

基于 SWAT 模型新开发梯田模块的中国南方 红壤区梯田水沙及养分流失模拟

邵 辉^{1a}, 高建恩^{1b,1c,1d,2}, Claire Baffaut³, 王克勤⁴, 樊恒辉^{1c}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 水土保持研究所, c 水利与建筑工程学院,

d 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 水利部 水土保持研究所,

陕西 杨凌 712100; 3 USDA-ARS Cropping Systems and Water Quality Research Unit, Missouri 65211, USA;

4 西南林业大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224)

【摘要】 【目的】采用 SWAT 模型新开发梯田模块对中国南方红壤区梯田的水沙和养分流失进行模拟, 分析 SWAT 模型梯田模块在中国南方水土流失地区的适用性。【方法】采用 SWAT 模型中新开发的梯田模块, 结合其全球应用验证, 在初步对美国软垅验证的基础上, 利用资料较全的位于中国南方红壤区的云南尖山河小流域 2007—2008 年典型径流小区降雨径流、侵蚀产沙和总氮实测资料, 对隔坡梯田水沙及面源污染调控过程进行模拟与验证。【结果】SWAT 模型梯田模块对红壤区径流、侵蚀产沙及总氮的模拟结果能满足模型精度要求。利用梯田模块对红壤区隔坡梯田结构进行的优化表明, 在坡度小于 18.58°, 梯田单元坡长小于 20 m 的坡地上修建平坡比大于 1:5 的单阶地隔坡梯田, 可满足容许土壤流失量的要求。【结论】基于 SWAT 模型开发的梯田模块能够反映中国南方红壤区梯田降雨径流泥沙养分的运移过程, 为研究水土保持措施对流域水循环影响提供了新的技术支撑。

【关键词】 SWAT 模型; 水沙运移; 养分流失; 红壤区; 隔坡梯田; 中国南方

【中图分类号】 S157.3⁺1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)05-0147-10

Simulation of sediment and nutrients runoff of terrace in the red soil district of China using the newly developed terrace algorithm within SWAT model

SHAO Hui^{1a}, GAO Jian-en^{1b,1c,1d,2}, BAFFAUT Claire³,

WANG Ke-qin⁴, FAN Heng-hui^{1c}

(1 a College of Resources and Environment, b Institute of Soil and Water Conservation Chinese,

c College of Water Resource and Architecture Engineering, d National Engineering Research Center for

Water-saving Irrigation at Yangling, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Academy of Sciences,

Ministry of Water Resources, Institute of Soil and Water Conservation Chinese, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 USDA-ARS Cropping Systems and Water Quality Research Unit, Missouri 65211, USA;

4 Faculty of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: 【Objective】 This study analyzed the simulation feasibility of the newly developed terrace algorithm in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in soil and water erosion area of China by simulating the sediment and nutrients runoff in red soil district of South China. 【Method】 In this study,

【收稿日期】 2013-04-03

【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-003-02)

【作者简介】 邵 辉(1986—), 男, 陕西西安人, 在读博士, 主要从事水土保持和流域治理研究。E-mail: shaohui1111@163.com

【通信作者】 高建恩(1962—), 男, 山西运城人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事流域降雨径流侵蚀产沙调控及水土资源高效利用研究。E-mail: gaojianen@126.com

normal terrace regulation effects were verified using the newly developed process-based terrace algorithm, which has been tested with the runoff and sediment data collected on broad base terraces in the US. The measured data used in this paper included runoff, sediment and total nitrogen data of terrace fields in red soil district of South China from 2007 to 2008. 【Result】 SWAT model could fulfill the simulation satisfactory criteria in runoff, sediment and total nitrogen modeling. Further application of normal terrace structure optimization using the verified model indicated that the permissible soil loss standard could be met with ratio of slope length of bed segment to the sum of riser and undisturbed segment (RBU) larger than 1 : 5 on slope less than 18.58° and shorter than 20 m. 【Conclusion】 The terrace algorithm could simulate the rainfall runoff, sediment and nutrients transport processes of conservation measures in red soil district of South China. The newly developed terrace algorithm within the SWAT model provides a new tool for studying the watershed scale effects of soil and water conservation measures on water cycle.

