

# 基于 SWAT 模型的喀斯特流域产流特征对石漠化治理措施的响应

袁江<sup>1,2</sup>, 李瑞<sup>1,2</sup>, 舒栋才<sup>3</sup>, 黄凯<sup>1,2</sup>, 盘礼东<sup>1,2</sup>, 张琳卿<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

**摘要:** 为探讨适合于西南喀斯特地区石漠化治理的有效生物措施, 以典型喀斯特流域——打邦河为研究区, 以 SWAT 模型模拟为基本研究手段, 以打邦河流域黄果树水文站、高车水文站连续多年实测水文数据作为基础率定资料, 设置 6 种石漠化治理措施情景, 分别模拟各治理措施的产流特征, 从产流特征探讨不同措施的生态效益。结果表明: (1) 率定期(2008—2013 年)黄果树水文站  $R^2=0.86$ ,  $NSE=0.77$ , 高车水文站  $R^2=0.76$ ,  $NSE=0.63$ ; 验证期(2014—2018 年)黄果树水文站  $R^2=0.79$ ,  $NSE=0.57$ , 高车水文站  $R^2=0.75$ ,  $NSE=0.54$ , 均符合模型的评价标准, 表明 SWAT 模型在打邦河流域具有较好的适用性; (2) 坡度  $15^\circ$  以上有林地、经济林和牧草地较坡耕地蓄水截流效果较好。坡度  $15^\circ\sim 25^\circ$ , 以及  $25^\circ$  以上, 蓄水截流效果均表现为经济林 > 牧草地 > 有林地; (3) 经济林 + 牧草地措施一方面可以有效缓解打邦河流域工程性缺水的问题, 另一方面基于潜在的经济效益, 优化调整当地坡耕地种植结构, 可实现区域农业可持续发展。结果可为西南喀斯特地区石漠化治理、生态恢复和乡村振兴提供理论参考, 对促进喀斯特流域社会经济可持续发展具有一定的参考意义。

**关键词:** SWAT 模型; 产流特征; 石漠化; 治理措施; 喀斯特

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0151-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.021

## Response of Runoff Characteristics of Karst Watershed to Rocky Desertification Control Measures Based on SWAT Model

YUAN Jiang<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>, SHU Dongcai<sup>3</sup>, HUANG Kai<sup>1,2</sup>, PAN Lidong<sup>1,2</sup>, ZHANG Lingqing<sup>1,2</sup>

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001; 3. Guizhou Bureau of Hydrology and Water Resources, Guiyang 550002)

**Abstract:** In order to explore the effective biological measures suitable for the control of rocky desertification in karst area of Southwest China, the Dabang River, a typical karst basin, was taken as the research area. Using the SWAT model simulation method, the long-term measured hydrological data from the Huangguoshu and Gaoche hydrological stations were used for calibration. Totally six scenarios of rocky desertification control measures were set up to simulate the runoff generation characteristics. And finally, the ecological benefits of different measures were discussed. The results showed that: (1) In the calibration period (2008—2013), as for Huangguoshu hydrological station,  $R^2=0.86$ ,  $NSE=0.77$ , while for Gaoche hydrological station,  $R^2=0.76$ ,  $NSE=0.63$ ; and during the verification period (2014—2018), the  $R^2$  of Huangguoshu hydrological station was 0.79,  $NSE$  was 0.57, while the  $R^2$  of Gaoche hydrological station was 0.75,  $NSE$  was 0.54, which all met the evaluation criteria of the model, indicating that SWAT model had good applicability in Dabang River Basin. (2) When the slope was greater than  $15^\circ$ , the effects of water storage and interception of woodland, economic forest and grass land were better than that of farmland. When the slope was between  $15^\circ$  and  $25^\circ$ , and above  $25^\circ$ , the effects of water storage and interception were: economic forest > grassland >

收稿日期: 2021-06-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“轻—中度喀斯特石漠化区岩溶裸露对坡面水土流失的响应及机制研究”(32060372); 国家自然科学基金项目“喀斯特区典型石漠化坡耕地覆盖措施水土流失调控效应”(31760243)

第一作者: 袁江(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 15339345260@163.com

通信作者: 李瑞(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: rlfer@126.com

woodland. (3) On the one hand, the economic forest + grassland measure could effectively alleviate the problem of engineering water shortage in Dabang River Basin; on the other hand, based on the potential economic benefits, optimizing and adjusting the planting structure of local farmland could realize the sustainable development of regional agriculture. These results could provide theoretical reference for rocky desertification control, ecological restoration and Rural Revitalization in southwest karst area, and have certain reference significance for promoting social and economic sustainable development of karst basin.

**Keywords:** SWAT model; characteristics of runoff generation; rocky desertification; governance measures; karst

岩溶石漠化是指在热带、亚热带湿润、半湿润气候条件和岩溶极其发育的自然背景下,受人类活动干扰,使地表植被遭受破坏,造成土壤严重侵蚀,基岩大面积裸露,土地和岩溶生态系统退化的极端表现形式<sup>[1]</sup>,中国西南地区是世界集中连片岩溶分布区之一,包括云、贵、川、渝、粤、桂、鄂、湘八个省(市、自治区)<sup>[2]</sup>,喀斯特连片分布面积高达 54 万 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。该区碳酸盐岩广泛出露,地质构造复杂,地表持水和调控能力低,可利用水资源少且利用困难,工程性缺水问题突出;成土物质不足,土壤资源短缺,耕地资源有限且旱涝不保收的贫瘠山地比重较大,人口密度大、经济落后及农业活动强度高,导致人地矛盾尖锐,土地利用不合理,水土流失严重,石漠化问题突出。水土流失加剧、土壤肥力下降、生物多样性降低等生态问题,以及人口贫困、经济与科技文化落后等社会经济问题都是石漠化的衍生结果,成为我国西南喀斯特地区社会经济发展的瓶颈<sup>[4]</sup>。自“十一五”以来,国家逐渐加大了对西南地区石漠化的治理力度,但需加大治理效果的评价,尤其是不同治理措施径流拦蓄效果缺少定量评价。

SWAT(soil and water assessment tool)模型是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的分布式流域水文模型,可以模拟复杂流域的水文与物质循环变化过程、流域尺度各种土地管理(治理)措施对水文过程的影响<sup>[5]</sup>、不同土地利用类型下流域径流的变化及灵活地调整土地利用/覆被变化的情景<sup>[6]</sup>。自 SWAT 模型开发以来,就广泛应用于欧洲、美洲、亚洲等地区,如 Rebeca 等<sup>[7]</sup>将 SWAT 模型应用在智利中南部安达利安河流域,分析了该流域 3 种土地利用/覆盖情景(LU\_1986、LU\_2001 和 LU\_2011),结果表明,在 3 种 LU 情景中,年总流量明显减少,水资源调控作用显著加强。美国东南部北卡罗莱纳州基于 SWAT 模型的相关研究<sup>[8]</sup>发现,森林再生以及农用地的减少均有助于蓄水截流。同样基于 SWAT 模型,越南胡志明市土地利用变化对地下水补给的影响研究<sup>[9]</sup>结果认为,补给量增加在城市化程度较低的地区,年平均增长率最高可达 15%,而最大减少量为中等城市化情景下的年平均

