

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

侯文娟¹, 高江波¹, 戴尔阜^{1,2}, 彭 韬^{3,4}, 吴绍洪^{1,2}, 王 欢^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 4. 普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100)

摘要: 产流是生态系统水源涵养服务的重要内容,也是保水固土等服务的关键驱动。脆弱的喀斯特生态系统叠加人类活动的影响引起生态退化,在此背景下亟需深刻理解喀斯特地区产流服务空间格局及其影响因子。选择典型的喀斯特峰丛洼地流域,基于率定校准的SWAT水文模型,对喀斯特流域产流服务(包括地表、地下以及总径流量)进行模拟,并结合空间梯度分析和局部回归模型,剖析不同服务变量的空间变异特征。结果表明:研究区产流量空间分异规律明显,总径流系数约为70.0%;地表径流整体处于较低水平,地下径流量丰富(约为地表径流量的2~3倍)。地形因子对喀斯特流域产流服务具有宏观控制作用,随海拔和坡度升高,总径流量、地下径流量显著增加;植被分布特征对地表径流有重要影响,在上游林地和下游园地分布区存在空间差异,在植被因素的影响下随坡度的增加呈现转折性的变化趋势。此外,空间叠加分析表明林地总径流及地下径流最大:一方面是由于森林生态系统更强的土壤水分涵养能力以及水分快速入渗的地质背景特征;另一方面反映了地表覆盖与地形特征的复合效应,即林地大多分布在相对海拔和坡度较大之处。本文有助于推进喀斯特生态系统服务研究领域的发展与创新,并为生态恢复建设提供科技支撑。

关键词: 产流服务;SWAT模型;空间变异;影响因子;喀斯特

DOI: 10.11821/dlxb201807007

1 引言

生态系统服务是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用^[1],它作为生态学与地理学的研究前沿和热点,是连接自然系统和社会系统的桥梁,受到众多学者与研究组织的关注^[2-5]。生态系统服务按照效用类型可分为支持、供给、调节和文化服务^[6-8]。千年生态系统评估计划综合报告指出,20世纪后半期全球有60%的关键生态系统服务项正在退化(评估的24项全球生态系统服务中,有15项正在退化),其中调节服务衰退尤其严重^[9]。水源涵养作为重要的生态系统服务类型,涵盖水的供给和调节,对维持生态安全、保障人类高质量生活等方面发挥重要作用。根据水文循环过程和水量平衡原理,水源涵养的不同指标之间是密切关联、相互作用的^[10],如产水/流量(即水资源

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2018-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB452702); 国家自然科学基金项目(41671098, 41530749); 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室开放基金 [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2015CB452702; National Natural Science Foundation of China, No.41671098, No.41530749; Open Foundation of Laboratory for Earth Surface Processes (LESP) under the Ministry of Education of China]

作者简介: 侯文娟(1987-), 女, 山东莱芜人, 博士, 从事喀斯特生态系统系统服务研究。E-mail: houwj.13b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 高江波(1984-), 男, 山东临沂人, 博士, 副研究员, 主要从事喀斯特地表过程及其资源环境效应、气候变化影响与适应研究。E-mail: gaojiangbo@igsnr.ac.cn

供给服务)对土壤水分调节与洪水调蓄等服务具有深刻影响。

中国西南地区特殊的地质发育条件以及地表地下连通的水文结构造就了脆弱的喀斯特生态系统,在全球变化影响和人类活动干扰下植被退化严重、土壤流失加剧,引发石漠化现象^[11-12],严重阻碍了西南地区的可持续发展和生态文明建设^[13]。水土流失是喀斯特地区石漠化的核心问题^[14],水土保持(土壤水分涵养与土壤保持)对于遏制石漠化与推进生态恢复发挥重要作用。而产流过程不仅为人类提供水资源,其对土壤水分涵养和土壤保持服务也具有重要的驱动作用。探讨典型喀斯特地区的产流服务,有助于深入了解喀斯特地区的“保水”与“固土”规律,可为初步探索产流服务与土壤水土保持服务的权衡关系奠定基础,为石漠化治理和生态恢复提供理论依据。

目前针对喀斯特生态系统产流服务的研究,一方面是宏观尺度基于水量平衡理论的经验公式或价值当量法计算水源涵养总量及价值^[15-16];另一方面是样地尺度生态水文过程动态规律^[17-19],以及产流的影响因素分析^[20-21]。然而,喀斯特地区高度异质的景观格局使得流域产流服务呈现显著的空间差异,样点上的观测实验规律难以推演到区域尺度,经验公式或当量法计算结果缺乏物理机制的考虑,并忽视了产流量的空间规律^[22]。而SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型基于物理机制且又将一些过程用“经验模型”刻画,这使其已被广泛应用于不同环境下径流研究^[23-26],尤其是对于下垫面条件复杂且水文地质条件特殊的喀斯特地貌区,此种化繁为简的方式使其具有一定程度的应用^[27-28]。因此,本文借助SWAT水文模型模拟典型喀斯特流域产流服务,并从不同地形背景和地表覆盖状况系统剖析其空间变异特征,以期推进喀斯特生态系统服务研究领域的发展与完善,并为实现区域可持续发展提供理论支撑。

2 研究区概况

三岔河为乌江南源一级支流,位于104°54'E~106°24'E、26°06'N~27°00'N之间,流域面积为4861 km²。该河流发源于贵州省西部乌蒙山,于毕节市黔西县东风水库与乌江北源六冲河汇合后为乌江中游鸭池河。三岔河流域所处的贵州省西北部为典型的喀斯特峰丛洼地区,具有独特的地质水文结构,地表土层浅薄且不连续,水文过程变化迅速,水、土资源空间分布不匹配^[29]。脆弱的生态地质环境叠加人类活动的干扰,导致该区石漠化现象突出,目前石漠化综合治理一期工程已见成效,但相关科学研究仍远落后于综合治理工程。

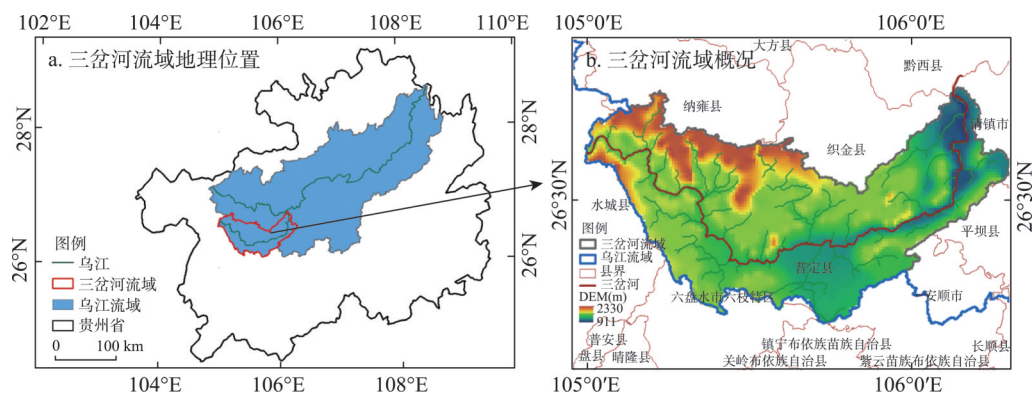


图1 三岔河流域概况

Fig. 1 Basic information map for the Sanchahe River Basin

流域地势呈现西高东低的空间格局,海拔在 911~2330 m 范围波动。土地利用类型有林地、园地、耕地、草地、商服用地以及工矿仓储用地,其中林地面积最大,占全区的 45%,其次为园地 (25%),农地以及草地的面积比例较小。由于商服用地和工业仓储用地为人类活动区,本文合为一种类型。根据 1990-2010 年土地利用遥感数据发现,三岔河流域的土地利用类型动态变化并不显著,耕地、草地、林地以及未利用地等在-0.2%~9% 之间浮动变化。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 数据来源