Key words: SWAT model; runoff; water and sediment transport; nutrients loss; red soil district; normal terrace; South China

水土流失造成的水体养分富集、面源污染以及泥沙淤积是我国面临的严重水环境问题之一。梯田是世界上最古老同时也是应用最广的一种水土保持措施,其通过减短产沙坡长和减小径流流速,以减少坡面产沙、促进径流下渗及泥沙和养分的沉积^[1-2]。大量研究表明,梯田对于坡面水量水质具有明显的调控作用。石生新^[3]的降雨试验结果表明,在雨强 1.03 mm/min 条件下,水平阶结合造林可减少径流 20% 以上,减少产沙 60% 以上;王萍等^[4]研究发现,红壤区隔坡梯田可使天然降雨条件下的产流减少 65.3%,产沙减少 80.7%;梁改革等^[5]研究表明,隔坡梯田可使作物水分利用效率提高 50% 以上;张展羽等^[6]研究了红壤区果园梯田对径流养分的调控作用,结果表明梯田可使径流中的总氮浓度减少 69.51%;韩玉国等^[7]对北方石坎梯田的研究结果表明,水土保持梯田措施可使总氮流失减少 50.5%~91.4%,总磷流失减少 40.6%~87.3%。然而受研究手段的限制,如何通过优化梯田结构将水土流失控制在环境容许范围内,目前相关的研究成果还相对较少。

水文模型不仅可以模拟并预测不同条件下水土保持措施对水量水质的影响,且其相对于野外试验具有变更试验方案快、模拟成本低等特点^[8-10]。因此,利用水文模型评价水土保持措施的流域水环境效应已成为水土保持领域研究的重要方向。目前,在水文模型中多采用调整模型参数的方法对水土保持措施进行模拟。基于美国农业部开发的土壤水分评价模型(Soil and Water Assessment Tool, SWAT 模型)和农业政策环境扩展模型(APEX 模型),Araabi 等^[11]及 Waidler^[12]等采用调节径流曲线数值

(Curve number, 简写 CN 值)的方式模拟梯田对水量的影响,通过调节坡长以及耕作管理因子(USLE-P 因子)模拟梯田对产沙的影响。这种调节模型参数的模拟方法可以在一定程度上反映水土保持措施对水量水质的调控作用,但其只是片面和间接地反映了梯田等水保措施在改变流域坡面地形及促使泥沙和养分沉积等方面的作用。

基于此,Shao 等^[13]针对亟需研究水土保持措施对流域水循环影响的实际,选取典型的水土保持措施梯田,开发了基于 SWAT 模型的梯田措施水土流失过程模块,使用美国软埝水沙资料进行了初步验证。然而由于中国梯田形式、土壤与地形等特点与美国相比差异较大,本研究利用资料较全的云南澄江县典型径流小区 2 年径流、泥沙和总氮实测资料,对 SWAT 模型梯田模块的梯田水土流失过程模拟进行进一步验证,以期为中国的水土保持措施对流域水循环的影响提供新的技术支撑。

1 SWAT 模型梯田模块

1.1 梯田水沙及养分调控模型

SWAT 模型梯田模块的数学模拟已在文献^[13]中给出,针对中国与美国梯田在梯田类型、土壤质地、地形条件等方面的差异,特别是对修建在陡坡上且无排水设施的梯田,其水土流失过程与国外情况有所不同,针对该模式其数学描述如下。

1.1.1 梯田结构的数学描述 针对国内梯田修建地形复杂、坡度较大、梯田结构描述困难等问题,梯田模型将修建后的原始坡面重新分割为切坡段、平坡段和隔坡段 3 种坡段,其水平长度分别用 L_r 、 L_b 、 L_u 表示。一般情况下,隔坡梯田中的一个梯田单元

包括 2 个切坡段、1 个平坡段和 1 个隔坡段(图 1)。模型在模拟过程中将整个坡面首先分为若干个形状

相同的梯田单元,梯田单元的各种坡段由各自的坡度和坡长来分别表示和模拟。

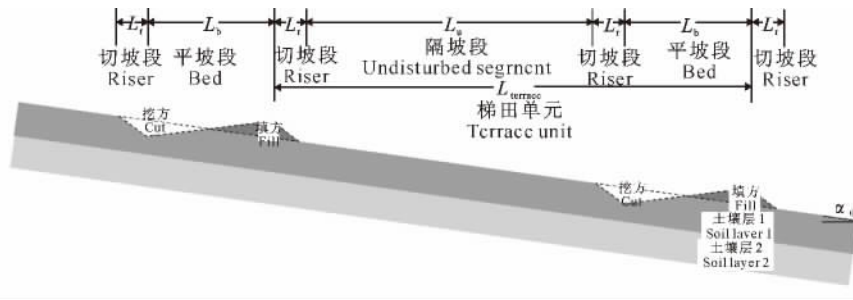


图 1 中国南方红壤区隔坡梯田坡面示意图

Fig.1 Sketch of normal terrace in the red soil district of South China

梯田除了将整个坡面分割为不同坡段外,还造成了一定的蓄水体积(图 2)。这部分蓄水体积可以拦截来自上坡的径流泥沙等运移物,促进径流的下渗、蒸发以及泥沙、养分的沉积。当无排水措施时,仅当来水体积大于蓄水最大体积时才发生流产沙。最大蓄水体积计算公式如下:

$$V_{max} = N_t / 2 \cdot (L_b \cdot \tan \alpha_b)^2 \cdot (\tan^{-1} \alpha_b + \tan^{-1} \alpha_r) \cdot W \quad (1)$$

