

黄土高原泾河流域梯田对河道径流及生态基流影响

李娟¹, 高建恩^{1,2,3}, 张元星², 邵辉⁴

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 奎尔夫大学地理系, N1 G1 V4, 加拿大 奎尔夫)

摘要: [目的] 定量分析泾河流域梯田建设对河道径流、生态基流的影响程度, 为流域梯田建设提供一定理论支撑。[方法] 采用合作开发的嵌入梯田模块的 SWAT(soil and water assessment tool)模型模拟河道径流量。[结果] 嵌入梯田模块的 SWAT 模型在模拟河道径流时可满足模型模拟精度的要求; 随着梯田面积增加, 河道年径流量减少, 生态基流保障程度提高, 年、月生态基流不满足天数降低; 梯田的年平均减流量为 $4.25 \times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 梯田具有蓄洪补枯作用, 且对丰水期的调控效果高于枯水期, 对河道生态基流的影响为: 枯水期 > 平水期 > 丰水期。[结论] 嵌入梯田模块的 SWAT 模型在该流域具有较好的适用性, 提高流域内梯田面积是滞洪补枯的有效手段之一, 在一定程度上保障了河道生态基流。

关键词: 泾河流域; 梯田; 河道径流; 生态基流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0106-05

中图分类号: TV 121.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.085

Effects of Terrace on Runoff and Ecological Base Flow of Jinghe Watershed in Loess Plateau Region

LI Juan¹, GAO Jian'en^{1,2,3}, ZHANG Yuan xing², SHAO Hui⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and

Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Department of Geography, University of Guelph, Guelph, N1 G1 V4, Canada)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to quantitatively analyze the effects of terrace on river runoff and ecological basic flow (EBF) of Jinghe watershed in Loess Plateau region, to provide theoretical supports for construction of terraces in the watershed. [Methods] The process-based terrace algorithm was developed based on soil and water assessment tool (SWAT) model to simulate river runoff. [Results] The developed model satisfied the accuracy requirements in runoff simulation. With the increase of terrace area, annual runoff and number of days when runoff less than EBF were reduced, and the security level of EBF enhanced dramatically. Terrace could reduce runoff by as much as $4.25 \times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Moreover, terrace could adjust the flood and runoff, and this adjustment effect on runoff in wet season was higher than that in dry season. The effects of terrace on EBF showed as; dry season > the normal season > the wet season. [Conclusion] The newly developed terrace algorithm is satisfactory in simulating daily runoff in Jinghe watershed. Increasing terraced area is an effective way to adjust runoff in both wet and dry seasons, and guarantee EBF.

Keywords: Jinghe watershed; terrace; runoff; ecological basic flow

在水土流失极其严重的黄土高原地区, 梯田作为重要的水土保持措施分布广泛。但随着梯田面积增加, 河道的径流量减少, 使得人们对梯田的利弊提出

了质疑。冉大川等^[1]研究得出 1970—1996 年, 河口镇—龙门区间、泾河流域、北洛河流域和渭河流域梯田年均减洪 3.29×10^7 , 1.25×10^7 , 5.30×10^6 和

收稿日期: 2014-07-14

修回日期: 2014-07-27

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目课题“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成示范”(2011BAD31B05); 国家自然科学基金项目“复杂下垫面暴雨径流侵蚀相似性模拟试验研究”(41371276); 国家科技重大专项课题(2009ZX07212-002-003-002)

第一作者: 李娟(1988—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为流域管理。E-mail: lijuan19881019@126.com。

通信作者: 高建恩(1962—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 研究员, 主要从事水土资源利用与流域治理研究。E-mail: gaojianen@126.com。

$6.62 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。王辉等^[2]研究表明大规模梯田开发是造成渭河源区产流效率降低的根本原因,并且随着梯田面积的增加对枯水期产流影响最为剧烈、对丰水期产流影响相对较弱。然而,梯田对流域尺度水文过程的影响非常复杂,传统技术方法并不能全面深入研究其对流域水沙的整体影响,在流域尺度内其水文过程研究相对薄弱。

水文模型是近年研究的热点^[3],可以对大中流域尺度内的水文过程进行模拟。目前,在分布式水文模型中多通过调节参数模拟梯田对流域尺度径流的影响。Arabi M等^[4]利用 SWAT 模型通过调节 CN_2 , Slsbbsn 值模拟了梯田措施对美国中西部印第安纳州小流域产水量的影响。Saleh A等^[5]通过改变 SWAT 模型中的 P-factor 和 CN_2 值,表明梯田对流域水量具有影响。这些方法无法直接反映梯田对流域径流的调控过程。基于此,邵辉等^[6]在 SWAT 中开发梯田模块用于计算流域径流泥沙对梯田措施的响应。

