	-8.21	-13.17	-0.04
林地	4419.33	80.79	4412.36	80.66	4418.28	80.77	4405.39	80.53	-6.97	5.92	-12.89	-13.94	-0.01
草地	98.72	1.80	102.02	1.86	97.11	1.78	99.29	1.82	3.3	-4.91	2.18	0.57	0.02
水域	41.47	0.76	44.28	0.81	47.26	0.86	47.34	0.87	2.18	2.98	0.08	5.87	0.40
高利用城市用地	23.16	0.42	23.15	0.42	24.09	0.44	42.93	0.78	-0.01	0.94	18.84	19.77	2.44
低利用城市用地	0.07	0.00	0.85	0.02	0.97	0.02	0.97	0.02	0.78	0.12	0	0.9	36.73
土地总面积	5470.46	100	5470.46	100	5470.46	100	5470.46	100					

总体而言,1980—2015年修河中上游流域的土地利用的变化情况为:整个研究期内林地的总面积虽然有所削减,但仍然是该流域内土地资源利用的主要类型;高利用城市用地面积的增加幅度最大,耕地面积减少幅度也较大,草地面积增加幅度较小,而耕地和草地在总体上均呈现减少的变化趋势,水域和低利用城市用地面积皆有所扩大。

3.1.2 土地利用时空变化 采用土地转移矩阵法来计算1980—2015年不同土地利用类型的变化,根据1980年、1990年、2005年、2015年4期的土地利用资料,利用ArcGIS空间数据分析的功能将不同时期的土地利用分类图进行元素融合、交叉、统计等,便可以直接得到每两个时期的数据的重叠部分,即为发生了变化的土地利用类型,而不相互重叠的部分则指的是相互转化的部分。据此可以得到不同土地利用类型之间的转移矩阵,反映出各类土地利用类型在不同时期内土地流转的方向和数量。流域内土地利用在时间和空间上的变化。

1980—2015年,修河中上游地区各类土地利用类型在时间和空间上的变化是可逆的,不仅存在着转出,而且会有其他土地利用类型的转入^[23]。其中,97.08%的耕地维持不变,剩下的主要向高利用城市用地和林地转化;林地维持99.20%的面积,剩下的分别向耕地、草地和高利用城市用地转化0.27%,0.28%和0.17%;草地面积转化幅度较大,有88.35%的面积保持不变,主要转化给林地10.39%和高利用城市用地1.08%;水域、高利用城市用地和低利用城市用地的转出面积非常少,转入面积反而比较多一些。从转入

面积数量上来看,研究区林地的转入面积的数量最多,增加的面积大多来自于耕地和草地,其次是高利用城市用地,一共转入了20.25 km²,包含有11.79 km²的耕地面积和7.38 km²的林地面积。因此,修河中上游流域不同土地利用类型之间有一个比较明显的转化方式,即林地、草地和耕地3种主要土地利用类型之间的相互转化和增加幅度最大的高利用城市用地所增加的面积主要来自于耕地和林地的转入。

3.2 土地利用变化对径流影响

结合修河流域4期土地利用变化情况发现,在1980—2015年,修河中上游流域水域面积和低利用城市用地面积扩大,林地面积大致趋向减少,耕地面积有所减少,高利用城市用地面积在2005—2015年增长最快,这与城镇化建设有一定关系。此外,从时间和土地流转关系上看,1980—2015年流域内土地利用变化有朝恶化发展的倾向,主要表现为耕地、林地向高利用城市用地转移,林地向耕地、草地转移,水域则来自于耕地和草地转移。

为了能够定量地分析研究期内的土地利用变化对流域径流的影响,研究选用SWAT模型进行模拟。首先通过输入1990年的土地利用资料建立SWAT模型来对其进行模型的校准和验证,然后以1980年、1990年、2005年和2015年的四期土地利用资料分别作为s₁,s₂,s₃,s₄的4种土地利用变化情景进行模拟,并始终保持模型中气候和土壤等因子不变,模拟得到4种情景下的月均径流值,最后计算出在不同的土地利用情景下流域的年平均径流量(表5)。由于模拟结果都是不同土地利用情景下的综合结果,不同土地