式中: V_{max} 为坡面所有梯田蓄水的最大体积, m^3 ; N_t 为坡面上修建的梯田单元个数; L_b 为平坡段坡长, m ; α_b 与 α_r 分别为平坡段和切坡段的坡度($^\circ$); W 为垂直于坡向的田埂长度, m 。

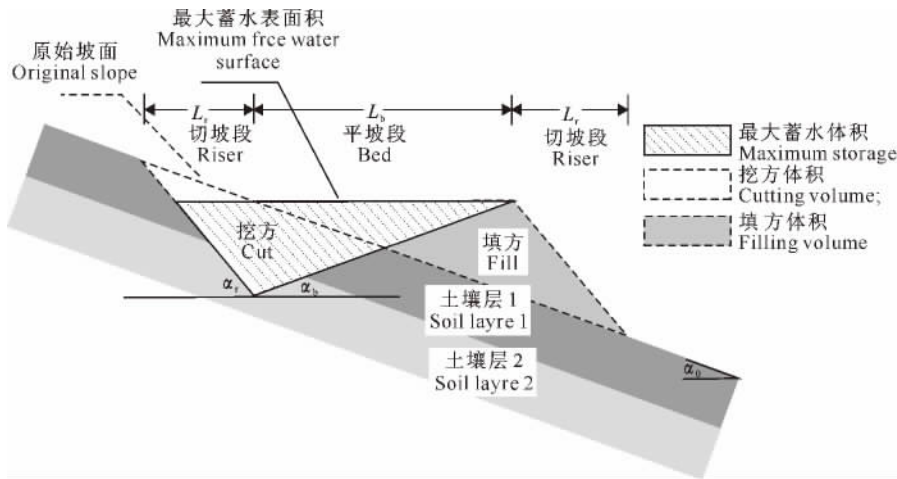


图 2 中国南方红壤区隔坡梯田蓄水示意图

Fig.2 Sketch of normal terrace storage volume in the red soil district of South China

1.1.2 梯田坡段水沙及养分模拟算法 为反映我国梯田修建后对陡坡产流产沙过程的影响,首先利用梯田模块对梯田不同坡段分别进行模拟,模拟所用到的产流模型为 SCS 产流方程,该方程的基本形式^[14]为:

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

式中: Q_{surf} 为模拟日产流量, mm ; R_{day} 为日降水量, mm ; I_a 为初始拦截量, mm ; S 为滞留系数, mm 。

式(2)中滞留系数(S)与前期土壤含水量、土壤质地、种植作物有关,当降水量小于初始拦截量(I_a)时,该坡段不产流。

产沙模型采用修正的通用土壤流失方程 MUSLE^[14-15],相对于原有的通用土壤流失方程

(USLE),该模型使用径流因子取代了降雨因子,可模拟单次降雨产沙量。产沙模型的具体形式如下:

$$SED = 11.8 (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot A)^{0.56} \cdot$$

$$K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (3)$$

式中: SED 为产沙量, t ; Q_{surf} 为日产流量, mm ; q_{peak} 为峰值流速, m^3/s ; A 为坡段面积, hm^2 ; K_{USLE} 为 USLE 方程的土壤可蚀性因子,取值 $0.013 t \cdot m^2 \cdot h / (m^3 \cdot t \cdot cm)$; C_{USLE} 为 USLE 方程的覆盖及作物管理因子; P_{USLE} 为 USLE 方程的耕作管理因子; LS_{USLE} 为 USLE 方程的地形因子; $CFRG$ 为粗颗粒因子。