值。SWAT 模型同样在我国水文过程相关研究中得到了较为广泛的应用,取得了一定的成果。如王高丹等<sup>[10]</sup>以洪汝河流域为研究区,在该流域设置 4 种土地利用情景,利用 SWAT 模型进行径流模拟发现,退耕还林使径流减少,而增加耕地开垦或城市建设用地则会增加地表径流。潮河流域土地利用和气候变化对流域径流变化的影响研究<sup>[11]</sup>表明,灌木林措施产流增加 158.2%,草地种植措施产流增加 4.1%,而林地种植措施条件下,产流明显减少。窦小东等<sup>[12]</sup>运用 SWAT 模型通过设置不同情景,定量分析了澜沧江流域土地利用、土地覆被变化和气候变化对径流的影响发现,SWAT 模型在澜沧江流域径流模拟中具有很好的适用性,流域内的农业用地转化为林地或草地,均会导致径流量的减少,而林地转化为草地则会引起径流量的增加。

总体来说,SWAT模型在模拟流域水文过程与不同土地利用方式(治理措施)、气候变化等响应关系的研究实践中,具有较好的适用性,但我国西南喀斯特地区由于特殊的岩溶地貌,相关研究较少,模型在区域的适用性有待进一步验证。本文所选研究区—打邦河流域是北盘江一级支流,属典型喀斯特流域,选取该流域开展流域水文过程对石漠化治理措施的响应相关研究具有一定的现实和理论意义,可填补区域相关研究的不足,为区域石漠化治理和效益评价提供参考。本文的主要研究目的:(1)验证 SWAT模型在喀斯特地区的适用性;(2)评价不同石漠化生物治理措施的径流拦蓄效果;(3)为区域石漠化治理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

打邦河是贵州省境内北盘江一级支流,由六盘水市六枝特区西侧三丈水发源地,干流流经六枝特区、镇宁自治县、关岭自治县,于镇宁县良田乡董岗注入北盘江,主要支流有可布河、王二河及其支流。干流长 110 km,总落差 1 071 m,流域地理坐标 25°30′—26°15′N,105°10′—106°50′E,全流域涉及的行政区有安顺市西秀区、镇宁县、关岭县、普定县及六盘水市六枝特区等 2 区(特区)3 县,共计 40 个乡镇(图 1)。流域

地处云贵高原斜坡面的北东向褶皱带,属平缓山原丘陵地貌,多峰丛洼地和河间盆地,地势西北高东南低。气候属亚热带湿润季风气候,河谷具有典型亚热带气候特点,冬春干旱,夏季湿润温和,河谷地带冬季温暖,夏季炎热,年平均气温 19.7℃。极端最高气温 33.4℃,极端最低气温 -8.5℃,流域多年平均降水量 1 279.4 mm,年内分配不均匀,多集中在 7—9 月。研究区主要土壤类型为黄壤、红壤、砖红壤性红壤等。打邦河流域内岩溶强烈发育,其表现形式多洞穴井泉、漏斗、洼地及伏流,全流域喀斯特面积占 74.0%~85.5%,水土流失面积 37%,石漠化面积 32%,是世界上最为典型的喀斯特流域之一<sup>[13]</sup>。

流域内有高车(25°52'N,105°40'E)、黄果树(25°59'N,105°40'E)2 个水文站,其中下游干流高车水文站集水面积占全流域面积的 78.6%,多年平均流量为 45.5 m<sup>3</sup>/s,多年平均年总径流量 14.33 亿 m<sup>3</sup>,多年平均径流深 668 mm,多年平均径流系数为 0.52<sup>[13]</sup>。

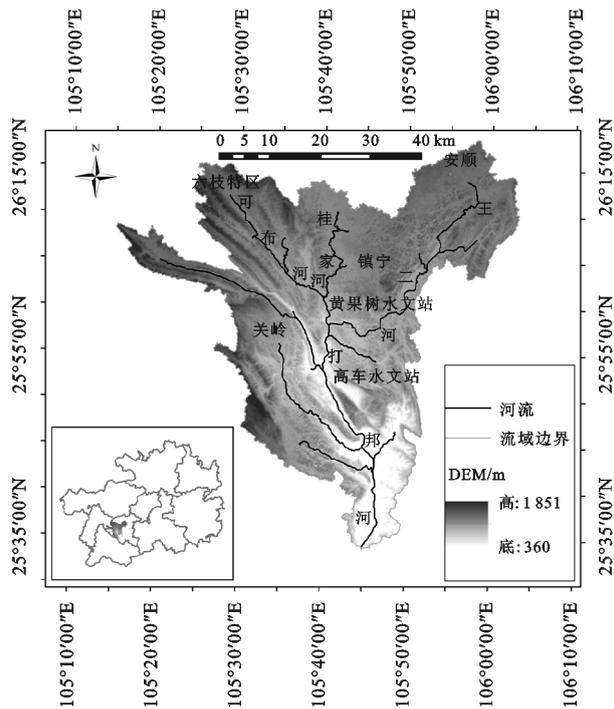


图 1 研究区 DEM 图及地理位置

## 1.2 数据来源与处理

本文采用的数据包括构建 SWAT 模型所需要的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用数据、土壤数据、水文数据以及气象数据,所用数据均采用 Beijing\_1954\_3\_Degree\_GK\_CM\_108E 投影。研究区涵盖 19 个站点的数据(表 1)。

(1)DEM 数据是从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载的 GDEM V2 数据,空间分辨率为 30 m。使用 Arc-GIS 软件对 DEM 数据进行掩膜、投影变换、填充、流向和流量分析、河流连接、河网提取等预处理操作,获得研究区范围的 DEM 数据(图 1)。

(2)土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,通过重分类主要分为水田(16.74%)、旱地(13.44%)、有林地(27.96%)、灌木林(4.62%)、经济林(0.04%)、牧草地(26.55%)、干草地(6.91%)、河渠(0.07%)、水库坑塘(0.77%)、城镇用地(1.16%)、农村用地(0.74%)、其他建设用地(0.98%)、裸土地(0.01%)和裸岩石质地(0.01%)(图 2a)。

(3)土壤数据是通过黑河数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/data/611f7d50-b419-4d14-b4dd-4a944b141175>)下载的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD),分辨率为 1 km,模型所需的大部分物理参数可以通过 HWSD 属性表直接获取,将属性表中黏土含量、沙土含量、砾石含量、土壤电导率和土壤有机质含量(土壤有机碳含量除以 0.58)输入 SPAW(Soil-Plant-Atmosphere-WATER)软件中计算得到土壤湿密度(SOL\_BD)、土壤层有效持水量(SOL\_AWC)、饱和水力传导系数(SOL\_K)等其他参数。土壤可蚀性因子采用 Williams 等<sup>[14]</sup>的经验公式进行计算(公式 1),涉及的土壤质地相关参数来自 HWSD 数据库。其他获取较难的参数均采用模型默认值,之后写入建立的 SWAT 工程,建立土壤数据库(图 2b)。

$$K = 0.1317 \times \{0.2 + 0.3 \times \exp[-0.0256 S_a (1 - \frac{S_i}{100})]\} \times (\frac{S_i}{S_i + Cl})^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25 C_{or}}{C_{or} + \exp(3.72 - 2.95 C_{or})}\right] \times \left[1 - \frac{0.75 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_n)}\right] \quad (1)$$