利用类型对径流的影响不同,同时在分析过程中因无法对单一类型的产流量进行校准,也不可能得到单一类型产流量,所以其模拟的径流量只表示变化趋势,评价分析也只能从综合影响上来进行。

表 5 4 种情景下径流变化与实际对比

时期	S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		实际年均径流/ (m ³ ·s ⁻¹)
	年均径流/ (m ³ ·s ⁻¹)	K/%	年均径流/ (m ³ ·s ⁻¹)	K/%	年均径流/ (m ³ ·s ⁻¹)	K/%	年均径流/ (m ³ ·s ⁻¹)	K/%	
1988—1991	147.56	-3.45	147.68	-3.37	147.59	-3.43	147.61	-3.41	152.83
1992—1995	139.44	-27.15	139.92	-26.90	139.51	-27.12	139.59	-27.07	191.41
1996—2000	187.69	-0.11	187.73	-0.09	187.68	-0.10	187.68	-0.11	187.89
1988—2000	160.50	-9.93	160.70	-9.82	160.52	-9.91	160.56	-9.89	178.19

注:K 为相当于实际径流变化的百分比。

从表 5 可以明显地看出,4 种土地利用变化情景下所模拟的修河中上游流域 1988—2000 年的年平均径流量在总体上均呈现明显的增长趋势,并且在涨落变化趋势上 4 种情境下模拟的径流与实测的径流之间具有很好的一致性,且 4 种已知情景下的年径流的变化趋势基本相同,说明所采用的模型参数能够代表修河中上游流域。

1980—2015 年模拟的年均径流量呈现出稍微增长的趋势,对该时段内土地利用的变化情况进行分析发现,1980—2015 年的林地面积和耕地面积不断地减少,高利用城市用地大幅的增加,草地的面积有小部分的增加。将研究时段内年均径流量变化趋势与土地利用的变化情况结合分析,在 1980—2015 年,随着城市化的进程不断深入和加快,耕地和林地的面积不断地被高利用城市用地所占用而不断地缩小,导致研究区内地表的不透水面积不断增加而极大地降低和减少了地表径流的入渗效率和入渗量,从而直接地造成了地表径流增加。

同时,耕地和林地也会有一部分面积转化为草地,草地对径流量具有吸收和调蓄的作用,从而起到减少一部分的径流量的作用,故在这一期间,城市化对径流的影响和耕地、林地转为草地的作用可以起到一定的正负抵消作用。这说明了高利用城市用地促进了径流的产生,林地和草地抑制了径流的生成。目前已经进行的研究也表明高利用城市用地具有促进径流的作用,而林地具有抑制径流的作用^[10];森林面积增加可以帮助提高大多数流域的涵养能力,减少径流量,而建设用地的增加将大大增加地表径流^[24]。因此,林地面积的变化对修河中上游流域径流起关键性作用。

由表 6 可知:研究区内的降水资源分布不均匀,时间上的差异性比较明显,4—9 月份降水总量占全年的时间段内降水总量的 69.1%。同时,年内径流量分配的比例差异也较大,4—9 月径流量占全年径流