氮流失模拟采用美国农业部开发的 Soil and Water Assessment Tool 模型(SWAT 模型)中所采

用的方法^[14],将土壤中的氮分为有机氮、硝态氮(NO_3^- -N)与氨态氮(NH_4^+ -N),采用该方法模拟产流产沙过程中不同形态氮的流失量。

1.1.3 梯田蓄水作用模拟 当坡段模拟完成后,产生的径流、泥沙以及氮素会蓄积到梯田,梯田的蓄水作用主要体现在促进径流蒸发、下渗以及泥沙与氮素沉积等。由于本研究选择的梯田无排水设施,梯田蓄水作用模拟使用的径流、泥沙、氮输出量计算方法需要进行适用性修改,其计算公式为:

$$V_{ov} = V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}} - V_{\text{evap}} - V_{\text{inf}} - V_{\text{max}}, \quad (4)$$

$$SED_{ov} = conc_{\text{sed},ov} \cdot V_{ov}, \quad (5)$$

$$N_{ov} = conc_{N,ov} \cdot V_{ov}, \quad (6)$$

$$conc_{\text{sed},ov} = (SED_{\text{stored}} + SED_{\text{flowin}} - SED_{\text{stl}}) / (V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}} - V_{\text{evap}} - V_{\text{inf}}), \quad (7)$$

$$conc_{N,ov} = (N_{\text{stored}} + N_{\text{flowin}} - N_{\text{stl}}) / (V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}} - V_{\text{evap}} - V_{\text{inf}}). \quad (8)$$

式中: V_{ov} 为梯田坡面日产流量, m^3 ; V_{stored} 为日初梯田内的蓄水量, m^3 ; V_{flowin} 为坡段产流量, m^3 ; V_{evap} 为梯田蓄水蒸发量, m^3 ; V_{inf} 为梯田蓄水下渗量, m^3 ; SED_{ov} 为梯田坡面日产沙量,t; $conc_{\text{sed},ov}$ 为坡面产流中泥沙的质量浓度, t/m^3 ; N_{ov} 为梯田坡面氮流失量,kg; $conc_{N,ov}$ 为坡面产流中氮的质量浓度, t/m^3 ; SED_{stored} 为日初梯田内的泥沙量,t; SED_{flowin} 为日梯田内的产沙量,t; SED_{stl} 为日蓄水泥沙沉积量,t; N_{stored} 为日初梯田内的氮蓄积量,kg; N_{flowin} 为日梯田内的产氮量,kg; N_{stl} 为日蓄水氮沉积量,kg。

公式(4)中的梯田蓄水蒸发量(V_{evap})在考虑平坡段叶面积指数条件下进行计算,梯田蓄水下渗量(V_{inf})在考虑平坡段土壤水含量条件下进行计算,其计算公式分别为:

$$V_{\text{evap}} = \begin{cases} 10 \cdot E_0 \cdot SA \cdot \left(1 - \frac{LAI_{\text{trcb}}}{LAI_{\text{evap}}}\right), & \text{当 } LAI_{\text{trcb}} < LAI_{\text{evap}}; \\ 0, & \text{当 } LAI_{\text{trcb}} \geq LAI_{\text{evap}}. \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{\text{inf}} = \begin{cases} 240 \cdot K_{\text{sat}} \cdot SA, & \text{当 } SW_{\text{trcb}} < 0.5 \cdot FC; \\ 240 \cdot K_{\text{sat}} \cdot SA \cdot \left(1 - \frac{SW_{\text{trcb}}}{FC}\right), & \text{当 } 0.5 \cdot FC \leq SW_{\text{trcb}} < FC; \\ 0, & \text{当 } SW_{\text{trcb}} \geq FC. \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_0 为当日潜在蒸发量,mm; SA 为蓄水蒸发、下渗或养分沉积发生前的自由水面面积, hm^2 ; LAI_{trcb} 为平坡段叶面积指数,根据作物生物量估算^[14]; LAI_{evap} 为不发生蒸发的叶面积指数,默认值为3.0; K_{sat} 为平坡段表层土壤的饱和导水率,

mm/h; SW_{trcb} 为发生蓄水下渗前平坡段土壤平均含水量,mm; FC 为平坡段土壤持水量,mm。

日梯田内的产沙量(SED_{flowin})为MUSLE方程计算的各坡段产沙量之和,梯田日蓄水泥沙沉积量(SED_{stl})根据用户设定的泥沙平衡浓度($conc_{\text{sed},eq}$)进行指数衰减计算^[15],计算方法如下:

$$SED_{\text{stl}} = (conc_{\text{sed},i} - conc_{\text{sed},f}) \cdot (V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}}), \quad (11)$$

$$conc_{\text{sed},i} = (SED_{\text{stored}} + SED_{\text{flowin}}) / (V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}}), \quad (12)$$

$$conc_{\text{sed},f} = \begin{cases} (conc_{\text{sed},i} - conc_{\text{sed},eq}) \cdot \exp(k_{\text{trc}} \cdot t \cdot d_{50}) + \\ conc_{\text{sed},eq}, & \text{当 } conc_{\text{sed},eq} < conc_{\text{sed},i}; \\ conc_{\text{sed},i}, & \text{当 } conc_{\text{sed},eq} \geq conc_{\text{sed},i}. \end{cases} \quad (13)$$