3.1.1 气象数据 气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 提供的安顺气象站日值数据,包括日平均气温、降水、平均风速、相对湿度、日照时数等。此外,由于本文主要模拟受降雨影响较大的径流,因此选取了三岔河流域范围内的 4 个雨量站,包括比德、马场、三塘、齐伯雨量站点。雨量站点数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所馆藏资料《中华人民共和国水文年鉴——长江流域乌江区》。气象站点和雨量站点的基本资料如表 1 所示。

表 1 气象站、雨量站及水文站点资料表
Tab. 1 Information for meteorological and rainfall stations

台站类型	台站名	纬度	经度	海拔(m)	水系	时段
气象站	安顺	26°15′	105°54′	1431	—	预热年: 2006-2007 年
雨量站	比德	26°34′	105°10′	1500	—	率定年: 2008-2010 年
	马场	26°19′	105°33′	1320	—	验证年: 2011-2013 年
	三塘	26°35′	105°33′	1588	—	
	齐伯	26°34′	106°10′	990	—	
	水文站	阳长	26°39′	105°11′	—	三岔河
		龙场桥	26°23′	105°47′	—	三岔河
		洪家渡	26°52′	105°52′	—	六冲河
		鸭池河	26°51′	106°09′	—	乌江

3.1.2 水文数据 根据中华人民共和国水文年鉴长江流域资料记载 (中华人民共和国水利部水文局),三岔河流域内共有阳长和龙场桥两个水文站,分别位于三岔河的上游和中游地区。鉴于模型校准所需,流域出口处需有水文站点的径流数据,因此选取洪家渡水文站 (六冲河流域出口处) 和鸭池河水文站 (位于六冲河和三岔河汇流处的乌江干流)。《中华人民共和国水文年鉴——长江流域水文资料乌江区》中阳长、龙场桥、洪家渡、鸭池河水文站点的逐日、月平均流量数据用于 SWAT 模型率定和验证,站点信息如表 1 所示。

3.1.3 遥感数据 根据 SWAT 模型构建所需,遥感数据包括数字高程模型 (DEM)、土地利用类型、土壤类型与理化性质等,此外还借助归一化植被指数 (NDVI) 对模型径流模拟结果进行空间统计分析。其中,DEM 数据来自美国地质调查局 (USGS) EROS 数据中心的 HYDRO1K 数据集 (http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/HYDRO1K),分辨率为 1 km。土地利用数据为中国科学院资源环境科学数据中心提供,比例尺为 1:10 万的 2010 年土地利用矢量数据^[30]。土壤数据来源于联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (International Institute for Applied System Analysis, IIASA) 所构建的世界土壤数据库 (Harmonized World Database version 1.1, HWSD)^[31],其中土壤属性表主要字段有:

FAO 90 土壤分类系统中的名称、土壤参考深度, 以及土壤物理 (碎石体积百分比、砂粉黏粒含量、有效含水量等) 和化学性质 (有机碳含量、阳离子交换能力等)。植被覆盖为中分辨率成像光谱仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 植被指数数据产品 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>), 时间分辨率为 16 d、空间分辨率为 500 m 的 NDVI 数据, 时间段为 2005-2010 年。该植被覆盖数据主要用于流域地表覆盖与产流服务的空间统计关系研究, 在空间上三岔河流域 NDVI 呈现西高东低的带状分布格局 (图 2)。

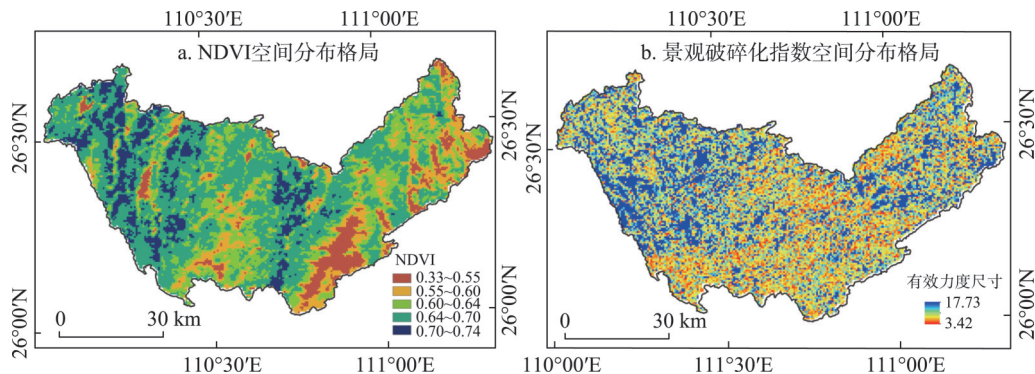


图2 三岔河流域NDVI和景观破碎化指数的空间分布格局

Fig. 2 Spatial pattern of NDVI and index of landscape fragmentation in Sanchahe River Basin

3.2 SWAT 半分布式水文模型


3.2.1 SWAT 模型原理及结构 SWAT 模型模拟的水文循环基于各水文变量过程进行:

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

式中: SW_t 为土壤最终含水量 (mm); SW_0 为第 i 天的土壤初始含水量 (mm); t 表示时间 (d); R_{day} 表示第 i 天的降水量 (mm); Q_{surf} 表示第 i 天的地表径流量 (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 天基流回归的水量 (mm)。

与其他水文模型 (分布式和概念模型) 相比, SWAT 模型具有以水文过程为基础、输入数据易获取且运算效率高的特点。例如 MIKE SHE 模型充分考虑水文过程、边界条件和流域集合特征的空间变异性, 但下垫面和水文地质条件的资料收集非常困难^[32]; TOPMODEL 模型结构简单、优选参数少, 但对水文要素的空间变异性及水文单元的相互联系考虑得不够全面^[33]。