式中: $S_a$ 为沙粒(%); $S_i$ 为粉粒(%); $Cl$ 为黏粒(%); $C_{or}$ 为有机质(%); $S_n = 1 - \frac{S_a}{100}$ 。

(4)水文数据由贵州省水文水资源局提供,包括打邦河流域高车水文站和黄果树水文站 2008—2018 年逐日流量观测数据。

(5)气象数据采用孟现勇建立的数据集 CMADS V1.2(SWAT 模型中国大气同化驱动数据集,<http://www.cmads.org>)。SWAT 模型可直接使用该数据集而不需要任何格式转换。CMADS V1.2 的空间分辨率为  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ,空间覆盖范围为东亚( $0-65^\circ N, 60-160^\circ E$ ),站点数量有 416 000 站,提供日平均温度,日最高/低温度,日累计 24 h 降水量,日平均太阳辐射,日平均气压,日比湿度,日相对湿度,日均风速等要素,时间尺度为 2008—2018 年。

## 2 研究方法

### 2.1 SWAT 模型模拟

SWAT 模型是基于 DEM 数据提取流域的河网

分布,通过河网分布将整个流域划分为一定数目的子流域,之后将每一个子流域再划分为若干个水文响应单元(hydrologic response unit, HRU),每个 HRU 是在同一个子流域内有着相同的土地利用类型、土壤类型和坡度的区域<sup>[15]</sup>。之后通过气象数据与模型的耦合,以 HRU 为最小模拟单元,在每个 HRU 内单独进行径流过程模拟,通过叠加得到子流域径流模拟值,最终在流域内河网汇集的条件下得到整个流域的总径流模拟值。SWAT 模型在径流过程模拟时,遵循水量平衡方程,其计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{deep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (2)$$

式中: $SW_t$ 为土壤最终含水量(mm); $SW_0$ 为土壤初期含水量; $t$ 为时间步长(d); $R_{\text{day}}$ 为第  $i$  天的降雨量(mm); $Q_{\text{surf}}$ 为第  $i$  天的地表径流量,与流域内各土地利用类型和平均坡度直接相关; $E_a$ 为第  $i$  天地表蒸发量(mm); $W_{\text{deep}}$ 为第  $i$  天透过土壤层的渗透量和侧流量(mm); $Q_{\text{gw}}$ 为第  $i$  天的地下水含量(mm)。

表 1 打邦河流域 CMADS V1.2 站点分布

序号	站点名	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
1	206-367	105°46'	25°39'	509
2	207-365	105°31'	25°46'	1572
3	207-366	105°39'	25°46'	1090
4	207-367	105°46'	25°46'	825
5	208-365	105°31'	25°54'	1430
6	208-366	105°39'	25°54'	633
7	208-367	105°46'	25°54'	1074
8	209-364	105°24'	26°01'	1295
9	209-365	105°31'	26°01'	1258
10	209-366	105°39'	26°01'	1091
11	209-367	105°46'	26°01'	1325
12	210-363	105°16'	26°09'	1455
13	210-364	105°24'	26°09'	1491
14	210-365	105°31'	26°09'	1272
15	210-366	105°39'	26°09'	1270
16	210-367	105°46'	26°09'	1320
17	210-368	105°54'	26°09'	1309
18	210-369	106°01'	26°09'	1303
19	211-368	105°54'	26°16'	1475

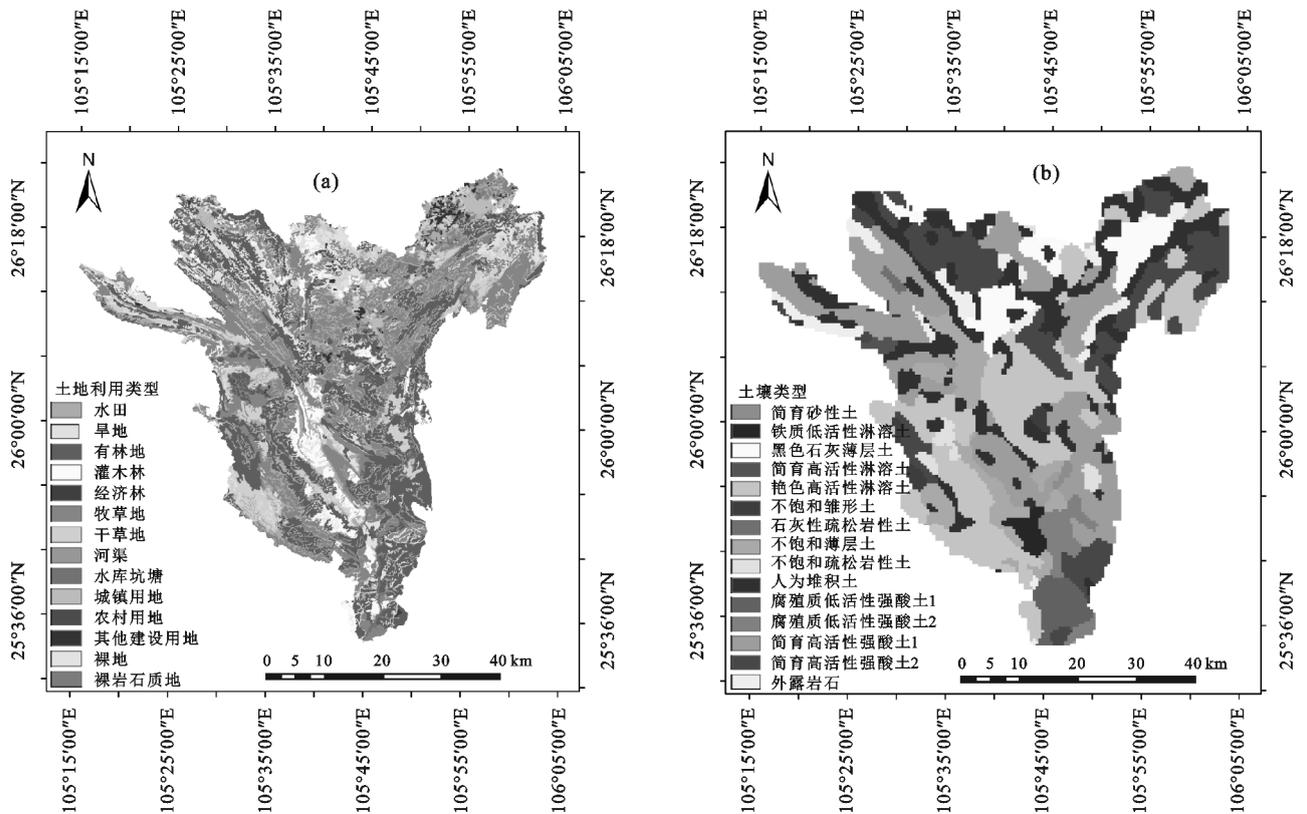


图 2 打邦河流域土地利用类型及土壤类型

2.1.1 SWAT 模型设置 输入 DEM 数据用于生成流域河网水系和分割子流域,并将 DEM 的高程单位替换为米。因研究区率定所用到的 2 个水文站不在河流干流上,故基于流域划分界面的添加子流域出口点功能模块手动添加子流域出水口,采用作垂线的方法在上述 2 个水文站最近的河道上设置 2 个出水口,最后将研究区划分成 33 个子流域,手动添加的子流域出水口分别位