式中: $conc_{\text{sed},i}$ 为沉积发生前蓄水体积中泥沙的质量浓度, t/m^3 ; $conc_{\text{sed},f}$ 为泥沙沉积后梯田蓄水体积中泥沙的质量浓度, t/m^3 ; $conc_{\text{sed},eq}$ 为梯田蓄水体积中泥沙冲淤平衡的最大质量浓度, t/m^3 ; k_{trc} 为梯田泥沙的衰减常数, $1/\text{d}$; t 为模拟时间步长(day),由于无排水设施, $t=1\text{d}$; d_{50} 为梯田蓄水体积中泥沙的中值粒径, μm 。其中,衰减常数 k_{trc} 可由用户自定义。

公式(8)中日梯田内的产氮量(N_{flowin})为不同坡面产量之和^[16]。梯田日蓄水氮沉积量(N_{stl})采用表征沉积速率方法进行计算^[14,17],计算公式为:

$$N_{\text{stl}} = 10\,000 \cdot v \cdot SA \cdot conc_{N,i} \cdot t, \quad (14)$$

$$conc_{N,i} = (N_{\text{stored}} + N_{\text{flowin}}) / (V_{\text{stored}} + V_{\text{flowin}}). \quad (15)$$

式中: N_{stl} 为梯田日蓄水氮沉积量,kg; v 为表征沉降速率, m/d ; $conc_{N,i}$ 为沉积发生前蓄水体积中氮的质量浓度, kg/m^3 。

1.2 SWAT模型中梯田模块的模拟与验证

目前,笔者已在SWAT模型中将梯田模拟方法编译为梯田模拟模块,并对美国软埝水沙流失过程进行了初步验证。为研究SWAT模型中梯田模块在模拟中国隔坡梯田水量水质方面的适用性,本研究采用云南省澄江县尖山河小流域标准径流小区2007—2008年的天然降雨径流、侵蚀产沙及总氮资料对其进行进一步检验。

1.2.1 研究区概况 验证资料采集自云南省尖山河小流域的标准径流小区。尖山河小流域($24^{\circ}32'00'' \sim 24^{\circ}37'38''\text{N}$, $102^{\circ}47'21'' \sim 102^{\circ}52'02''\text{E}$)位于珠江南北盘江上游岩溶区域的玉溪市澄江县,为抚仙湖一级支流,海拔1722.0~2347.4m,总面积35.42 km^2 ,年均降水量1050mm^[4]。

流域内布置有烤烟种植坡地标准径流小区,径

流小区南北顺坡设置,海拔 1 773 m。径流小区 2007 年为无梯田坡耕地(以下简称为无梯田对照小区),2008 年改造为含有隔坡梯田的径流小区^[4](图 3,以下简称为梯田小区)。小区底部设有集流池,池

内安装水文尺观测水位。小区旁布置有 RG2-M 自记雨量计记录降雨过程。每次降雨产流后,在集流池中取样利用置换法计算泥沙含量。试验小区测量的养分数据主要包括次降雨水样中的总氮浓度。