SWAT 模型对于径流的模拟分不同模块 (地表径流、地下水以及河道汇流) 进行。本文对地表径流选择较为成熟的 SCS 曲线数法 (经验模型), SCS 曲线数是土壤渗透性、土地利用和前期土壤水分条件的函数, 土壤渗透能力的高低主要根据喀斯特地区不同土壤类型的理化性质计算, 由此可恰当反映该区真实的土壤渗透能力; 不同土地利用方式会通过改变地表蒸发、土壤水分状况及地表覆盖的截留量来影响产流^[34], 流域土地利用类型作为输入数据最终反映在 SCS 曲线数值上; 有研究表明喀斯特地区在降雨深度达到 40 mm 后产生地表径流^[35], 因此前期土壤水分条件也是典型喀斯特流域地表产流的关键因素。地下径流则分别通过对浅层含水层和深层含水层的水量平衡方程来计算, 基于不同的运动过程计算水量, 各个模块受相应的参数控制。一般来说, 喀斯特地区地下径流的模拟效果受到基流退水常数 (ALPHA_BF, 地下水径流对补给量变化响应的直接指示) 和地下水汇入主河道时浅层含水层的水位阈值 (GWQMN) 等参数的影响较大。

3.2.2 数据准备及模型构建 (1) 模型空间数据库的建立。借助 ArcGIS 将空间数据的坐标系统一为 Krasovsky_1940_Albers, 数据格式为。对照 SWAT 模型中的土地利用数据分类将土地利用数据(栅格)重分类, 转换为模型规定代码。土壤数据为 1:100 万的三岔河流域土壤类型图作投影转换, 并结合经验科学处理土壤属性表中特殊情况。

(2) 模型属性数据的准备。① 土壤数据库。SWAT 数据库中“USERSOIL”所需参数主要是土壤理化性质。物理属性包括土壤机械组成、饱和导水率、有效含水量等, 化学性质主要包括土壤有机碳含量、电导率等。土层厚度、有机碳含量等可在 HWSD 土壤数据库中获取, 饱和导水率、有效含水量等可通过软件 (SPAW) 或经验公式计算得到。② 气象资料数据库。针对每个气象站点, 分别建立逐日降水量、日最高和最低温度、太阳辐射、平均风速以及相对湿度的.DBF 文件; 同时, 构建各气象站点及雨量站点的地理信息文件 (.DBF), 以此链接气象站点空间图与气象资料数据库。③ 土地利用及土壤类型索引表。土地利用及土壤类型索引表是将研究区的土地利用及土壤类型空间分布图与 SWAT 属性数据关联。

本文采用 SWAT 模型, 基于水文站点的实测径流数据对模型率定验证, 进一步模拟典型喀斯特流域包括总径流量、地表径流量、地下径流量在内的产流服务。

3.2.3 SWAT 模型敏感性分析与参数率定 利用阳长、龙场桥、鸭池河以及洪家渡水文站点的实测径流数据进行参数敏感性分析及率定验证。基于模型自带模块, 采用 Morris^[36]、Holvoet^[37]以及 Griensvend^[38]等提出的 LH-OAT 法进行参数敏感性分析, 结合水文站的实测径流数据, 得到表 2 的结果。敏感性分析结果表明, 对径流量模拟影响较大的参数有控制地表水文过程的土壤水分条件 II 下 (一般湿润情况) 的 SCS 径流曲线值 (CN₂)、土壤水蒸发补偿系数 (ESCO)、冠层最大储水量 (CANMX), 控制地下水文过程的基流分割系数 (ALPHA_BF)、地下水延迟系数 (GW_DELAY)、潜水层补给深度 (GWQMN), 以及控制主河道汇流的主河道水力传导度 (CH_K₂)。

表 2 SWAT 模型的敏感性分析及参数率定

Tab. 2 Results of the sensitivity analysis and parameters calibration for the SWAT model

参数			敏感性次序			参数值	
物理意义	代码	模拟过程	阳长	龙场桥	出口	默认范围	调整范围
正常湿润条件下的径流曲线数	CN ₂ (.mgt)	地表径流	2	3	5	35~98	50~98
土壤有效含水量	SOL_AWC(.sol)	土壤水	9	11	8	0~1	0.05~0.16
基流分割系数	ALPHA_BF(.gw)	地下水	5	14	15	0~1	0.048~0.5
地下水汇入主河道时浅层含水层的水位阈值(mm)	GWQMN(.gw)	地下水	7	4	4	0~5000	1000
主河道河床有效水力传导度 (mm·h ⁻¹)	CH_K ₂ (.rte)	壤中流	6	1	1	0~150	0~25

基于敏感性分析的结果以及实际的水文过程^[39-40], 最终本文中调整的参数为 CN₂、SOL_AWC、ALPHA_BF、GWQMN、CH_K₂。校准思路为: ① 基于流域总水量及地表径流的实测数据, 首先校准地表径流和地下径流, 控制参数为 CN₂、SOL_AWC、ALPHA_BF、以及 GWQMN; ② 对流量过程线进行校准, 涉及到的参数有 CH_K₂ (.rte)、ALPHA_BF (.gw); ③ 参数校准应遵循先上游后下游测站的顺序。

3.3 景观破碎化指数

除了采用植被指数剖析产流服务空间变异性, 本文还借助土地利用景观破碎化指数阐释其与产流量的空间关系。借助有效粒度尺寸 (effective mesh size)^[41]来度量景观破碎化程度, 它是指景观中各土地利用类型连续分布面积的平均值, 该值越小景观破碎化

程度越低。景观破碎化指数可在空间上反映不同水文响应单元 (HRU) 之间的土地利用类型变化的剧烈程度, 破碎化较严重地区, 相邻HRU间的土地利用类型差异同样明显。该指标融入了生态过程、景观组成与空间格局信息, 可更综合客观地表征破碎化程度^[42]。计算公式为:

$$m_{eff}(j) = A_j \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{ij}}{A_j} \right)^2 = \frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^n A_{ij}^2 \quad (2)$$

式中: $m_{eff}(j)$ 表示景观 j 的有效粒度尺寸; n 为景观 j 中非破碎块的数量; A_{ij} 表示景观 j 中斑块 i 的面积大小; A_j 为景观 j 的面积大小。该指数值的变化范围是: 最小值为栅格大小, 表征相邻栅格间的类型均不同; 最大值为景观面积, 即该景观具有唯一的类型。本文借助景观格局分析软件FRAGSTATS^[43]中的“滑窗”(研究幅度)计算有效粒度尺寸。

基于三岔河流域 30 m 分辨率的土地利用数据 (2010 年) 所计算的结果显示 (图 2b), 破碎化指数高值与低值区错杂分布, 且低值区 (破碎化程度高) 面积大于高值区。高值区主要分布在上游, 低值区主要分布在中下游地区。

3.4 地理加权回归模型

地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR) 是由 Brunsdon 等提出的一种简单而实用的局域空间分析方法^[44-45]。GWR 展示了研究区域内部空间关系的变化图景。结合王远飞等^[46]的研究, 利用 GWR 模型揭示产流量与景观破碎化指数、NDVI 植被指数在空间非平稳性条件下的空间关系。GWR 模型是传统回归模型的延伸, 该方法将数据的空间位置加入到参数之中, 通过获取局部参数来评估自变量与因变量关系在空间尺度上的变异。GWR 模型的基本形式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(\mu_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: (μ_i, v_i) 是指第 i 个采样点的坐标; k 代表了自变量的个数; y_i 、 x_{ik} 、 ε_i 分别在回归点 i 的自变量 (总径流量、地表径流量、地下径流量)、因变量 (景观破碎化指数、NDVI) 和随机误差; $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 是指回归点 i 处的 GWR 回归模型的截距; $\beta_k(\mu_i, v_i)$ 指回归点 i 处的 GWR 回归模型的斜率。