量的 74.2%。考虑到林地对径流影响效果有一定的滞后性,根据 1988—2000 年不同土地利用情景下的季节性月径流,分析了土地利用变化对丰枯季节径流的影响。

对比 1980 年、1990 年、2005 年和 2015 年 4 种不同的土地利用情景下的季节性月径流,可以明显地看出在 6—8 月的丰水期,从 1980—2015 年模拟的月径流量呈现先开始减少后不断地增加的变化趋势,整体呈现显著的增加的趋势,再结合 s₁—s₄ 情景下土地利用类型的面积变化情况可以发现林地、草地的面积变化与径流的变化方向相反,即在 6—8 月的丰水期,林地、草地面积的减少将会导致径流量发生明显的增加。在 12 月至次年 2 月的枯水期,1980—2015 年模拟的径流量呈现先开始增加后减少最后稍小幅度地增加的变化趋势,整体呈现减少的趋势,再结合 s₁—s₄ 土地利用类型的面积变化情况可以发现林地、草地的面积变化与径流的变化方向相同,即在 12 月至次年 2 月的枯水期,林地、草地面积减少可以减少径流量。因此,从 1980—2015 年,林地和草地面积的减少引起流域内的季节性月径流发生了变化,主要表现为丰水期的径流增加,枯水期的径流减少,这说明林地和草地的减少会增加丰水期洪水灾害发生的频率和强度。该结论与国内的一些学者的结论较为一致,如依热下提·卡米力等^[10]对潘家口水库流域土地利用变化进行分析,并探究其对水文的响应作用,发现植被覆盖增加会降低汛期洪水灾害的发生的频率和强度。

综上所述,高利用城市用地对径流会起到促进的作用,林地和草地对径流产生抑制的作用;同时,林地、草地对径流的影响还会受到季节性因素的影响,丰水期时林地、草地面积的不断增加会对径流产生抑制的作用,从而减少径流量,而枯水期林地、草地面积的不断增加会对径流产生促进的作用,从而增加径流量,具有类似海绵的效果。

表 6 不同情景下季节性月径流量与实测径流对比

月份/ 情景	S ₁		S ₂		S ₃		S ₄		实测	
	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占比//%	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占比//%	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占比//%	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占比//%	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占比//%
3—5	219.71	34.22	220.17	34.25	219.73	34.22	219.80	34.22	257.01	36.06
6—8	289.01	45.02	289.00	44.96	289.04	45.01	289.07	45.01	294.17	41.27
9—11	70.73	11.02	70.72	11.00	70.75	11.02	70.74	11.01	74.34	10.43
12—2	62.54	9.74	62.88	9.78	62.57	9.74	62.61	9.75	87.22	12.24

3.3 不同土地利用类型对径流的影响系数分析

土地利用变化对径流的影响是基于多种土地利用类型综合影响的结果,尤其像修河中上游流域主要用地类型面积变化不超过 10%,故较难定量去分析主要土地利用类型对径流的影响。为解决这个问题,本文将 1990 年土地利用设置为基础情景,采用极端土地利用法构建了 4 种极端土地利用情景(表 7),进行极端情景下的径流模拟。并在假设气候等其他影响因素不变的情况下,通过不同土地利用类型面积的

变化和流域径流的变化关系,分析不同土地利用类型对流域径流的影响系数,反映出各土地利用类型对流域径流的作用程度。

因此,研究根据极端情景的土地利用情况,采用土地利用变化的径流影响系数法,通过将 5 期土地利用情景下模拟的计算得到的各年平均径流量带入公式(6),建立以下多元一次线性方程组(公式 7),借助 MATLAB 计算不同土地利用类型对径流的影响系数^[25](表 8)。

$$\begin{bmatrix} X_{sen1}-X_{s2} \\ X_{sen2}-X_{s2} \\ X_{sen3}-X_{s2} \\ X_{sen4}-X_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{sen1}-A_{s2} & F_{sen1}-F_{s2} & P_{sen1}-P_{s2} & H_{sen1}-H_{s2} \\ A_{sen2}-A_{s2} & F_{sen2}-F_{s2} & P_{sen2}-P_{s2} & H_{sen2}-H_{s2} \\ A_{sen3}-A_{s2} & F_{sen3}-F_{s2} & P_{sen3}-P_{s2} & H_{sen3}-H_{s2} \\ A_{sen4}-A_{s2} & F_{sen4}-F_{s2} & P_{sen4}-P_{s2} & H_{sen4}-H_{s2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \\ M_d \end{bmatrix} \tag{7}$$