于第 15 号子流域和第 26 号子流域。然后通过各子流域内部土地利用、土壤类型和坡度(根据 SL 190—2007,将坡度分级,分别是  $5^\circ \sim 8^\circ$ ,  $8^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 35^\circ$ ,  $>35^\circ$ ,将第 1 级别设置为  $0 \sim 8^\circ$ )的叠加统计分析,生成 1 105 个水文响应单元,并将土地利用类型、土壤类型和坡度的阈值均设为 10%,即每个子流域的某种土地利用和土壤类型的面积比  $<10\%$  时,其在模型模拟中将被不

考虑,之后重新计算剩下的土地利用和土壤类型的面积比,目的是将整个子流域的面积得到 100% 的模拟。之后写入日平均温度、日最高/低温度、日累计 24 h 降水量、日平均太阳辐射、日平均气压、日比湿度、日相对湿度、日均风速等气象数据,因为输入降雨数据的步长为日,故采用 SCS(公式 3)<sup>[17]</sup> 曲线法计算每个 HRU 上产生的地表径流,再通过流域内部河网的汇流而得到整个流域的径流模拟值。

$$Q_{\text{surf}} = \frac{R_{\text{day}} - I_a^2}{R_{\text{day}} - I_a + S} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{surf}}$  为累计径流量或净雨( $\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ); $R_{\text{day}}$  为第  $i$  天的降水量; $I_a$  为初损,包括地表蓄水、截流和产流前的下渗( $\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ); $S$  为持蓄系数( $\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$ )。

2.1.2 模型的参数敏感性分析 SWAT 模型参数繁多,为了提高模型的校准效率,在模型校验之前进行参数的敏感性分析以减少需要调整的参数。本文选取

表 2 参数敏感性分析

敏感性排序	参数	参数含义	$t$ -Stat 值	$P$ -Value 值	参数最优值
1	CANMX	最大冠层蓄水量	-1.79	0.08	3.00
2	GWQMN	浅层地下水径流系数	1.56	0.13	0.70
3	SOL_BD	表层土壤湿容重	-1.34	0.19	1.87
4	ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 系数	-1.24	0.22	0.89
5	ALPHA_BNK	河道调蓄系数	1.18	0.25	0.27
6	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	-1.01	0.32	0.11
7	SOL_AWC	土壤可利用水量	0.68	0.50	0.12
8	REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	0.46	0.65	357.27
9	CH_K2	河道有效水力传导系数	-0.32	0.75	58.51
10	CN2	SCS 径流曲线系数	-0.31	0.76	-0.20
11	SFTMP	降雪气温	-0.25	0.80	2.10
12	SOL_ALB	潮湿土壤反映率	0.23	0.82	0.22
13	CH_N2	主河道曼宁系数值	0.20	0.84	0.29
14	BIOMIX	生物混合效率系数	0.17	0.87	0.51
15	GW_DELAY	地下水滞后系数	-0.14	0.89	101.40
16	ESCO	土壤蒸发补偿系数	-0.10	0.92	0.97

2.1.3 模型的率定与验证 利用研究区的实测径流数据对模型进行参数率定,是为了找出能使模拟值与观测值之间最相近的参数值。本研究利用 SWAT-CUP 工具里的 SUFI-2 算法对上述敏感性最高的 16 个参数进行率定与验证,数据选用流域内黄果树、高车水文站 2008—2018 年的逐月平均流量,将 2008—2013 年设为率定期,2014—2018 年设为验证期。本文选取纳什效率系数 NSE 和决定性系数  $R^2$  评价模型在研究区的适用性。

纳什效率系数 NSE 用以表征模型的总体效率,其值与模型的可信度成正比关系,计算公式为<sup>[19]</sup>:

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

决定性系数  $R^2$  用以表征模型的模拟值与实测值之间

瑞士联邦水科学与技术研究所(EAWAG)研发的 SWAT 率定与不确定性分析工具 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对所构建的 SWAT 模型进行参数敏感性分析、率定、验证和不确定性分析。SUFI-2 算法是一种综合优化和梯度搜索方法,不仅可以同时率定多个参数,而且具有全局搜索的功能,同时还考虑了输入数据、模型结构、参数及实测数据的不确定性<sup>[18]</sup>。对研究区内 2 个水文站的径流参数进行敏感性分析,敏感性的强弱用  $t$ -Stat 和  $P$ -Value 2 个检验值来表示, $t$ -Stat 检验值表示每个样本的相对显著性, $P$ -Value 则是  $t$  检验值表对应的  $P$  概率值。敏感性的高低用  $t$ -Stat 检验值的绝对值和  $P$ -Value 值来判断, $t$ -Stat 绝对值越大且  $P$ -Value 值越接近于 0,参数敏感性则越高。在 SWAT-CUP 里通过 500 次迭代,按照敏感程度由高到低选取前 16 个敏感程度较高的参数,再经多次迭代运算计算出最佳参数值(表 2)。

的变化趋势,当  $R^2$  越接近于 1,模拟效果越好,计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum (M - \bar{M})(S - \bar{S})}{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2 \sum (S - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

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。

## 2.2 石漠化治理措施设置

在模型模拟精度达标的基础上,结合打邦河流域石漠化治理现状及主要治理措施,设置不同石漠化治理措施,通过 SWAT 模型模拟不同治理措施下的产流状况,7 种措施情景设置见表 3。

## 3 结果与分析

### 3.1 SWAT 模型模拟结果分析

本研究对基于 SWAT 模型的打邦河流域产流过程模拟进行率定与验证,研究区内黄果树水文站、高

车水文站的月径流的率定与验证结果见图 3。2 个水文站的月率定期与验证期的评价指标结果见表 4。

表 3 对照和 6 种石漠化治理措施及转化说明

治理措施	情景转化说明
对照	以打邦河现状植被措施为对照
林地	15°以上水田、旱地转化为有林地
经济林	15°以上水田、旱地转化为经济林
牧草地	15°以上水田、旱地转化为牧草地
经济林+林地	15°~25°水田、旱地转化为经济林,25°以上水田、旱地转化为有林地
经济林+牧草地	15°~25°水田、旱地转化为经济林,25°以上水田、旱地转化为牧草地
牧草地+林地	15°~25°水田、旱地转化为牧草地,25°以上水田、旱地转化为有林地