参数可通过以下公式进行估计:

$$\beta(\mu_i, v_i) = (X^T W(\mu_i, v_i) X)^{-1} X^T W(\mu_i, v_i) Y \quad (4)$$

式中: $\beta(\mu_i, v_i)$ 为回归系数的无偏估计; $W(\mu_i, v_i)$ 为空间权重矩阵, 是地理加权回归的核心, 观测点离特定点越近, 权重越大; X 和 Y 分别是自变量和因变量的矩阵。

高斯空间权函数具有普适性, 其表达形式为:

$$\omega_{ij} = \exp \left(-\frac{d_{ij}^2}{b^2} \right) \quad (5)$$

式中: ω_{ij} 代表观测点 j 的权重; d_{ij} 为回归点 i 和其周围某观测点 j 的欧几里得距离; b 为描述权重与距离之间函数关系的非负衰减参数, 也称为带宽。当观测点间的距离大于 b 值时, 权重迅速趋近于 0。

4 结果与分析

4.1 SWAT 模型产流服务的率定与验证结果

依照上述方法介绍进行多次调参率定, 直至模拟值接近实测值, 最终确定本文的参

数范围如表2所示。其中对于地下径流,通过查阅已有研究对于喀斯特地区地下水文过程(补给、径流、排泄)的调查与分析^[39-40],并经过多次调节参数值验证模拟结果的准确性,最终将ALPHA_BF调至0.048~0.5范围内,GWQMN调至1000。

进一步基于2008-2010年的实测月径流资料,应用Nash-Sutcliffe效率 E_{NS} 、确定性系数 r^2 以及水文过程线的比较作为衡量模型效率的标准,检验率定效果。 E_{NS} 越接近1,表明模拟值越接近实测值; E_{NS} 越偏离1,表明越偏离实测值。 E_{NS} 的计算公式如下:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

(6)

式中: O_i 为观测值; \bar{O} 为观测平均值; P_i 为预测值; P 为预测平均值。一般认为, E_{NS} 在0.5~0.65之间的模拟结果是可以接受的, E_{NS} 在0.65~0.75之间的模拟结果比较好, E_{NS} 在0.75以上的模拟结果非常好^[47]。

结果显示龙场桥站点校准期的月平均流量模拟值与实测值吻合较好, E_{NS} 系数为0.82, R^2 为0.92;验证期 E_{NS} 达到了0.90, R^2 达到0.93。阳长站在校准期和验证期模拟结果也较贴近实测值, E_{NS} 分别为0.70和0.73,模拟效果较好(表3)。而且,从水文过程线看出,阳长和龙场桥水文站的实测与模拟值较吻合。此外,流域出口处的模拟结果,相比龙场桥和阳长站点较差。这可能是由于流域出口处的实测径流量以鸭池河和洪家渡水文站点之差来大致估测,引起一部分误差。

表3 2008-2013年三岔河流域地表径流月模拟结果评价
Tab.3 Statistics indicators of model performance at the three monitor stations of Sanchahe River Basin

站点	校准期(2008-2010年)		验证期(2011-2013年)	
	NS	R^2	NS	R^2
阳长	0.70	0.84	0.73	0.93
龙场桥	0.82	0.92	0.90	0.95
流域出口	0.64	0.92	0.50	0.78

4.2 三岔河流域产流服务的空间格局

基于SWAT模型获取三岔河流域产流服务变量格局,包括总径流量(TOTAQ)、地表径流(SURQ)、地下径流(GWQ)。此外,由于蒸散发对于降水分配的重要影响^[48],本文对实际蒸散发(ET)的模拟结果一并分析。三岔河流域多年平均总径流量呈现北高南低的分布趋势(图4a),变化范围为510~1177 mm,平均值为826.4 mm。总径流量较高(900~1100 mm)的地区主要集中分布在三岔河流域的东部和北部,占据整个流域面积的22%;三岔河流域南部地区的总径流量相对偏少,主要集中在500~700 mm范围内。三岔河流域的总径流系数达到了70%。

流域地表径流(图4b)整体处于较低水平,均值为276 mm,地表径流系数(地表径流量/降水量)为23.9%,且呈现明显的空间异质性。流域50%的地区地表径流量处于0~300 mm水平,南部地区最为突出;在300 mm以上的主要分散在东部和北部的小部分地区。这是由于三岔河流域处于典型的喀斯特地貌区,独特的地表地下二元水文结构使得地表水大量漏失至地下。与地表径流相比,三岔河流域的地下径流量较丰富(图4c)。流域60%~70%的地区地下径流量集中在500~700 mm,尤其在上游地区绝大多数处于500 mm以上。

三岔河流域的实际蒸散发量差异不大,大部分地区集中在100~300 mm水平,分布于流域上游和下游地区(图4d),占全区面积的53%;少数地区为300~500 mm,主要位于中、南部地区。与各径流的空间格局相比,三岔河流域的实际蒸散发分布较平均,这

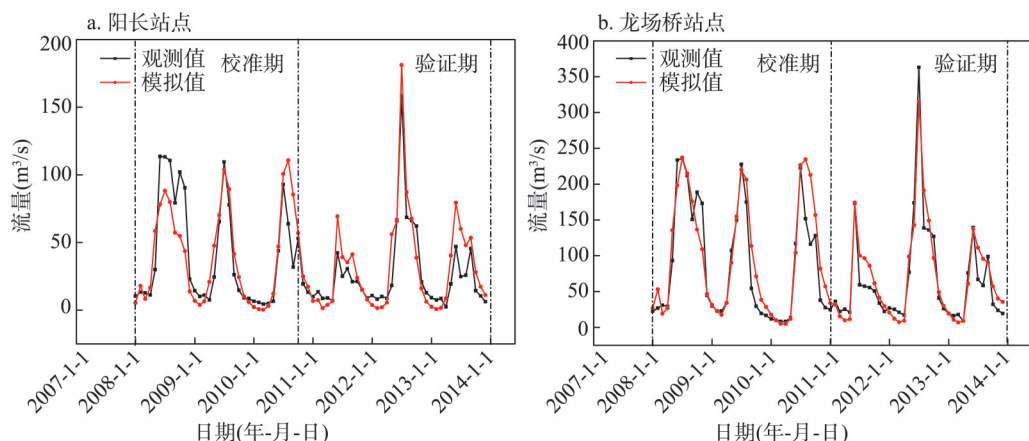


图3 阳长和龙场桥站点月平均径流量模拟值与实测值的比较

Fig. 3 Simulated and observed runoff on a monthly step at Yangchang (left) and Longchangqiao (right) stations