梯田减小坡面及河道径流必然会影响河道生态基流保障,目前关于该影响的定量评价研究甚少。在赣江袁河流域,肖玉成等^[7]利用 SWAT 模型模拟数据计算了河道内的生态基流。Combalicer E等^[8]利用不同模型对韩国森林小流域的生态基流进行了研究。很多学者还采用了基流比例法、Tennant 法等传统方法计算了河道的生态基流^[9-12]。林启才等^[13]研究了宝鸡峡渠首引水对渭河生态基流的影响及其保障。但目前对生态基流的研究主要集中在河道生态基流的计算上,而水利水保措施对河道生态基流保障影响的研究还很缺乏。

本文基于泾河流域 DEM、气象、土壤、土地利用和径流资料,在评价嵌入梯田模块的 SWAT 模型径流模拟的适用性基础上模拟研究不同梯田面积对河道径流及生态基流保障的影响。本研究将为嵌入梯田模块的 SWAT 模型在黄土高原地区的径流模拟提供参考,为该流域内梯田的合理规划提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

泾河是渭河的Ⅰ级支流,其多年平均径流量占渭河多年平均值的 23.8%^[14],对渭河特别是其下游具有十分显著影响。该流域位于黄土高原中部($106^{\circ}14' - 108^{\circ}42'E, 34^{\circ}46' - 37^{\circ}19'N$),流域面积 $45\,421 \text{ km}^2$,多年(1952—1996年)平均降水量 532.7 mm,径流量 $1.80 \times 10^{10} \text{ m}^3$,输沙量 $2.54 \times 10^8 \text{ t}$ ^[1]。流域内水系较发达,地形支离破碎,沟壑纵横,是黄土高原水土流失最严重的区域之一。20 世纪初期泾河流域梯田面

积已达 $2.36 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[15],约占该流域总面积的 5.12%。

1.2 基础数据收集

SWAT 模型的输入数据包括:DEM 数据、土壤数据、土地利用空间数据以及气象测站系列数据等。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn/admin/productdemMain.jsp>)。土地利用数据源于中国 1:250 000 土地覆盖遥感调查与监测数据库。土壤数据是利用黄土高原地区 1:500 000 土壤图经过流域边界切割得到的。本文所用气象数据包括 1950—2008 年实测的 14 个雨量站数据、10 个气象测站的降雨、气温、风速、相对湿度日数据。

1.3 研究方法

1.3.1 嵌入梯田模块的 SWAT 模型建立及梯田的设置 梯田模块是邵辉等^[6]根据梯田影响流域水环境的过程开发了水土保持梯田措施的过程模型,并成功嵌入 SWAT 模型当中。嵌入后的梯田模块需要在原有的 HRU 中定义一个修建梯田的百分比,即“梯田区域”。模型还需要定义无梯田区域(HRU 中梯田区域以外的部分)流入梯田区域的径流比例。这个参数允许梯田以上的区域将径流汇入梯田参与梯田模拟过程,该参数也从一定层面反映了梯田位置的变化。另外,模型还需定义梯田单元各坡段的形状参数(坡长和坡度)。

泾河流域 SWAT 模型建立采用 ArcSWAT 2009.93.7 b 交互界面进行。子流域划分设定的提取阈值为 $10\,000 \text{ hm}^2$,共产生 220 个子流域。子流域水文响应单元是采用主成分法(Dominant)划分水文响应单元,即每个子流域对应一个 HRU,该 HRU 拥有子流域主要的土地利用方式和土壤类型。

流域内梯田类型均设置为水平梯田,梯田形状参数根据地形图判读取平均值。梯田垂直坡向田面平均宽度设定为 15 m,平行坡向梯田长度设置为 150 m,梯田的田埂高度 30 cm,梯田的边坡取 75° ,梯田内无排水设施以及排水渠道,梯田初始为完好的无泥沙淤积的新修梯田。梯田内土壤、土地利用方式、种植方式采用与原有 HRU 相同的设置。非梯田流域的径流汇入比例采用梯田面积的 50%确定。