表 7 修河中上游流域极端情景设置

情景	情景描述		备注
基础情景	S ₂	1990 年土地利用	
极端情景	sen1	保留水域、高利用城市用地和低利用城市用地,将草地、耕地全部设为林地	林地情景
	sen2	保留水域、高利用城市用地和低利用城市用地,将林地、耕地全部设为草地	草地情景
	sen3	保留水域、高利用城市用地和低利用城市用地,将林地、草地全部设为耕地	耕地情景
	sen4	保留林地、草地、水域和低利用城市用地,将耕地全部设为高利用城市用地	

表 8 不同土地利用类型对径流的影响系数

土地利用 类型	影响系数/ (m ³ ·(km ² ·h) ⁻¹)	Δ1980—1990 年/ (m ³ ·h ⁻¹)	Δ1990—2005 年/ (m ³ ·h ⁻¹)	Δ2005—2015 年/ (m ³ ·h ⁻¹)	Δ1980—2015 年/ (m ³ ·h ⁻¹)
耕地	1.32	-0.12	6.55	11.06	17.49
林地	-4.85	-32.67	28.45	-63.14	-67.37
草地	-6.48	20.93	-32.09	15.29	4.12
高利用城市用地	10.01	1.48	-9.73	-188.99	-197.27

注:Δ1980—1990 年、Δ1990—2005 年、Δ2005—2015 年、Δ1980—2015 年分别表示 1980—1990 年、1990—2005 年、2005—2015 年、1980—2015 年各土地利用类型对径流量的影响总量。

由表 8 可知,4 种土地利用类型对径流的影响系数按绝对值从大到小依次为高利用城市用地、草地、林地、耕地,这表明,就单位不同土地利用类型对流域径流的贡献力而言,有高利用城市用地>草地>林地>耕地。

具体而言,耕地对径流量的影响系数是一个正值,为 1.32 m³/(km²·h),这说明耕地面积变化与径流量变化方向相同,即当耕地面积增大时,径流量随之进行增大;当耕地面积减少时,径流量会减少。分

析其原因,主要是耕地的透水性较差,对地表水的下渗作用不够强,降水易形成直接的径流,下渗相对较小,从而达到增加径流量的作用。研究时段内,1980—2015 年耕地面积不断缩小,这就造成了径流量逐渐减少。林地单位面积的变化对径流量的影响系数为-4.85 m³/(km²·h),这说明林地在改变径流量的过程中发挥着负效应的作用。即林地面积的扩大会导致径流量减小,而林地面积缩小,径流量则

呈上升的趋势。这是因为林地相对于耕地而言,在降雨时能够对径流起到一定的截留作用,随之导致径流量发生减小。从时间上来看,1980—2015年森林用地面积的波动较大,总体上呈现出不断减少的趋势,用地面积不断被其他类型的土地利用方式所占用,使得径流量持续增加。草地的径流影响系数为 $-6.48 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$,说明草地在研究区内会抑制径流的产生,即草地面积变化与径流量变化之间呈现出相反的变化方向。研究期间内,随着研究区域周边各个地方城市化的不断推进和发展,草地所占用的面积先增加后减少最后再增加,总体而言呈现出小幅度减少的趋势,而草地不仅对径流量起到一定的调蓄和吸收作用,同时可增加土壤的抗冲性。因此,1980—2015年草地总面积的小幅度地减少,造成径流量随之稍微有所增加。高利用城市用地对径流的影响系数是4种土地利用类型中最大,为 $10.01 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$,表明高利用城市用地对径流起到非常大的促进的作用,高利用城市用地的面积变化与径流量的变化呈正相关;在所研究的时段内,1980—2015年,城市化快速发展,高利用城市用地的用地规模持续地扩大,这就会使得径流量开始不断地增加。但是,由于高利用城市用地面积占流域总面积的比重较小,最多约占总流域面积的0.78%,对径流的影响总量远远地低于林地。该结论与一些学者研究结果较为一致,如傅春等^[18]研究了抚河流域的径流对土地利用变化的时空响应,结果表明林地、草地面积增加会使得径流发生减少,而耕地和城镇用地面积增加将导致径流的增加;刘磊等^[26]在云龙水库流域的研究表明耕地对径流起增加的作用,林地和草地对径流具有减少的作用。