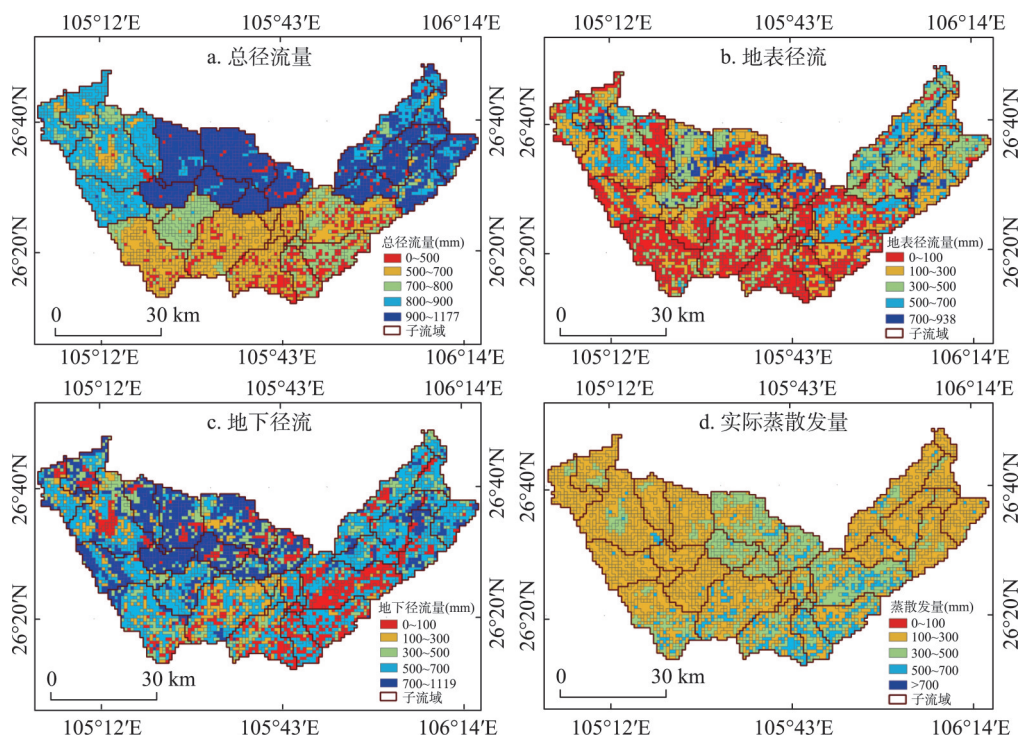


图4 三岔河流域总流量、地表径流、地下径流及实际蒸散发量的空间分布格局

Fig. 4 Spatial pattern of TOTAQ (a), SURQ (b), GWQ (c) and ET (d) in the Sanchahe River Basin

是由于蒸散发主要受气温、降水、风速以及植被类型的影响^[49]。基于研究区DEM数据统计可得,约70%的地区海拔集中在900~1500 m范围内,全区气温以及风速差距不大;而且植被类型主要以针叶林和灌丛为主(80%以上),使得蒸散发的空间异质性较低。

4.3 基于地形因子的三岔河流域产流服务梯度分析

三岔河流域海拔变化范围为911~2330 m,按照911~1000 m、1000~1500 m、1500~2330 m海拔梯度分别统计总径流量、地表径流、地下径流以及实际蒸散发的均值和变异系数。结合图4与表4可看出,总径流量随高程变化的幅度不大(803~882 mm),且变异

系数波动小 (0.09~0.21)。地表径流变化较大, 海拔为 911~1000 m 时地表径流为 401 mm, 变异系数为 0.52; 随着海拔增大地表径流降低至 154 mm, 变异系数增大至 0.85。而地下径流随着海拔的升高其均值呈现逐渐上升的相反趋势。不同海拔梯度实际蒸散发量的差异不大。总体而言, 海拔对三岔河流域地表和地下径流具有明显影响, 随海拔升高地下径流所占比例提高, 地表径流降低。

坡度梯度分析 (表 4) 表明总径流量随着坡度增大呈现上升趋势。地表径流随坡度的增加呈现先增大后减小的趋势, 在坡度为 5°~10° 范围内达到最大值 (319 mm); 在 0~10° 范围内, 地表径流呈现随坡度增加而增大, 水层沿坡面方向的冲力增大, 垂直坡面压力减少, 入渗率减小, 导致地表径流随之增大; 而随坡度继续增大, 降雨对地表的垂直作用力较小, 结皮产生慢, 地表径流反而减少。这与胡弈等研究的喀斯特坡地产流规律类似^[44]。地下径流基本随着坡度增大而逐渐上升, 最高达 629 mm, 一是由于径流水的重力在沿坡面方向上的分力随着坡度的增加而使径流速度加快; 二是坡度增加, 降雨对地表的垂直作用力减小, 径流增加速度也慢^[30]。在不同的坡度梯度范围内, 实际蒸散发量的平均值在 222~259 mm 内波动。

表 4 三岔河流域基于水文响应单元的不同地形因子的径流及蒸散发
Tab. 4 Runoff and evapotranspiration based on different elevations of the hydrological response units in the Sanchahe River Basin

因素	地形因子		总径流量(mm)		地表径流(mm)		地下径流(mm)		实际蒸散发(mm)	
	梯度	面积比例(%)	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数
海拔(m)	911~1000	1.8	882	0.09	401	0.52	481	0.52	212	0.28
	1000~1500	64.2	803	0.17	310	0.75	493	0.48	251	0.27
	1500~2330	34.0	882	0.15	154	0.85	591	0.42	245	0.27
坡度(°)	0~5	61.9	825	0.17	301	0.80	523	0.46	253	0.27
	5~10	24.5	838	0.16	319	0.72	519	0.46	241	0.27
	10~15	12.3	881	0.15	303	0.75	578	0.49	227	0.27
	15~24	1.3	863	0.21	233	0.85	629	0.44	222	0.28

4.4 三岔河流域地表覆盖与产流服务的空间统计关系

4.4.1 不同地表覆盖状况下产流服务的统计特征 植被覆盖通过减小雨滴动能、拦截雨量、改变地表结皮以及影响土壤渗水性能等来实现对径流的影响^[34]。5 种土地利用类型的总径流量相差无几, 波动于 718~850 mm 之间, 其中草地相对较低。而地表径流和地下径流随不同土地利用类型的变化差异较明显, 尤其工业用地和商业用地的地表径流最大 (544 mm), 其次为农地。这是由于商业和工业仓储用地是人类活动频繁的地区, 城市建设区域的不透水层使得持水蓄水功能大幅削弱, 降雨大部分转为地表径流。而地下径流恰好相反, 园地、森林的地下径流占总径流的 70% 以上, 其中森林的地下径流最高, 为 628 mm。森林物理结构较好、透水性强、凋落物具有较强持水能力^[50], 而且森林分布处往往海拔较高、坡度较陡。

植被覆盖状况会通过改变地表蒸发、土壤水分状况及地表覆盖的截留量来影响流域的水文过程和产流服务。将三岔河流域的植被 NDVI 划分为 3 个等级: < 0.5、0.5~0.7、< 0.7, 分别统计不同梯度 NDVI 的径流。由图 5 与表 5 可得, 总径流量和地下径流量随着 NDVI 的增加而增大, 地表径流先增加后减少。在一定范围内, 植被覆盖状况的改善使得因地表地下二元水文结构而漏失的水分减少, 地表产流增加; 而随 NDVI 继续增大, 植被的冠层截留增加, 蒸腾作用加强, 并伴随土壤持水蓄水功能增强, 地表产流减少。