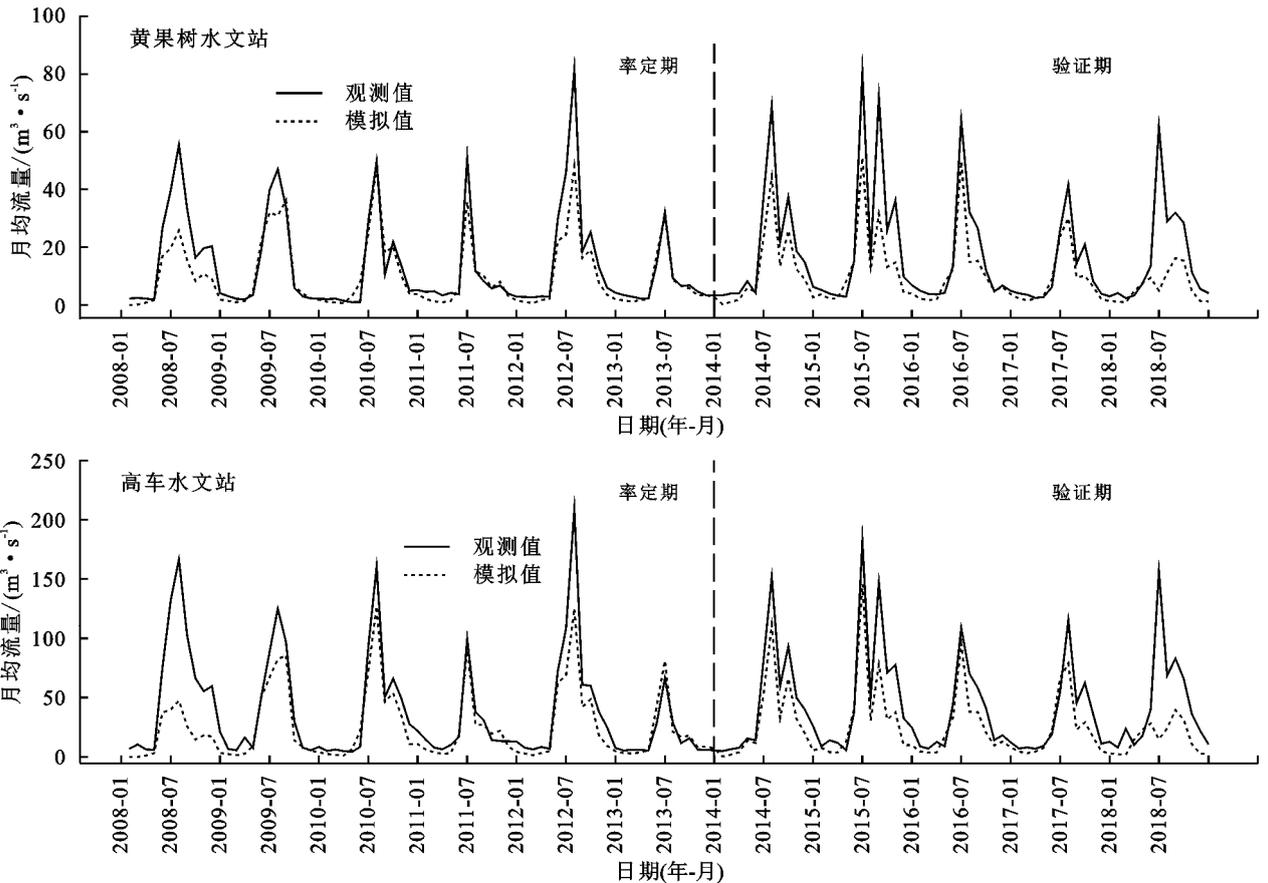


图 3 各水文站月径流模拟值与实测值拟合曲线

表 4 率定期与验证期的评价指标结果

时间	站点	站点所在子流域编号	$R^2$	NSE
率定期 (2008—2013 年)	黄果树水文站	15	0.86	0.77
	高车水文站	26	0.76	0.63
验证期 (2014—2018 年)	黄果树水文站	15	0.79	0.57
	高车水文站	26	0.75	0.54

根据模型模拟结果的参数评价标准,当  $R^2 > 0.5$ 、 $NSE > 0.5$  时模拟结果是可接受的<sup>[16]</sup>。由图 3 和表 4 可知,在月尺度上,2 个水文站在率定期和验证期径流模拟效果较好,其中黄果树水文站率定期和验证期  $R^2$  分别达 0.86,0.79,NSE 分别为 0.77,0.57;高车水文站率定期和验证期  $R^2$  分别达 0.76,0.75,NSE 分别为 0.63,0.54,均满足评价标准,模拟结果较好,SWAT 模型在打邦河流域具有较好的适用性。

由此可见,应用 SWAT 模型进行打邦河流域的产流模拟对流域水文特征有较准确的描述。

### 3.2 情景设置结果分析

3.2.1 不同石漠化治理措施情景下土地利用现状  
研究区土地利用现状(对照)以及不同治理措施情景下土地利用类型见图 2a、表 5 及图 4。从表 5 可以看出,研究区现状土地利用类型中耕地(水田、旱地)面积占比较大,为 816.54 km<sup>2</sup>,占比 30.18%,是区域重要的水土流失策源地,也是石漠化治理的重点区域。此外,研究区有林地和牧草地也具有较高的占比,合计达 54.51%,是区域涵养水源、保持水土的重要保障。经林地措施转换后,研究区有林地面积最大,达 1 472.31 km<sup>2</sup>,占比 54.41%,牧草地次之,为 718.41 km<sup>2</sup>,占比 26.55%;经济林措施转换后,研究区有林地、经济林和牧草地均占有较大比重,三者比重合计

81.00%,其中有林地面积 756.63 km<sup>2</sup>,占比 27.96%,经济林与牧草地面积相近,分别为 716.71,718.41 km<sup>2</sup>,占比分别为 26.49%和 26.55%;经牧草地措施转化后,牧草地在研究区面积中占比最大,为 53.00%,面积为 1 434.10 km<sup>2</sup>,其次是有林地,为 27.96%,面积 756.63 km<sup>2</sup>;经济林+林地措施转化后,研究区有林地、经济林和牧草地占有较大比重,其中有林地面积 865.27 km<sup>2</sup>,占研究区面积的 31.98%,牧草地面积 718.41 km<sup>2</sup>,占比 26.55%,经济林面积 608.08 km<sup>2</sup>,占比