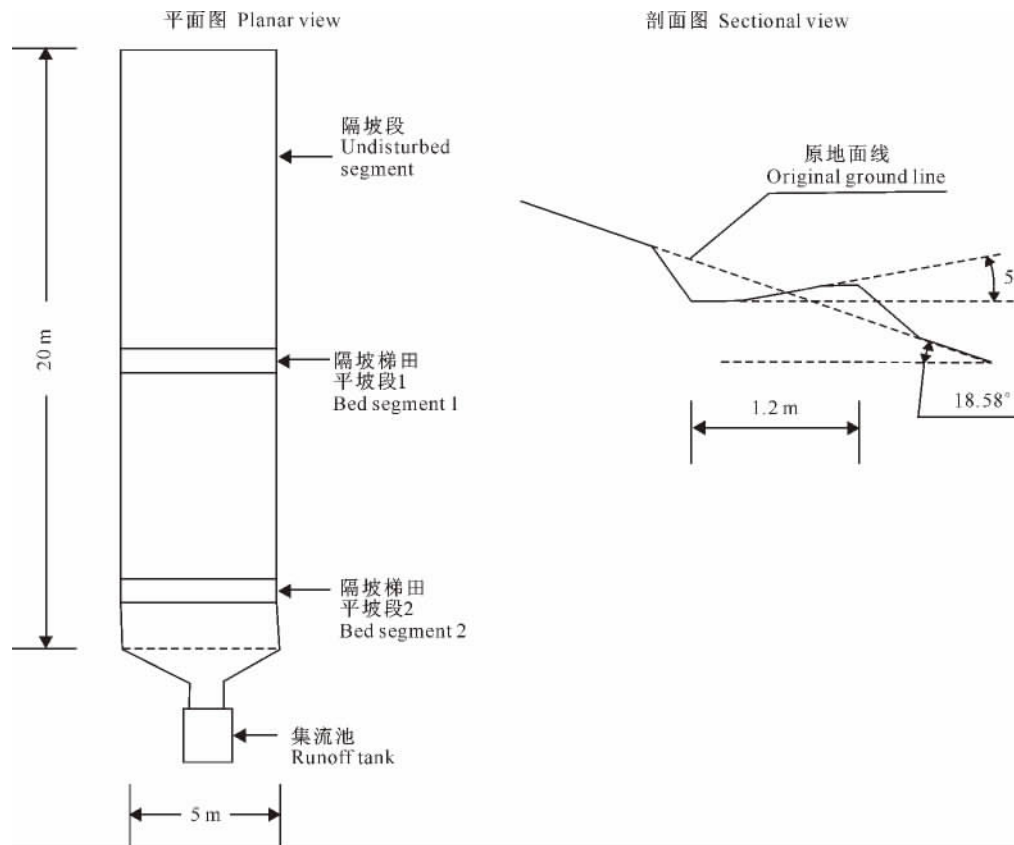


图 3 中国南方红壤区隔坡梯田试验小区示意图

Fig. 3 Sketch of normal terrace experimental plot in the red soil district of South China

试验小区在 2007—2008 年均种植烤烟,每年 4 月下旬至 5 月中旬移栽,并在移栽后 25 d 内施肥 3 次:底肥、提苗肥和追肥。底肥和追肥共计施用烟草专用复合肥(12-6-24)1 020 kg/km²,其中含 N 量为 122.4 kg/hm²,含 P 量 61.2 kg/hm²;提苗肥为烤烟提苗肥(28-0-5),共计施用 45 kg/hm²,含 N 量 12.6 kg/hm²。

1.2.2 SWAT 模型梯田模块数据及参数的选取

SWAT 模型梯田模块所用 2007—2008 年气象数据,如日降水量、最高最低温、湿度、太阳辐射强度以及风速由 SWAT 模型全球气象数据库下载(<http://globalweather.tamu.edu/>),所用数据气象站点位于试验小区东北方向约 30 km(24°49′19″N, 103°7′30″E)。模型所用气象生成器(WGN)参数采用 SWAT 模型输入参数计算软件 pcpSWAT 以及 dew/dew02 计算获取。

表 1 汇总了模拟小区坡面主要参数,其中坡度、坡长等地形参数根据文献^[4]确定,USLE 管理因子(P 因子)选用等高耕作的参数推荐值^[14,18],对照小区 CN 值选用低渗透性土壤(土壤水文分组为 D)作物条带种植的推荐值^[14,19]。考虑到梯田小区修建较晚,土壤疏松,渗透性增强,其 CN 值选用较低渗透性土壤(土壤水文分组为 C)作物条带种植的推荐值^[14,19]。

研究区土壤类别为红紫泥土,土壤物理数据由中国土种数据库根据地点查询获取。模型所用土壤参数根据所获取的土种及物理参数结合美国土壤-作物-空气-水(SPAW)模型的土壤参数模块计算得出^[20-21]。由于隔坡梯田是在原 2007 年对照小区基础上修建的,修建过程中必然导致土壤扰动。因此,部分梯田小区土壤参数相对于对照小区有所变化,具体参数汇总结果如表 2 所示。

表 1 中国南方红壤区试验小区主要坡面参数汇总

Table 1 Main slope parameters of terrace plot in the red soil district of South China

试验小区 Terrace plot	坡段 Segment	曼宁系数 Manning N	坡度/(°) Slope steepness	坡长/m Slope length	宽度/m Contour width	种植期 CN 值 Planting CN	收获期 CN 值 Harvesting CN	USLE 管理 因子 USLE P-factor
无梯田对照 Control		0.03	18.58	20.0	5	89	90	1
梯田 Terrace	平坡段 Bed	0.03	5.00	1.2	5	85	86	0.6
	切坡段 Riser	0.03	45.00	0.38	5	85	86	1
	隔坡段 Undisturbed	0.03	18.58	8.03	5	85	86	1