4.4.2 景观破碎化、植被覆盖与产流服务的空间相关关系 基于地理加权回归(GWR)模型,景观破碎化指数(m_{eff})和植被NDVI,分析HRU尺度上地表覆盖与不同径流变量的空间局部关系(图6)。其中,为保证整个区域的宏观格局准确表征,局部信息也可清晰刻画,本文以回归模型的 R^2 、残差平方和为衡量标准确定7 km的最佳带宽,选择Gauss函数作为权重函数。三岔河流域的总径流量与景观破碎化指数以正相关关系为主,占整个流域的96.5%,仅东南角落为负相关,其中空间正相关性较强的地区分布在流域的南部和东北部。地下径流量与景观破碎化指数的空间回归关系与总径流量类似,99.9%的地区呈现正相关关系,且由西向东相关性逐渐减弱。而地表径流与景观破碎化指数的空间关系异质性相对较高,主要以负相关为主(74.2%),集中在西部和中部地

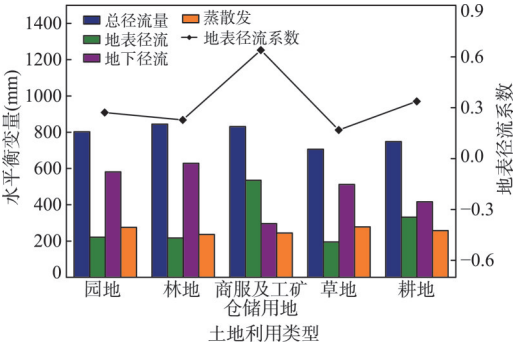


图5 三岔河流域不同土地利用类型的产流服务
Fig. 5 Runoff services of different land use types in Sanchahe River Basin

表5 三岔河流域不同植被覆盖状况的产流服务
Tab. 5 Runoff services of different vegetation coverage in Sanchahe River Basin

NDVI	总径流量 (mm)	地表径流 (mm)	地下径流 (mm)	蒸散发量 (mm)
< 0.5	794	259	535	230
0.5~0.7	830	319	523	296
> 0.7	835	282	565	277

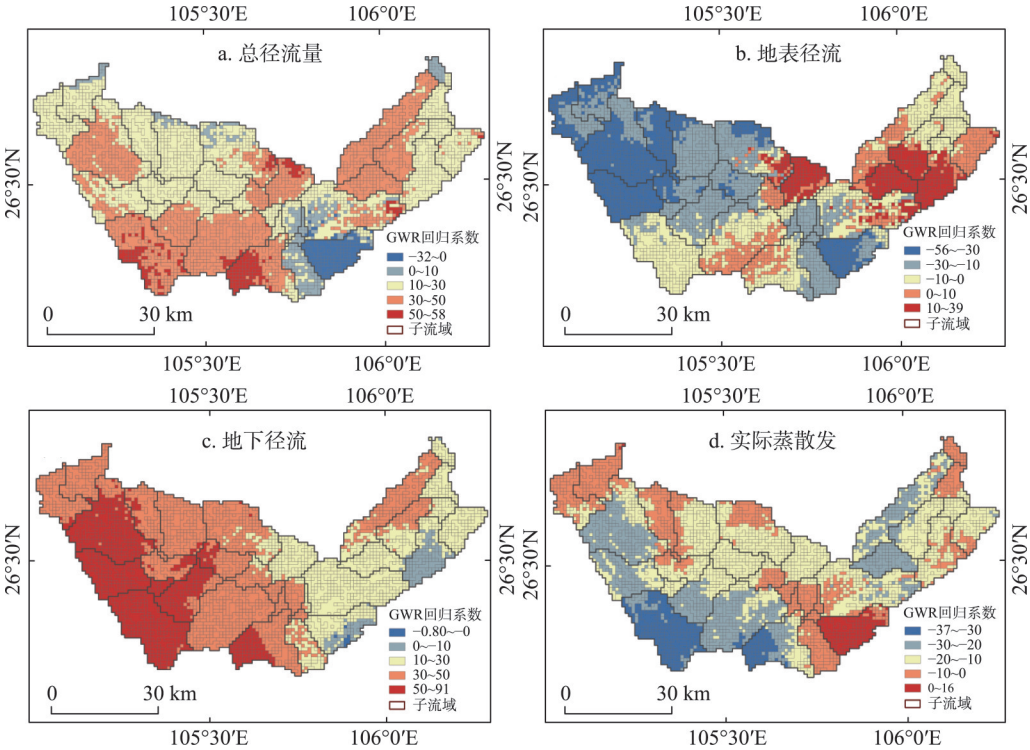


图6 三岔河流域景观破碎化指数与水平衡变量的GWR模型回归系数空间格局
Fig. 6 Spatial pattern of regression coefficients with GWR model of the landscape fragmentation index and water balance components in the Sanchahe River Basin

区, 仅有东、北部的小范围为正相关关系。实际蒸散发量与景观破碎化指数的空间相关性整体呈现负相关, 占全区的96.9%。

NDVI 与径流的 GWR 回归系数的空间非平稳关系呈现明显的南北分异的空间格局 (图7)。在三岔河流域的上游和中游地区, 总径流量与NDVI 主要以正相关关系为主, 占整个流域的61.4%; 而在流域的北部以及下游地区呈现负相关。地表径流与NDVI 的空间关系略微复杂, 正负相关性交错分布; 正相关关系占全区的67.3%, 主要分布在三岔河流域的西部、中部以及流域出口处。地下径流与NDVI 的负相关关系, 分布于56.4%的地区。结合图1、图6和图7发现, 在上游生态环境较好的区域, 海拔越高, 景观破碎化程度低, NDVI 值大, 总径流以及地下径流量较高、地表径流较少, 反映了生态恢复的效果较好。实际蒸散发量与NDVI 的负相关关系占全区的52.5%, 主要分布在三岔河流域的南部和上游地区。