由以上的分析可知,就单位不同土地利用类型对流域径流的贡献力而言,有高利用城市用地>草地>林地>耕地。且耕地和高利用城市用地对径流起促进作用,当耕地面积和高利用城市用地面积越来越多时,径流也会随之不断增多;而林地、草地对径流的影响系数均为负值,说明林地、草地均对径流有一定的抑制作用。当林地和草地面积在不断增大时,就会使得径流不断减少,且草地对于径流抑制作用要超过林地。同时,结合1988—2000年修河流域中上游的年份径流量变化呈现增加趋势,这更好说明研究区内要实施退耕还林还草政策的正确性与必要性。

4 结论

(1) 修河中上游流域主要用地类型为林地、耕地和草地,三者面积之和占流域的98%以上。随着时间的迁移,林地、耕地、草地均呈现下降的趋势,高利用城市用地、水域和低利用城市用地均呈现上升的趋势,高利用城市用地的面积增加的幅度最大,低利用

城市用地的年变化速率最快。

(2) 建立了修河中上游流域的SWAT模型,校准期和验证期的效率系数 E_s 、决定性系数 R^2 和相对误差 R_e 均能够较好地符合标准,说明SWAT模型对修河中上游流域具有良好的适用性,且模拟效果较好。

(3) 就单位土地利用面积对径流的影响程度而言,有高利用城市用地>草地>林地>耕地。高利用城市用地和耕地对径流的影响系数是一个正值,说明高利用城市用地和耕地具有促进径流的作用,林地和草地对径流的影响系数均为负值,说明林地和草地均对径流存在抑制作用,且草地的抑制作用更加明显。林地、草地对径流的影响会受到季节性因素影响,丰水期林地、草地总面积的增加会相应地减少径流量,枯水期林地、草地总面积的增加反而可以增大径流量,这说明林地、草地对径流有类似海绵的作用性,对流域的径流调节至关重要。

(4) 目前修河中上游流域土地利用开始出现恶性发展的倾向,若按现状发展,未来的径流可能会急剧增加,引发洪涝灾害频发、城市内涝等问题。由于研究区域属于修河中上游,是重要的水源涵养区,当前研究区域内林地面积较多,可以以维持和提高林地面积和质量为重点,对流域土地利用进行规划,必要时可采取退耕还林还草等措施,减轻由林地、草地大面积减少,植被退化等带来洪涝灾害、生态环境恶化等问题。

本次研究就土地利用变化对流域径流影响进行了分析,取得了一些初步的研究成果。但是,由于在进行研究时资料获取和数据的精度存在一定局限性,本次研究中仍然存在一些问题与不足之处,需要进一步的完善和改进,特别是探究土地利用变化的驱动因素以及各种土地利用变化对环境、经济的影响程度和综合气候变化因子和土地利用变化来分析二者对径流影响的大小程度,将是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] Nian Y Y, Li X, Zhou J, et al. Impact of land use change on water resource allocation in the middle reaches of the Heihe River Basin in northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2014,6(3):273-286.
- [2] 余新晓,张满良,信忠保,等.黄土高原多尺度流域环境演变下的水文生态响应[M].北京:科学技术出版社,2011:96-121.
- [3] Matheussen B, Kirschbaum R L, Goodman I A, et al. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin(USA and Canada)[J]. Hydrological Processes, 2000,14(5):867-885.
- [4] Debbage N, Shepherd J M. The influence of urban development patterns on streamflow characteristics in the Charlanta Megaregion[J]. Water Resources Research,