表 2 中国南方红壤区试验小区主要土壤参数汇总

Table 2 Main soil parameters of terrace plot in the red soil district of South China

土壤层次 Soil layer	厚度/cm Thickness	体积质量/ (g·cm ⁻³) Bulk density	颗粒含量/% Particle percentage			有机碳/% Organic carbon	有效含水量/ (cm·cm ⁻¹) Available water content	饱和导水率**/ (mm·h ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity	土壤可蚀性 USLE-K
			沙粒 Sand	黏粒 Clay	粉粒 Silt				
1	26	1.39 (1.20)*	11	57	32	0.64	0.15 (0.45)*	5.00(15.00)*	0.50(1.00)*
2	39	1.2	10	60	30	0.46	0.15 (0.45)*	5.00	0.5
3	39	1.2	10	60	30	0.46	0.15 (0.45)*	5.00	0.5

注: * 括号内数据为梯田小区所用土壤参数; ** 饱和导水率为率定结果。

Notes: * values in bracket were used for terrace plot; ** Saturated conductivity was calibrated value.

1.2.3 SWAT 模型梯田模块参数的率定 本研究模拟时段为 2006—2009 年,即以 2006 年数据用于模型初始化。使用 2007 年无梯田对照小区日径流、侵蚀产沙和总氮数据对模型参数进行率定,使用 2008 年梯田小区测量数据对模型适用性进行验证。考虑到试验测量时间可能晚于实际产流时间,当某次降雨径流事件长于 1 d 时,率定或验证时将多日产流、产沙或总氮计算值合并后与实测值进行对比。

径流参数率定主要是对影响坡面产流的土壤饱和导水率进行率定,侵蚀参数率定是对 MUSLE 方程作物覆盖与管理因子年平均最小值 USLE-C_{min} 进行率定。氮模拟选用常用的总氮作为模型验证数据,并对有机氮富集比(ERORGN)以及硝态氮渗透系数(NPERCO)进行参数率定。其余模型参数均采用默认值。

参数率定时采用纳什系数(NSE)、中误差与实

测值标准偏差的比值(RSR)及偏差百分比(PBIAS)来评价模拟结果,其计算公式^[22-23]分别为:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right], \quad (16)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2}}, \quad (17)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \times 100\%. \quad (18)$$

式中:Y_i^{obs} 为第 i 个观测数据,Y_i^{sim} 为第 i 个模拟数据,Y^{mean} 为观测平均值。

参数率定结果为纳什系数最高的一组参数值,本研究中的参数率定结果如表 3 所示。

表 3 中国南方红壤区径流小区模拟参数的率定

Table 3 Parameter verification of the simulation plot in the red soil district of South China

参数 Parameters	率定值 Calibration value	参数 Parameters	率定值 Calibration value
土壤饱和导水率/(mm·h ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity	5.00	有机氮富集比(ERORGN) Organic nitrogen enrichment ratio (ERORGN)	1.85
作物覆盖与管理因子年平均最小值(USLE-C _{min}) Minimum value for the cover and management factor	0.03	硝态氮渗透系数(NPERCO) Nitrate percolation coefficient (NPERCO)	0.20

2 结果与分析

2.1 基于 SWAT 模型梯田模块对红壤区梯田径流的模拟

为验证 SWAT 模型梯田模块的适用性,本研究

比较了中国云南尖山河小流域无梯田对照小区以及梯田小区的日径流模拟值与实测值。由图 4 可以看出,SWAT 模型梯田模块在无梯田对照小区与梯田小区均有较优的模拟结果,大多数日径流对比点均分布在“1:1”对称线的附近。