1.3.2 模型率定与验证 泾河流域 70 年代人类活动比较少,选取 1968—1979 年作为 SWAT 模型的模拟期间。其中,1968—1969 年为模型预热期,使模型初始条件更接近于研究区;1970—1974 年作为模型的率定期;1975—1979 年作为模型的验证期。模型率定和验证过程直接对含有梯田流域进行模拟,当模

型达到精度要求后去除或改变流域内梯田面积并模拟对比流域径流背景值用于评价梯田的调控效果。

本研究选用的衡量模型径流模拟精度指标有纳什系数($NS > 0.5$), 相关系数的平方($r^2 > 0.6$)以及相对偏差百分比($PBIAS < \pm 25\%$)。根据前人 SWAT 模型在泾河流域及黄土高原地区的应用经验^[16-18], 选择不同研究中对流域径流敏感的参数及其率定范围进行区域的参数率定。共选 8 个参数: CN_2 , SOL_AWC , $SLSUBBSN$, SOL_K , $ESCO$, $ALPHA_FA$, GW_DELAY , SOL_Z 。

1.3.3 梯田布置 在含有梯田模块的 SWAT 模型率定与验证基础之上, 应用其模拟 1970—1979 年 10 a 不同梯田面积条件下流域出口景村站径流量。根据 20 世纪 80 年代以来的梯田统计面积, 模拟泾河流域景村站以上区域梯田建设对河道径流及生态基

流保障的影响。同时, 为进一步研究梯田面积扩大的影响, 根据 2000 年梯田统计面积扩大 2, 3, 4 和 5 倍分别模拟相应梯田条件下河道径流及生态基流保障的响应, 具体梯田模拟情景如表 1 所示。在模拟过程中相应改变梯田模块的梯田比例: s_0 为假设流域内无梯田的情景, 以情景 s_0 为基准期, 将 1989, 2000 年的情景 s_{1989} , s_{2000} 与其对比, 获取流域内不同梯田面积对河道径流及生态基流保障的影响。

1.3.4 生态基流的计算 生态基流量是指河流维持基本生态功能应保持的基本流量^[19]。确保河流生态基流量的目的是防止由于河道断流和流量减少所造成的生态环境恶化, 以实现流域及河流生态系统的可持续发展。泾河流域的河道缺水、高含沙^[20], 研究生态基流的保障对于改善河道健康, 促进河道生态系统稳定具有重要意义。

表 1 景村站以上梯田模拟情景

项目	情景 s_0	情景 s_{1989}	情景 s_{2000}				
			统计面积×1	统计面积×2	统计面积×3	统计面积×4	统计面积×5
梯田面积/km ²	0.00	640.58	1 899.32	3 780.95	5 671.42	7 561.90	9 452.37
比例/%	0.00	1.60	4.76	9.47	14.21	18.94	23.68

河流生态基流的计算方法很多, 选用目前在国内外应用较为广泛 Tennant 计算方法。研究表明, 多年平均径流量的 10% 是保持河流生态系统健康的最小流量^[21]。本文采用泾河流域 1960—1989 年水文站的实测径流数据计算相应河段的生态基流量为 5.2 m³/s, 以其作为控制指标, 研究梯田对生态基流保障的影响。

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证

表 2 汇总了泾河流域径流参数率定结果, 可以看出, 泾河流域率定的 CN_2 值相对于默认值减小了

25.95%, 其值约为 60, 该取值符合 SWAT 模型 A 类水文分组土壤 CN 值的取值范围(51~77), 说明该区域下垫面降雨入渗效果很明显, 区域地表产流能力很小。

由于 ArcSWAT 自动提取的子流域加权平均坡长较短(23.9 m), 率定的子流域平均坡长增大了 1.8 倍, 达到 43.10 m。

根据率定参数模拟的 1970—1979 年泾河流域日径流结果如图 1 所示, 其中, 1970—1974 年为率定期, 1975—1979 年为验证期。可以看出, 模型可较好的反映泾河流域日径流的变化趋势。但模型在枯水期有高估流域产流的趋势。

表 2 泾河流域径流模拟参数率定结果

参数名称	物理含义	率定范围	率定结果
CN_2	平均土壤水分产流径流曲线数	$\pm 35\%$	-25.95%
SOL_AWC	土壤可持水量比例	$\pm 50\%$	17.85%
$SLSUBBSN$	坡长/m	-95%~+400%	180.33%
SOL_K	土壤饱和导水率/(mm·hr ⁻¹)	$\pm 50\%$	1.65%
$ESCO$	土面蒸发补偿系数	0~1.0	0.88
$ALPHA_BF$	基流衰减系数	0~1.0	0.5
SOL_Z	土壤表层到底层的深度/mm	$\pm 50\%$	23.55%
GW_DELAY	基流延迟时间/d	30~250	153