- 2018, 54(5): 3728-3747.
- [5] 李慧, 周维博, 马聪, 等. 城市化对西安市降水及河流水文过程的影响[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 322-331.
- [6] 张国栋, 张照玺, 余韵, 等. 汾河上游土地利用变化对径流的影响研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(10): 29-33.
- [7] 葛志楠, 郝洁, 鞠琴, 等. 渭河流域土地利用变化对径流的影响[J]. 人民黄河, 2020, 42(6): 7-12, 17.
- [8] 刘斯文, 刘海隆, 王玲. 开都河流域土地利用/覆被变化对径流的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 22-26.
- [9] 李建庆, 罗显刚, 朱双, 等. 北江流域土地利用/覆被变化对水文过程影响研究[J]. 人民长江, 2020, 51(8): 89-94, 129.
- [10] 许有鹏, 丁瑾佳, 陈莹. 长江三角洲地区城市化的水文效应研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 67-73.
- [11] 依热下提·卡米力, 李建柱, 冯平, 潘家口水库流域土地利用变化的水文响应分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 47-51.
- [12] 黄一鹏, 刘卫林, 万一帆, 等. 基于 SWAT 模型的修河上中游流域径流与气候变化响应研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(11): 16-23.
- [13] 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.
- [14] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811.
- [15] 曾秀俐. 基于 SWAT 模型的邕江流域土地利用/覆被变化及其水文效应研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [16] 姚海芳, 师长兴, 邵文伟, 等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 139-144.
- [17] 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.
- [18] 王磊, 刘亭亭, 谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 245-251.
- [19] 王磊. 清水河流域土地利用变化对径流的影响研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2018.
- [20] 陈曼雨, 崔远来, 郑世宗, 等. 基于 SWAT 模型的农业面源污染尺度效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 187-191.
- [21] 黎明. 基于 SWAT 的北江流域土地覆盖及气象条件变化的水文响应模拟研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- [22] 李帅, 魏虹, 刘媛, 等. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1252 年-1260.
- [23] 郝振纯, 苏振宽. 土地利用变化对海河流域典型区域的径流影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 491-499.
- [24] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 885-900.
- [25] 赵素霞. 基于多目标决策的耕地保有量目标预测研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4219-4222.
- [26] 刘磊, 邹进, 陈欣, 等. 土地利用变化对云龙水库流域径流的影响[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2021, 38(5): 33-39.

(上接第 110 页)

- [32] 李辉霞, 刘淑珍, 钟祥浩, 等. 基于 GIS 的西藏自治区冻融侵蚀敏感性评价[J]. 中国水土保持, 2005(7): 44-46.
- [33] 张娟, 沙占江, 王静慧, 等. 基于遥感和 GIS 的青海湖流域冻融侵蚀研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 375-381.
- [34] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化时空变化遥感分析[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 529-536.
- [35] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 75-81.
- [36] 张立新, 赵少杰, 蒋玲梅. 冻融交替季节黑河上游代表性物类型的微波辐射时序特征[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 198-206.
- [37] 潘卫东, 余绍水, 贾海锋, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区地温场变化规律[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 774-779.
- [38] Chen J, Zheng X, Zang H, et al. Numerical simulation of moisture and heat coupled migration in seasonal freeze-thaw soil media[J]. Journal of Pure and Applied Microbiology, 2013, 7: 151-158.
- [39] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927.
- [40] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012 [J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.
- [41] Li L, Zhang Y, Liu L, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation greenness change and associated climatic and anthropogenic drivers on the Tibetan Plateau during 2000—2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1525.
- [42] Li L, Zhang Y, Wu J, et al. Increasing sensitivity of alpine grasslands to climate variability along an elevational gradient on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2019, 678: 21-29.