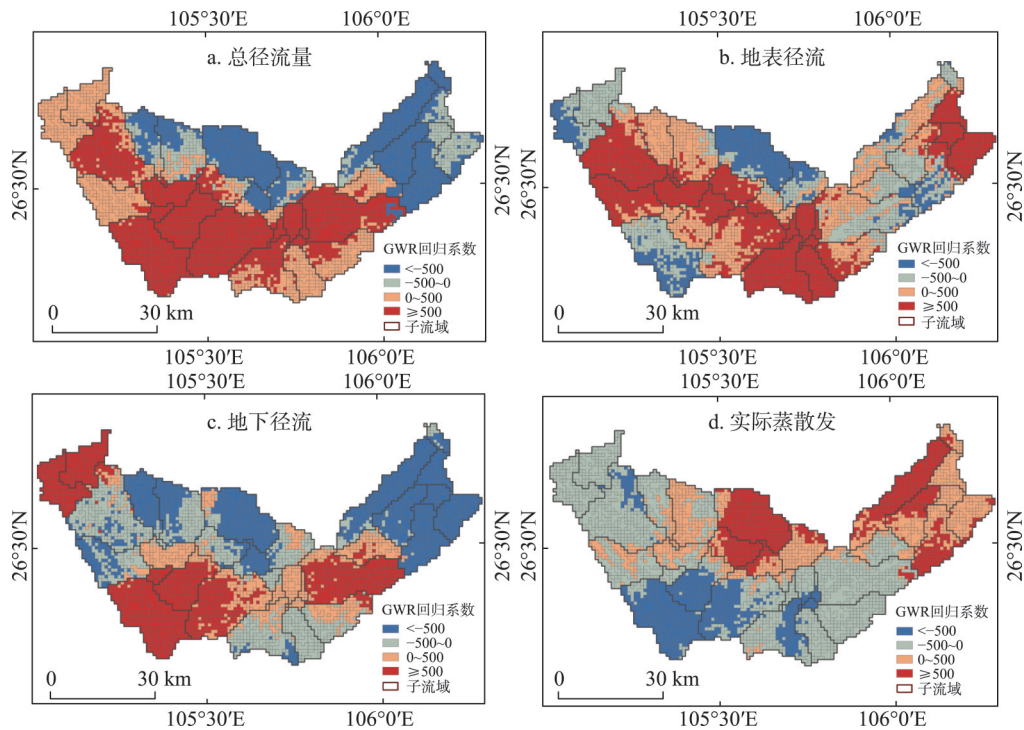


图7 三岔河流域NDVI 与水平衡组分的GWR模型回归系数空间格局
Fig. 7 Spatial pattern of regression coefficients with GWR model of the landscape fragmentation index and water balance components in the Sanchahe River Basin

5 讨论与结论

本文基于率定的SWAT模型, 模拟了喀斯特流域产流服务 (包括地表、地下以及总径流量), 并结合空间梯度分析和GWR模型剖析不同服务变量的空间变异特征, 得到以下结论:

(1) 通过敏感性分析及参数率定, 提高了SWAT模型在三岔河流域的适用性。SWAT模拟的多年平均总流量呈现北高南低的空间格局, 流域总径流系数为70%; 地表径流呈现明显的空间变异性, 整体处于较低水平; 地下径流量丰富, 这与典型的喀斯特地貌以

及地表地下二元水文结构密切相关。随着海拔和坡度的升高, 总径流、地下径流所占比例提高。植被覆盖状况对产流服务影响各异: 不同覆被类型对地表、地下径流的影响差异较大; 植被覆盖度(NDVI)对地表产流服务以正效应为主; 叠加植被的影响, 地表径流随坡度增加呈现先增大后减小的趋势。空间叠置分析表明, 林地分布区总径流及地下径流最大, 这一方面由于森林生态系统良好的土壤水分涵养能力以及研究区水分快速入渗的地质背景特征, 另一方面由于森林分布区海拔和坡度相对较高, 地下径流较易产生。

(2) 在三岔河流域上游地区, 海拔是总径流、地下径流主导影响因素; 地表覆盖状况决定地表产流量。在下游地区, 地形起伏与海拔共同影响总径流、地下径流; 其中, 园地(占比56%)对地表产流具有保水及影响蒸散发的等重要作用。通过本文对典型喀斯特流域的产流服务及其空间变异特征的研究发现, 因地制宜的生态恢复措施(上游退耕还林还草一下游园地建设)有助于提高区域总水源涵养量、降低地表产流量, 进而增强土壤保持能力, 最终增加上游林地固碳量以及下游园地居民福祉。

该研究充分发挥了SWAT模型基于水文过程且输入数据易获取的优点, 通过调节对喀斯特流域径流模拟影响较大的参数, 达到较高的模拟水平。对于三岔河流域径流的空间格局及其与不同环境因子的空间统计关系研究, 参数率定后的SWAT模型既切合研究目标, 也可满足基本需求。基于此模拟了多年产流服务空间格局, 并借助GWR模型定量剖析了土地覆盖状况与径流的空间相关关系, 弥补了以往仅通过统计不同土地利用类型以及景观指数的径流特征^[5], 以及缺乏对相关宏观格局刻画等问题。与此同时, 虽然SWAT模型在参数率定后达到较优的模拟效果, 但由于水文过程非常复杂且涉及参数上百个, 异参同效问题仍无法避免, 即可能因一些参数组合达到理想水平使得最终模拟效果令人满意。因此在今后的研究中还应结合喀斯特地貌区特殊的地质水文条件对过程模拟作细致优化, 使其更加符合喀斯特流域实际水文过程。

参考文献(References)

- [1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington D.C.: Island Press, 1997.
- [2] Fu B J, Wang S, Su C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [3] Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446. [傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.]
- [4] Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research of ecosystem services in China: Progress and perspectives. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 1-10. [李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10.]
- [5] Li Shuangcheng. *The Geography of Ecosystem Services*. Beijing: Science Press, 2014. [李双成. *生态系统服务地理学*. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [6] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [7] Ouyang Zhiyun, Wang Rusong, Zhao Jingzhu. Ecosystem services and economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640. [欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.]
- [8] Fu Bojie, Yu Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9. [傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.]
- [9] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington D.C.: Island Press, 2005.
- [10] Liu Changming, Du Wei. An application of system analysis to water allocation in the first-stage project of the east-route water transfer in China. *Geographical Research*, 1985, 4(3): 81-88. [刘昌明, 杜伟. 系统分析在东线引江水量平衡中的

应用. 地理研究, 1985, 4(3): 81-88.]