注: 率定范围和结果中含有正号或负号(“±”、“+”以及“-”)的数据代表为相对增减量, 其中含有百分号(%)的数值为在原值基础上相对增减的比例, 其他为相对增减的绝对值; 不含正负号的数值为率定的绝对值。

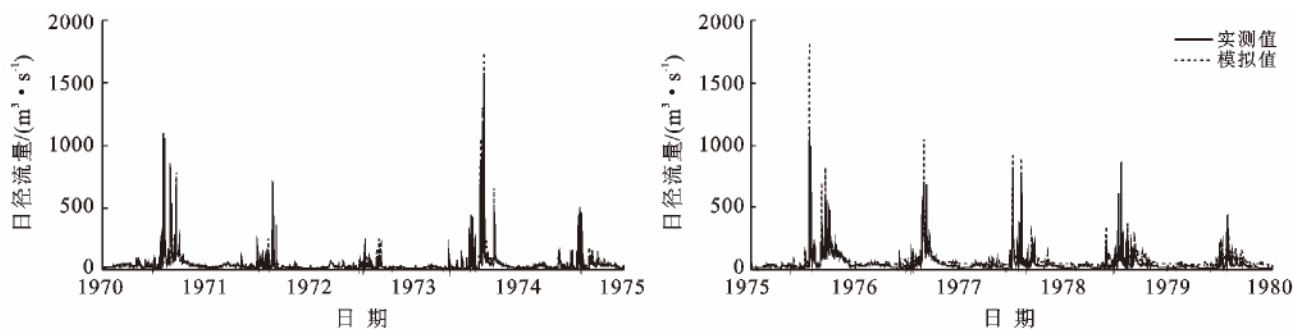


图 1 泾河流域景村水文站 1970—1979 年日径流模拟结果

由表 3 可以看出,率定期和验证期的日、月经流模拟均满足模型径流模拟的精度要求。说明嵌入梯田模块的 SWAT 模型可用于模拟泾河流域径流变化过程。

表 3 泾河流域景村水文站径流模拟统计结果

统计时段	率定期			验证期		
	NS	r ²	PBIAS	NS	r ²	PBIAS
日	0.74	0.77	11.18%	0.65	0.71	-23.89%
月	0.84	0.88		0.71	0.82	

注: NS 为相关系数的平方; r² 为纳什系数; PBIAS 为偏差百分比; 正值为模拟值偏小, 负值为偏大。

2.2 梯田措施对河道径流及生态基流的影响

2.2.1 对河道径流的影响

表 4 统计了梯田情景对泾河流域 1970—1979 年 10 a 的年均径流的影响。在无梯田情形下 (s₀), 景村站多年年均径流量达到 5.57×10⁹ m³。随着梯田面积增加, 景村站年均径流量呈下降趋势, 当梯田比例达到 4.76% (s₂₀₀₀) 时, 梯田可减少年均径流 8.30×10⁸ m³, 当梯田比例达到 23.68% (s₂₀₀₀X₅) 时, 年均径流减少量约是 s₂₀₀₀ 的 5 倍, 基本上与梯田面积扩大倍数相一致。梯田面积增加倍数和减流倍数基本一致, 其微小差异是由于不同面积梯田影响径流入渗和蒸发面的强度产生差异。河道径流量减少主要是由于梯田增大坡面蒸发量, 增加降雨就地入渗, 拦截坡面径流, 减少坡面径流汇入河道^[22]。

表 4 梯田措施对泾河流域年均径流的影响

梯田情景	年均径流量/ 10 ⁸ m ³	径流变化量/ 10 ⁸ m ³	单位梯田径流变化量/ (10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)
s ₀	55.710	—	—
s ₁₉₈₉	55.430	-0.280	-4.171
s ₂₀₀₀	54.900	-0.810	-4.265
s ₂₀₀₀ X ₂	54.080	-1.630	-4.311
s ₂₀₀₀ X ₃	53.280	-2.430	-4.285
s ₂₀₀₀ X ₄	52.490	-3.220	-4.258
s ₂₀₀₀ X ₅	51.760	-3.950	-4.179