22.47%;经济林+牧草地措施转化后,研究区土地利用类型主要以牧草地、有林地和经济林为主,其中牧草地面积 827.05 km<sup>2</sup>,占比 30.57%,有林地面积 756.63 km<sup>2</sup>,占比 27.96%,经济林面积 608.08 km<sup>2</sup>,占比 22.47%;牧草地+林地措施转化后,研究区牧草地面积最大,为 1 325.50 km<sup>2</sup>,占比 48.98%,有林地也占有较大比重,其面积达 865.27 km<sup>2</sup>,占比 31.98%。除此之外,以上 6 种治理措施均有 100.86 km<sup>2</sup>缓坡地(水田、旱地)未进行转化。

表 5 转化前后不同治理措施土地面积变化情况

治理措施	面积变化	水田	旱地	有林地	经济林	牧草地	其他
对照	面积/km <sup>2</sup>	452.93	363.61	756.63	1.03	718.41	413.24
	比例/%	16.74	13.44	27.96	0.04	26.55	15.27
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	1472.31	1.03	718.41	413.24
林地	比例/%	2.32	1.41	54.41	0.04	26.55	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	715.68	0	0	
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	756.63	716.71	718.41	413.24
经济林	比例/%	2.32	1.41	27.96	26.49	26.55	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	0	715.68	0	
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	756.63	1.03	1434.10	413.24
牧草地	比例/%	2.32	1.41	27.96	0.04	53.00	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	0	0	715.68	
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	865.27	608.08	718.41	413.24
经济林+林地	比例/%	2.32	1.41	31.98	22.47	26.55	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	108.64	607.04	0	
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	756.63	608.08	827.05	413.24
经济林+牧草地	比例/%	2.32	1.41	27.96	22.47	30.57	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	0	607.04	108.64	
	面积/km <sup>2</sup>	62.66	38.20	865.27	1.03	1325.50	413.24
牧草地+林地	比例/%	2.32	1.41	31.98	0.04	48.98	15.27
	面积变化量/km <sup>2</sup>	-390.27	-325.41	108.64	0	607.04	

3.2.2 不同石漠化治理措施对月产流的影响 由表 6 可知,与对照相比,林地措施月产流减少 35.37 m<sup>3</sup>/s,减少 16.2%;经济林措施月产流减少 46.18 m<sup>3</sup>/s,减少 21.2%;牧草地措施月产流减少 40.20 m<sup>3</sup>/s,减少 18.5%;经济林+林地措施月产流减少 44.61 m<sup>3</sup>/s,减少 20.5%;经济林+牧草地措施月产流减少 45.58 m<sup>3</sup>/s,减少 20.9%;牧草地+林地措施月产流减少 39.36 m<sup>3</sup>/s,减少 18.1%。可见,研究期间不同治理措施对月产流的影响强度较大,其中经济林措施月产流减少量最大,林地措施最小。因此,合理规划研究区退耕还林还草,对石漠化治理有重要意义。

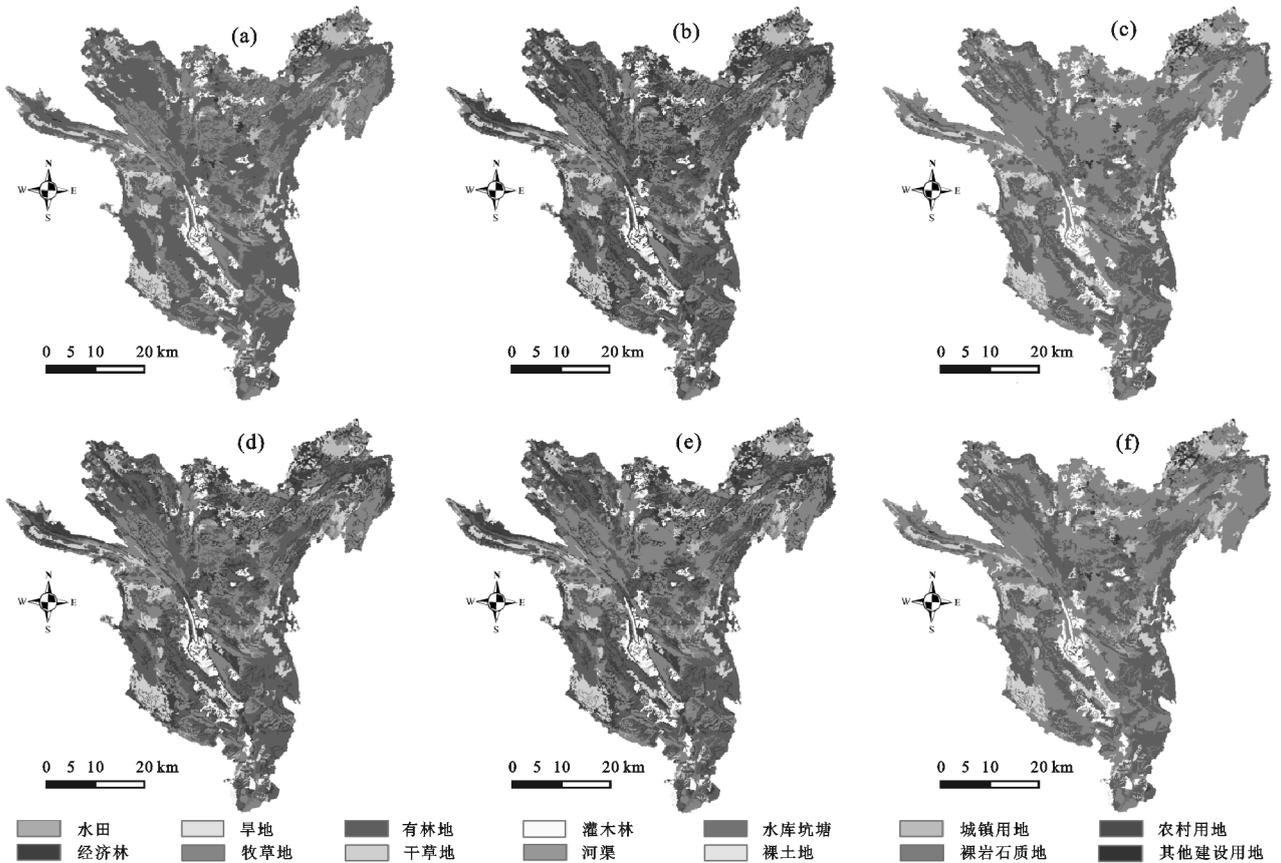
3.2.3 2 个坡度等级下不同石漠化治理措施对月产流的影响 由表 3 和表 6 可知,林地措施、经济林+林地措施和牧草地+林地措施具有可比性,因为该 3 种治理措施在坡度 15°以下和 25°以上一致,15°以下

均为耕地,25°以上都是有林地,而 15°~25°林地措施中为有林地,经济林+林地措施中为经济林,牧草地+林地措施中为牧草地,该 3 种治理措施的产流变化情况只取决于 15°~25°的土地利用类型。与对照相比,分别得出 3 个不同的产流变化情况均为减少,其中经济林+林地措施减少 44.61 m<sup>3</sup>/s,牧草地+林地措施减少 39.36 m<sup>3</sup>/s,林地措施减少 35.37 m<sup>3</sup>/s,表明蓄水截流效果在 15°~25°为经济林>牧草地>有林地。