- [11] Pan Shibing, Lu Jingxuan. Karst groundwater exploitation in Southwest and countermeasure to cope with drought. *China Water Resources*, 2010(13): 40-42. [潘世兵, 路京选. 西南岩溶地下水开发与干旱应对. 水资源管理, 2010(13): 40-42.]
- [12] Li Zhou, Gao Kaimin, Liu Jinchun, et al. Growth response of two annual herb species to alternating drying-wetting and nitrogen addition in the karst area of Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3372-3380. [李周, 高凯敏, 刘锦春, 等. 西南喀斯特地区两种草本对干湿交替和N添加的生长响应. 生态学报, 2016, 36(11): 3372-3380.]
- [13] Yuan Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 98-100. [袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.]
- [14] Bai Xiaoyong, Wang Shijie. Relationships between soil loss tolerance and karst rocky desertification. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1315-1322. [白晓永, 王世杰. 岩溶区土壤允许流失量与土地石漠化的关系. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1315-1322.]
- [15] Zhang Mingyang, Wang Kelin, Chen Hongsong, et al. Quantified evaluation and analysis of ecosystem services in karst areas based on remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5891-5901. [张明阳, 王克林, 陈洪松, 等. 喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析. 生态学报, 2009, 29(11): 5891-5901.]
- [16] Zhang Mingyang, Wang Kelin, Liu Huiyu, et al. The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3947-3955. [张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征. 生态学报, 2011, 31(14): 3947-3955.]
- [17] Chen Hongsong, Nie Yunpeng, Wang Kelin. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in regions: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 317-326. [陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.]
- [18] Zhang Chuan, Chen Hongsong, Zhang Wei, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and conductivity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1585-1591. [张川, 陈洪松, 张伟, 等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585-1591.]
- [19] Dai Q, Peng X, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area. *Catena*, 2017, 152: 218-226.
- [20] Chen Hongsong, Yang Jing, Fu Wei, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 121-126. [陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. 农业工程学报, 2012, 28(16): 121-126.]
- [21] Hu Yi, Dai Quanhong, Wang Peijiang. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 46-51. [胡奕, 戴全厚, 王佩将. 喀斯特坡耕地产流特征及影响因素. 水土保持学报, 2012, 26(6): 46-51.]
- [22] Zhang Z, Chen X, Huang Y, et al. Effect of catchment properties on runoff coefficient in a karst area of southwest China. *Hydrological Processes*, 2013, 28(11): 3691-3702.
- [23] Zhou F, Xu Y, Chen Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [24] Xu H, Xu C Y, Sæthun N R, et al. Entropy theory based multi-criteria resampling of rain gauge networks for hydrological modelling: A case study of humid area in southern China. *Journal of Hydrology*, 2015, 525(A): 138-151.
- [25] Yao Suhong, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Using SWAT model to simulate the discharge of the river Shandianhe in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1): 175-180. [姚苏红, 朱仲元, 张圣微, 等. 基于SWAT模型的内蒙古闪电河流域径流模拟研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 175-180.]
- [26] Lv Leting, Peng Qiuzhi, Guo Yuanyuan, et al. Runoff simulation of Dongjiang river basin based on the soil and water assessment tool. *Journal of Natural Resources*, 2014(10): 1746-1757. [吕乐婷, 彭秋志, 郭媛媛, 等. 基于SWAT模型的东江流域径流模拟. 自然资源学报, 2014(10): 1746-1757.]
- [27] Wang X Z, Liang Z X, Wang J. Simulation of runoff in karst-influenced Lianjiang Watershed using the SWAT model. *Scientific Journal of Earth Science*, 2014, 4(2): 85-92.
- [28] Tian Y, Wang S, Bai X, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 2016, S566/S567: 1297-1308.
- [29] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, land use, impact

- and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [30] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [31] Fischer G F, Nachtergaele S, Prieler H T, et al. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008.
- [32] McMichael C E, Hope A S, Loaiciga H A. Distributed hydrological modeling in California semi-arid shrublands: MIKESHE model calibration and uncertainty estimation. *Journal of Hydrology*, 2006, 317(3): 307-324.
- [33] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, et al. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 1984, 69(1): 119-143.
- [34] Wu Xiyuan, Zhang Liping. Research on effecting factors of precipitation's redistribution of rainfall intensity, gradient and cover ratio. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 28-30. [吴希媛, 张丽萍. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 28-30.]
- [35] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in Southwest China. *Catena*, 2012, 90(1): 53-62.
- [36] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161-174.
- [37] Holvoet K, van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity annalysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2005, 30(8-10): 518-526.
- [38] Griensven A V, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1): 10-23.
- [39] Amatya D M, Jha M, Edwards A E, et al. SWAT-based streamflow and embayment modeling of karst-affected chapel branch watershed, South Carolina. *Transactions of the Asabe*, 2011, 54(4): 1311-1323.
- [40] Chen Xi, Zhang Zhicai, Rong Li, et al. Process of water cycle and effect of eco-hydrology in the Karst region of Southwestern China. Beijing: Science Press, 2014. [陈喜, 张志才, 容丽, 等. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [41] Jaeger J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000, 15(2): 115-130.
- [42] Gao Jiangbo, Cai Yunlong. Spatial Heterogeneity of landscape fragmentation at multi-scales: A case study in Wujiang river basin, Guizhou Province, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(5): 742-747. [高江波, 蔡运龙. 区域景观破碎化的多尺度空间变异研究: 以贵州省乌江流域为例. *地理科学*, 2010, 30(5): 742-747.]
- [43] Mcgarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report Pnw, 1995, 351.
- [44] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [45] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Geographically weighted regression: Modelling spatial non-stationarity. *Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician Staistician*, 1998, 47(3): 431-443.
- [46] Wang Yuanfei, He Honglin. Analytical Methods of Spatial Data. Beijing: Science Press, 2007. [王远飞, 何洪林. 空间数据分析方法. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [47] Popov E G. Gidrologicheskie Progonozy (Hydrological Forecasts). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
- [48] Li Hongjun, Lei Yuping, Zheng Li, et al. SEBAL model and its application in the study of regional evapotranspiration. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(3): 321-325. [李红军, 雷玉平, 郑力, 等. SEBAL模型及其在区域蒸散研究中的应用. *遥感技术与应用*, 2005, 20(3): 321-325.]
- [49] Borba B S M C, Szklo A, Schaeffer R. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: the case of wind generation in northeastern Brazil. *Energy*, 2012, 37(1): 469-481.
- [50] Shi Peili, Li Wenhua. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481-487. [石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 481-487.]
- [51] Lin Bingqing, Chen Xingwei, Chen Ying, et al. Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1772-1780. [林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 等. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的SWAT模型模拟分析. *生态学报*, 2014, 34(7): 1772-1780.]

The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe basin as the south source of Wujiang

HOU Wenjuan¹, GAO Jiangbo¹, DAI Erfu^{1,2}, PENG Tao^{3,4}, WU Shaohong^{1,2}, WANG Huan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China; 4. Puding Karst Ecosystem Research Station, Puding 562100, Guizhou, China)

Abstract: Runoff generation is an important part of water conservation service, and also plays a critical role in soil and water retention. Under the background of the ecosystem degradation, which was caused by the vulnerable karst ecosystem combined with human activity, it is necessary to understand the spatial pattern and impact factors of runoff services in the karst region. The typical karst peak-cluster depression was selected as the study area. And the calibrated and verified Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was one of the main techniques to simulate the runoff services of typical karst basin. Further, the spatial variability of different services were analyzed with the assistance of the methods of gradient analysis and local regression. Results indicated that the law of spatial difference was obvious. And the surface runoff was at a low level, but the groundwater runoff was rich (about 2-3 times the surface runoff). The runoff coefficients of total and groundwater were 70.0% and 23.9%, respectively. Terrain is a significant factor contributing to macroscopic control effect on the runoff service in the Sanchahe River Basin, where the total and groundwater runoff increased significantly with the rising elevation and slope. Then, the distribution of vegetation has great effects on surface runoff. There were spatial differences between the forest land in the upstream and orchard land in the downstream, in turn the surface runoff presented a turning point due to the influence of vegetation. Moreover, the results of spatial overlay analysis showed that the highest value of total and groundwater runoff was observed in the forest land. It is not only owing to the stronger capacity of soil water conservation of forest ecosystem, and geologic feature of rapid infiltration in this region, but also reflected the combined effects on the land cover types and topographical features, that is, forest land was mostly distributed in the area with relatively great elevation and slope. Overall, this study will promote the development and innovation of ecosystem services fields in the karst region, and further provide a theoretical foundation for ecosystem restoration and reconstruction.

Keywords: runoff services; SWAT; spatial variation; impact factors; karst ecosystem