注: 变化量正值代表增加产流量; 负值代表减少产流量。

从表 4 可以看出, 当梯田面积增大时, 单位面积梯田造成的河道年均径流变化先增大后减小, 但波动很小, 这是由于梯田模块是过程模拟, 梯田造成了多余的入渗及蒸发, 植物生长也会相应消耗更多的水量, 但不呈线性变化所致。景村以上区域梯田平均减流量约为 4.25×10⁴ m³/(km²·a)。这与马春林^[23]计算的渭河流域梯田年均减水 4.86×10⁴ m³/km² 基本一致。

图 2 为 s₀ (无梯田)、s₂₀₀₀ 和 s₂₀₀₀X₅ 情景 1970—1979 年各月平均流量。可以看出, 随着梯田面积的增加, 丰水期 (7—9 月) 月均径流量呈显著减小趋势, 枯水或平水期 (10—6 月) 月均径流量呈现增大趋势, 但变化微弱。由于梯田增加了壤中流和地下基流, 枯水期河道流量下降变缓, 使得枯水期月平均径流量增大^[24]。以无梯田 (s₀) 为基准, 在 s₂₀₀₀X₅ 情景下丰水期月均径流量减少 17.76%, 枯水期月均径流增加 10.46%。

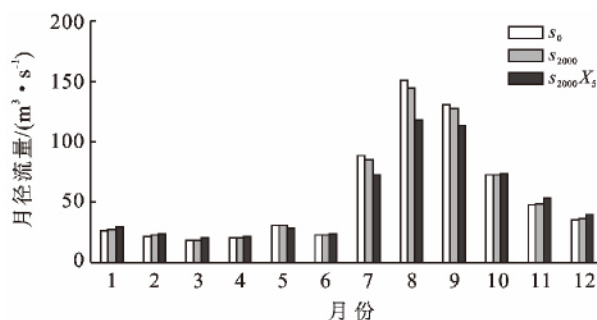


图 2 梯田对泾河流域月均径流的影响

图 3 为不同梯田面积条件下 1970—1979 年最枯月月均径流的模拟结果。随着梯田面积的增加, 最枯月月均径流都呈现微弱上升趋势。当梯田比例达 4.76% 时, 可增加最枯月径流 2.41%, 当梯田比例达到 23.68% 时, 可增加最枯月径流量 12.06%。

2.2.2 对河道生态基流的影响

在计算景村水文站河道生态基流的基础上, 在不同梯田情景下模拟景村

站的日流量,将其与景村站河段的生态基流 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行比较,得到 1970—1979 年不同梯田情景下年(月)均生态基流不满足天数。

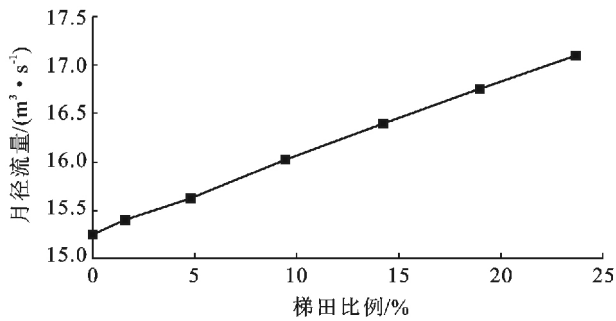


图 3 梯田对泾河流域最枯月月径流量的影响

图 4 为梯田情景对年生态基流的影响,由图可知:无梯田条件下(s_0)河道不满足生态基流标准平均天数为 21.6 d,随着梯田面积的增加,不满足生态基流标准的天数逐渐减少。当梯田比例达到 4.76% (s_{2000}),不满足天数减少到 19.5 d,削减了 9.72%;当梯田比例达到 23.68% ($s_{2000} X_5$)时,不满足生态基流天数减了 6 d,占无梯田条件下生态基流不满足天数的 27.78%。这说明修建梯田虽然减小河道径流量,但可以降低年生态基流不满足天数,对生态基流具有保障作用。