同上,由表 3 和表 6 可知,经济林措施、经济林+林地措施和经济林+牧草地措施也具有可比性,这 3 种治理措施在坡度 15°以下和 15°~25°一样,15°以下均为耕地,15°~25°都是经济林,而 25°以上经济林措施中为经济林,经济林+林地措施中为有林地,经济林+牧草地措施中为牧草地,因此该 3 种治理措施的产流变化情况仅取决于 25°以上的土地利用类型。

与对照相比,经济林措施产流量减少  $46.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ,经济林+牧草地措施减少  $45.58 \text{ m}^3/\text{s}$ ,经济林+林地措

施减少  $44.61 \text{ m}^3/\text{s}$ ,表明蓄水截流效果在  $25^\circ$  以上为经济林>牧草地>有林地。



注:a为林地措施;b为经济林措施;c为牧草地措施;d为经济林+林地措施;e为经济林+牧草地措施;f为牧草地+林地措施。

图 4 不同石漠化治理措施情景下土地利用类型现状

表 6 不同治理措施对月均流量变化的影响

治理措施	月均流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	月均径流量变化量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	变化率/%
对照	217.88		
林地	182.51	-35.37	-16.2
经济林	171.70	-46.18	-21.2
牧草地	177.68	-40.20	-18.5
经济林+林地	173.27	-44.61	-20.5
经济林+牧草地	172.30	-45.58	-20.9
牧草地+林地	178.52	-39.36	-18.1

## 4 讨论

### 4.1 SWAT 模型在喀斯特流域的适用性

本研究结果表明,黄果树水文站率定期和验证期  $R^2$  分别达 0.86 和 0.79, NSE 分别为 0.77 和 0.57, 高车水文站率定期和验证期  $R^2$  分别达 0.76 和 0.75, NSE 分别为 0.63 和 0.54, 故 SWAT 模型在打邦河流域总体上是适用的。类似地,乌江水系三岔河流域的研究<sup>[20]</sup> 实践也同样表明, SWAT 模型在喀斯特地区总体适用。北盘江流域一级支流的望谟河流域研究<sup>[21]</sup> 实践显示,望谟河流域逐日数据在率定期的  $R^2$  和 NSE 均为 0.75, 验证期  $R^2$  为 0.61, NSE 为 0.55,

表明 SWAT 模型在望谟河流域也具有较好的适用性。然而,以上喀斯特地区率定及验证结果与我国东南、黄土高原等地研究实践相比,结果偏低。东南地区闽江流域 SWAT 模型率定期和验证期  $R^2 > 0.90$ ,  $\text{NSE} > 0.80$ <sup>[22]</sup>; 同样,东南地区的寿昌江流域率定期  $R^2 = 0.95$ ,  $\text{NSE} = 0.93$ , 验证期  $R^2 = 0.88$ ,  $\text{NSE} = 0.87$ <sup>[23]</sup>。在黄土高原地区,通过对关川河流域 SWAT 模型进行参数率定与验证,得到该流域率定期和验证期  $R^2$  分别达 0.85 和 0.78, NSE 分别为 0.86 和 0.84<sup>[24]</sup>。前述非喀斯特地区率定与验证结果总体上要高于喀斯特地区。从 SWAT 模型在喀斯特地区的研究实践来看,模拟精度较其他非喀斯特地区偏低,原因一方面可能与喀斯特地区典型的地表/地下二元水文结构有关。喀斯特地区存在诸多地下通道,如岩溶裂(孔)隙、落水洞、溶洞等,流域径流一部分存储于前述地下通道,另一部分可能通过地下河的形式汇入外流域,从而造成结果的误差;其次,可能与喀斯特地区的岩溶出露有一定关系。目前 SWAT 模型模块中裸土地和裸岩石质地均归为裸地这一类型,所采用的计算公式为同一公式,故忽略了石漠化对流域产

流的影响,导致模拟结果存在一定的误差;第三,喀斯特地区存在大量的洼地,通过填注作用水流易聚积于洼地中,而目前 SWAT 模型中的坑塘模块只能提取水库和池塘等人工点状水面,无法提取平时不积水的洼地,从而造成一定的误差。总体而言,从率定和验证结果来看,SWAT 模型基本是适用于喀斯特地区的,但基于前述几点原因,模型在喀斯特地区的应用尚需进一步改进,尤其需要加大石漠化因子对水文过程的影响相关研究力度,增加石漠化因子模块,从而提高模型的模拟精度。

#### 4.2 不同石漠化治理措施蓄水截流效果

本研究发现,退耕还林还草对于石漠化治理具有一定的生态效益,但以往对石漠化治理的研究中大多没有对石漠化治理区域进行坡度划分或不能很好体现基于坡度等级的石漠化治理措施。本文将坡耕地退耕还林还草区域坡度划分为  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  和  $25^{\circ}$  以上 2 个等级,相对而言可以因地制宜。研究区  $15^{\circ}$  以上有林地、经济林和牧草地相较于耕地来说,蓄水截流作用突出。王高丹等<sup>[10]</sup>在其研究中,将坡度  $25^{\circ}$  以上的坡耕地、水土流失严重土地设为林地,坡度  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  的浅山、丘陵区坡地设为经济林,研究结果表明径流减少 4.23%,可见林地和灌木林具有涵养水分、减少径流量的生态效应,这与本文的研究结果类似。另外,本研究还发现,坡度  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  和  $25^{\circ}$  以上蓄水截流效果均为经济林>牧草地>有林地。坡耕地转为经济林以后,以灌木、小乔木等树种为主的经济林种植密度一般较小,林下透光性好,在粗放管理条件下,一般会形成以杂草为主的草本层,一定程度上起到蓄水保墒的作用,故蓄水截流效果突出;同时,在实际生产实践中,经济林能够带来较高的经济收益,在老百姓有较高经济期望的前提下,管理会实现精细化,如为了维持土壤肥力,防止养分随径流流失,会辅以坡改梯等工程措施,从而降低坡面产流。牧草地在没有过多人为干扰的情况下,其地面植被可以保持较高的覆盖率,从而提高蓄水保墒效益。而喀斯特地区人工林地以马尾松等高大乔木为主,郁闭效果好,但也导致林下透光性较差,难以形成灌、草层的立体结构,同时人工林地土壤受扰动较少,土壤紧实度一般较大,土壤入渗能力也相对较弱,故从模拟结果来看,截流效果不及经济林和牧草地。另有研究<sup>[25]</sup>发现,林地种植密度高于经果林情况下,一定程度上抑制了林草生长,从而导致枯枝落叶层厚度及拦蓄水能力降低,蓄水截流效果较经济林和牧草地略差。