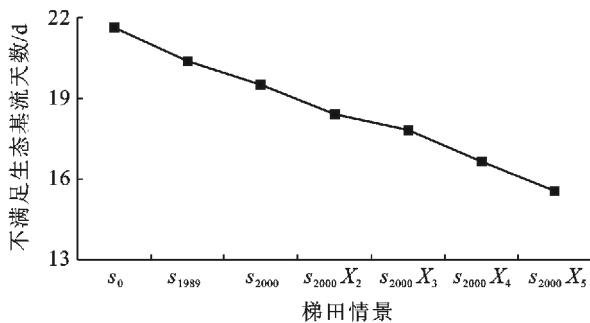


图 4 梯田措施对泾河流域年生态基流保障的影响

图 5 对泾河流域不同梯田面积条件下各月不满足生态基流天数进行了对比。由图 5 可见:随着梯田面积增加,各月份的生态基流不满足天数随之减少。12,1—3 月(枯水期)生态基流不满足天数最为突出。在梯田面积比例分别为 0% (s_0), 4.76% (s_{2000}) 和 23.68% ($s_{2000} X_5$)时,丰水期的生态基流不满足天数分别为:0.7,0.6 和 0.3 d,平水期的生态基流不满足天数为:1.2,1.0 和 0.6 d,枯水期的生态基流不满足天数分别为 3.4,2.9 和 2.2 d,梯田面积对河道生态基流的影响为:枯水期>平水期>丰水期。

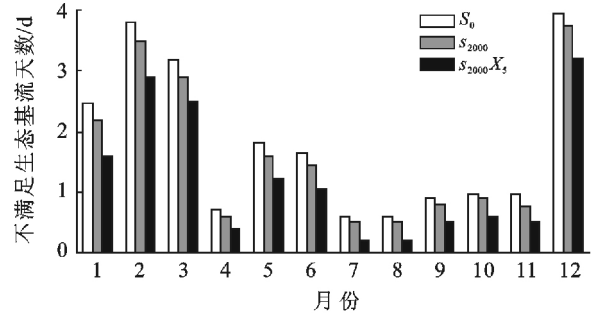


图 5 梯田措施对泾河流域月生态基流保障的影响

3 结论

(1) 嵌入梯田模块的 SWAT 模型在泾河流域日、月径流模拟适用,可以用于评价水土保持梯田措施的水环境效应。本文对于嵌入梯田模块的 SWAT 模型在黄土高原地区的应用具有借鉴意义。

(2) 修建梯田措施能显著的减少河道径流。随着流域内梯田面积增加,年产流量减少,平均减流量为 $4.25 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;丰水期月平均径流量呈现减小趋势,枯水期月平均径流量呈现增大趋势,梯田具有显著的蓄洪补枯作用,且梯田对丰水期的调控效果高于枯水期;最枯月径流的增加对保障泾河流域河道生态基流具有重要作用。

(3) 修建梯田措施对生态基流具有保障作用。以 Tennant 法计算的景村河段的生态基流 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为生态基流保障目标,随着梯田面积的增加,年、月生态基流不满足天数呈降低趋势;相对于无梯田条件下,流域内梯田比例达到 23.68%时,可削减年生态基流不满足天数 27.28%;梯田面积对河道生态基流的影响为:枯水期>平水期>丰水期。

总之,梯田具有显著的蓄洪补枯作用,对于流域河道径流、尤其是生态基流保障具有重要意义,同时嵌入梯田模块的 SWAT 模型可用于研究流域梯田对水环境的影响。

[参 考 文 献]

[1] 冉大川,赵力仪,王宏,等.黄河中游地区梯田减洪减沙作用分析[J].人民黄河,2005,27(1):51-53.
 [2] 王辉,张钰,刘光生,等.渭河源区 1970—2006 年梯田开发对水文产流的影响[J].水土保持研究,2009,16(2):220-226.
 [3] 孙瑞,张雪芹.基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J].水文,2010,30(3):28-32.
 [4] Arabi M, Frankenberger J R, Engel B A, et al. Representation of agricultural conservation practices with SWAT [J]. Hydrological Processes, 2008,22(16):3042-3055.

(下转第 116 页)

- (2):82-98.
- [9] Borendse F. Implications of increased litter production for plant biodiversity[J]. Trends Ecology and Evolution, 1999,14(1):4-5.
- [10] Scott D F. Soil wettability in forested catchments in South Africa: As measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2000,231(1):87-104.
- [11] 林波,刘庆,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志,2004,23(1):60-64.
- [12] 王卫军,赵婵璞,张绍轩,等. 不同经营措施对油松林枯落物持水性能的影响研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):103-106.
- [13] 李超,董希斌,宋启亮. 大兴安岭白桦低质林皆伐改造后枯落物水文效应[J]. 东北林业大学学报,2013,41(10):23-27.
- [14] 张向峰,王玉杰,刘敏. 北京市 3 个区域油松枯落物保水功能对比分析[J]. 水土保持通报,2014,34(2):311-314.
- [15] Leer. Forest Hydrology[M]. New York: Columbia University Press;1980.
- [16] 方海东,纪中华,杨艳鲜. 金沙江干热河谷新银合欢人工林枯落物层持水特性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(5):54-57.
- [17] 刘尚华,冯朝阳,吕世海. 京西百花山区 6 种植物群落凋落物持水性能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(6):179-182.
- [18] 郑文辉,林开敏,徐昇,等. 7 种不同树种凋落叶持水性能的比较研究[J]. 水土保持学报,2014,28(1):88-91.
- [19] 彭耀强,薛立,曹鹤,等. 三种阔叶林凋落物的持水特性[J]. 水土保持学报,2006,20(5):189-191.
- [20] Liu Shirong, Sun Pengsen, Wen Yuanguang. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003,27(1):16-22
- [21] 杜阿朋,赵知渊,王志超,等. 不同品种桉树人工林生长特征及持水性能研究[J]. 热带作物学报,2014,35(7):1306-1310.
- [22] 刘国华,张金池,林树燕,等. 4 种地被竹枯落物的水文特征及其截持降雨过程研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):105-108.

(上接第 110 页)

- [5] Saleh A, Gassman P W, Kling C L. Sny Magill Watershed Modeling Project: Final Report[M]. Center for Agricultural and Rural Development; Iowa State University, 2002.
- [6] Shao Hui, Baffaut C, Gao Jian'en. Development and application of algorithms for simulating terraces within SWAT[J]. Transactions of the ASABE, 2013,56(5):1715-1730.
- [7] 肖玉成,董飞,张新华,等. 基于 SWAT 分布式水文模型的河道内生态基流[J]. 四川大学学报:工程科学版,2013,45(1):85-90.
- [8] Combalicer E A, Lee S H, Ahn S, et al. Comparing groundwater recharge and base flow in the Bukmoongol small-forested watershed, Korea[J]. Journal of Earth System Science, 2008,117(5):553-566.
- [9] 李磊,徐宗学. 基于 VB 6.0 的生态基流计算软件开发与应用[J]. 水土保持通报,2012,32(3):145-149.
- [10] 张泽聪,韩会玲,陈丽. 基于改进的 Tennant 法的大凌河生态基流计算[J]. 水电能源科学,2013,31(9):29-31.
- [11] 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. 农业工程学报,2011,27(10):154-159.
- [12] 彭桂君,张守伟. 延边州主要河段生态基流计算分析[J]. 黑龙江科技信息,2012(35):23.
- [13] 林启才,李怀恩. 宝鸡峡引水对渭河生态基流的影响及其保障研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(11):114-119.
- [14] 马勇,秦百顺,王宏,等. 渭河水沙变化及其影响因素分析[J]. 中国水土保持,2002(8):18-20.
- [15] 冉大川,刘斌,罗全华,等. 泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. 人民黄河,2001,23(2):6-8.
- [16] 李星,徐学选,宇苗子,等. SWAT 模型在黄土丘陵区燕沟流域的应用研究[J]. 水土保持通报,2012,32(3):141-144.
- [17] 李道峰,田英,刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报,2004,59(4):565-573.
- [18] 李志,刘文兆,张勋昌,等. 未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J]. 生态学报,2009,29(7):3456-3464.
- [19] 武会先,吕洪予. 确定河流生态需水量的方法[J]. 人民黄河,2006,28(6):12-13.
- [20] 张淑兰,王彦辉,于澎湃,等. 泾河流域近 50 a 来的径流时空变化与驱动力分析[J]. 地理科学,2011,31(6):721-727.
- [21] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[C] // Osborn J F, Allman C H. Proceedings of the Symposium and Special Conference on Instream Flow Needs. Bethesda, Maryland; American Fisheries Society,1976, II :359-373.
- [22] 吴发启,张玉斌,宋娟丽,等. 水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J]. 水土保持学报,2003,17(5):28-31.
- [23] 马春林. 渭河流域坡面治理措施减水减沙效益分析[J]. 人民黄河,1992(7):25-27.
- [24] 邵辉. 渭河流域水土流失变化对梯田措施响应的模拟研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.