从本文的研究结果看,6 种治理措施对石漠化治

理均具有较为突出的生态效益,且经济林措施、经济林+林地措施和经济林+牧草地措施的蓄水截流效果最好,说明其生态效益最突出,相较于其他几种治理措施更能突出石漠化治理的优势。打邦河流域工程性缺水问题突出,石漠化治理区与贫困区重叠度较高,而石漠化治理的最终目标应该是生态恶化的态势得到根本改变,土地利用结构和农业生产结构不断优化,草食畜牧业和特色产业得到发展,人民生活水平持续稳步提高,农村经济逐渐步入稳定协调可持续发展的轨道<sup>[26]</sup>。因此,寻求一种或多种适合于该流域的石漠化治理措施至关重要。所以,依据本研究结果,认为经济林+牧草种植措施可作为打邦河流域石漠化治理的主要生物措施。一方面,经济林+牧草地措施蓄水截流效果突出,可以有效缓解流域内工程性缺水的问题;另一方面,经济林+牧草地措施带来突出生态效益的同时,还具有潜在的经济效益,当地居民种植果品、放羊养牛,不仅使当地坡耕地种植结构得到优化调整,还可以促进区域多产业发展,实现区域农业可持续发展,推动乡村振兴战略的实施。

## 5 结论

(1)基于 SWAT 模型的打邦河流域径流模拟结果与实测径流过程较吻合,其中黄果树水文站率定期  $R^2 = 0.86$ ,  $NSE = 0.77$ , 验证期  $R^2 = 0.79$ ,  $NSE = 0.57$ ;高车水文站率定期  $R^2 = 0.76$ ,  $NSE = 0.63$ , 验证期  $R^2 = 0.75$ ,  $NSE = 0.54$ ,表明 SWAT 模型在典型喀斯特流域——打邦河适用。

(2)林地措施中将坡度  $15^{\circ}$  以上水田、旱地转化为有林地,经济林措施中将坡度  $15^{\circ}$  以上水田、旱地转化为经济林,牧草地措施中将坡度  $15^{\circ}$  以上水田、旱地转化为牧草地,此 3 种治理措施和对照相比,月均流量均呈减少趋势,说明坡度  $15^{\circ}$  以上有林地、经济林和牧草地相较于耕地(水田、旱地)来说,蓄水截流作用突出。

(3)林地措施、经济林+林地措施和牧草地+林地措施具有可比性,该 3 种治理措施在坡度  $15^{\circ}$  以下和  $25^{\circ}$  以上一致,而  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  林地措施中为有林地,经济林+林地措施中为经济林,牧草地+林地措施中为牧草地,该 3 种治理措施的产流变化情况只取决于  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  的土地利用类型。和对照相比,经济林+林地措施产流量减少  $44.61 \text{ m}^3/\text{s}$ ,牧草地+林地措施减少  $39.36 \text{ m}^3/\text{s}$ ,林地措施减少  $35.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,表明蓄水截流效果在  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  为经济林>牧草地>有林地。

经济林措施、经济林+林地措施和经济林+牧草地措施也具有可比性,这 3 种治理措施在坡度  $15^{\circ}$  以

下和  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  一样,而  $25^{\circ}$  以上经济林措施中为经济林,经济林+林地措施中为有林地,经济林+牧草地措施中为牧草地,因此该 3 种治理措施的产流变化情况仅取决于  $25^{\circ}$  以上的土地利用类型。和对照相比,经济林措施产流量减少  $46.18\text{ m}^3/\text{s}$ ,经济林+牧草地措施减少  $45.58\text{ m}^3/\text{s}$ ,经济林+林地措施减少  $44.61\text{ m}^3/\text{s}$ ,表明蓄水截流效果在  $25^{\circ}$  以上为经济林>牧草地>有林地。

(4)6 种石漠化治理措施中,经济林+牧草地措施一方面可以有效缓解打邦河流域工程性缺水的问题,另一方面可优化调整当地坡耕地种植结构,实现区域的可持续发展,相较于其他 5 种治理措施更具有可行性。

#### 参考文献:

- [1] 袁道先,蒋勇军,沈立成,等.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016:319-320.
- [2] Zhu D Y, Xiong K N, Xiao H. Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China, 1960—2017[J].Catena, 2021,197:e104977.
- [3] 刘梅先,徐宪立.气候变化及人为活动驱动下的西南喀斯特生态水文研究评述[J].农业现代化研究,2018,39(6):930-936.
- [4] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J].Nature Sustainability,2018,1(1):44-50.
- [5] 祖拜代·木依布拉,师庆东,普拉提·莫合塔尔,等.基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J].生态学报,2018,38(14):5149-5157.
- [6] 贾静,石晓丽.土地利用/覆被变化对区域径流的影响:以秦皇岛地区为例[J].地理与地理信息科学,2017,33(2):108-114,127.
- [7] Martínez R, Aguayo M, Stehr A, et al. Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile[J].Water,2020,12(1):e302.
- [8] Kim Y, Band L E, Song C. The influence of forest re-growth on the stream discharge in the north Carolina Piedmont watersheds[J].Journal of the American Water Resources Association,2014,50(1):57-73.
- [9] Adhikari R K, Mohanasundaram S, Shrestha S. Impacts of land-use changes on the groundwater recharge in the Ho Chi Minh city, Vietnam[J].Environmental Research, 2020,185:e109440.
- [10] 王高丹,唐彦君,杨晓英,等.不同土地利用变化情景下的洪汝河流域水文响应[J].水土保持通报,2016,36(1):82-87,218.
- [11] 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.
- [12] 窦小东,黄玮,易琦,等.LUCC 及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J].生态学报,2019,39(13):4687-4696.
- [13] 刘洪,伍雄.浅析打邦河流域径流变化的影响因素[J].中国水运,2008,8(7):91-92,94.
- [14] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion-sediment yield models[J].Soil Technology,1997,11(1):43-55.
- [15] 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.
- [16] 田扬,肖桂荣.基于 CMADS 驱动下 SWAT 模型的敖江流域径流模拟[J].长江科学院院报 2020,37(11):27-32.
- [17] United States Department of Agriculture. Soil conservation service: National engineering handbook [M]. Cross section 4. Washington: Govt. Print. Off.,1972.
- [18] 刘睿,霍艾迪,Chen X H,等.基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在陕西黑河流域径流模拟中的应用[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):213-217,222.
- [19] 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.
- [20] 侯文娟,高江波,戴尔阜,等.基于 SWAT 模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异[J].地理学报,2018,73(7):1268-1282.
- [21] 方荻,吴战平,白慧,等.贵州望漠河流域径流量的延伸期预报试验[J].高原山地气象研究,2019,39(4):81-87.
- [22] 王钰双,陈芸芝,卢文芳,等.闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J].水土保持学报,2020,34(6):30-36.
- [23] 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.
- [24] 赵传普,徐学选,陈天林,等.关川河流域土地利用变化对径流的影响[J].水土保持研究,2015,22(3):83-87.
- [25] 纪启芳,张兴奇,张科利,等.贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J].水土保持研究,2012,19(4):1-5.
- [26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)[EB/OL].(2016-08-07).https://www.ndrc.gov.cn/, 2016.4.26/2021.6.3.