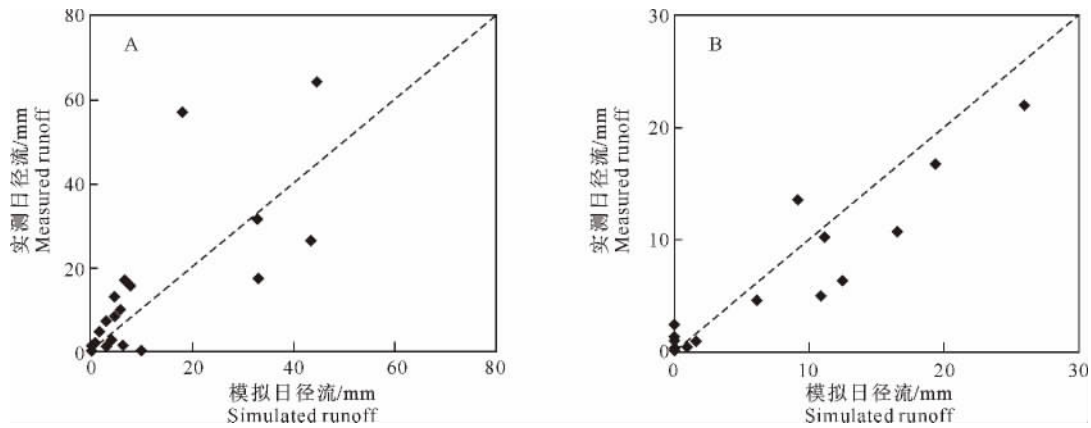


图 4 基于 SWAT 模型梯田模块的径流模拟结果

A. 无梯田对照小区 1 : 1 径流对比结果; B. 梯田小区 1 : 1 径流对比结果

Fig. 4 Runoff simulation of the terrace algorithm in SWAT model

A. Runoff yield comparison in the control plot; B. Runoff yield comparison in the terrace plot

表 4 总结了 SWAT 模型梯田模块在模拟径流、侵蚀产沙以及总氮时的 NSE、RSR 和 PBIAS 指标。Moriasi 等^[23]研究表明,当径流模拟结果的 NSE > 0.50, RSR < 0.70 且 |PBIAS| < 25% (侵蚀产沙和总氮的 |PBIAS| 合格标准分别为 55% 和 70%, NSE 及 RSR 与径流标准一致) 时, SWAT 模型梯田模块

可满足模拟精度要求。从表 4 可以看出, 无论无梯田对照小区还是梯田小区, 模型对径流的模拟均可以满足模拟精度要求, 且梯田小区 NSE 与 RSR 明显优于无梯田小区, 说明 SWAT 模型梯田模块更能反映梯田小区的产流过程。

表 4 中国南方红壤区径流小区模拟精度定量指标汇总

Table 4 Summary of simulation accuracy indices of the simulation plot in the red soil district of South China

验证项目 Validation items	无梯田对照小区(率定) No terrace control plot (calibration)			梯田小区(验证) Terrace plot (validation)		
	NSE	RSR	PBIAS/%	NSE	RSR	PBIAS/%
径流 Runoff	0.58	0.64	19.87	0.80	0.39	-13.50
产沙量 Sediment	0.50	0.69	19.20	0.69	0.50	27.73
总氮 TN	0.53	0.78	-11.72	0.61	0.60	-12.57

2.2 基于 SWAT 模型梯田模块对红壤区梯田侵蚀的模拟

图 5 采用对数坐标比较了无梯田对照小区及梯田小区侵蚀产沙量的模拟结果与实测结果。由图 5 可知, 与径流模拟结果相似, 侵蚀产沙量模拟值与实测值对比点在 2 个小区均分布于 1 : 1 线的附近, 其中梯田小区的模拟值与实测值对比点距离 1 : 1 线更加接近。但当实测值较小时, SWAT 模型梯田模块在梯田小区和无梯田小区的计算结果均会出现零值。

根据侵蚀产沙模拟判定标准^[23], 可知 SWAT 模型梯田模块在模拟无梯田对照小区和梯田小区时均符合模拟精度要求, 但梯田侵蚀产沙量模拟结果相对于实测结果较为偏低 (PBIAS = 27.73%)。结合图 5-B 可以看出, 导致梯田侵蚀产沙量模拟值偏低的主要原因在于最大一场产沙事件(最高的菱形

点), 其为梯田修建后的首场大产沙事件; 此外, 修建梯田导致的土壤松动也可能是造成该场产沙模拟值偏小的原因之一。另外, 短历时的高强度暴雨也可导致模型产沙的计算偏差。相对于径流模拟, 梯田侵蚀产沙量的模拟精度偏低 (侵蚀产沙量的 NSE 相对于径流的 NSE 小), 这与以往部分使用 SWAT 模型进行的径流侵蚀产沙的验证结果相吻合^[24]。

2.3 基于 SWAT 模型梯田模块对红壤区梯田总氮流失的模拟

在采用 2007 年无梯田对照小区总氮数据对 SWAT 模型梯田模块进行参数率定的基础上, 采用梯田模块对 2008 年梯田小区总氮进行模拟。结果 (表 4) 显示, NSE 系数达到 0.61, RSR 达到 0.60, PBIAS 为 -12.57%, 模拟精度满足合理性要求, 说明 SWAT 模型梯田模块可用于坡面尺度梯田总氮流失的模拟。

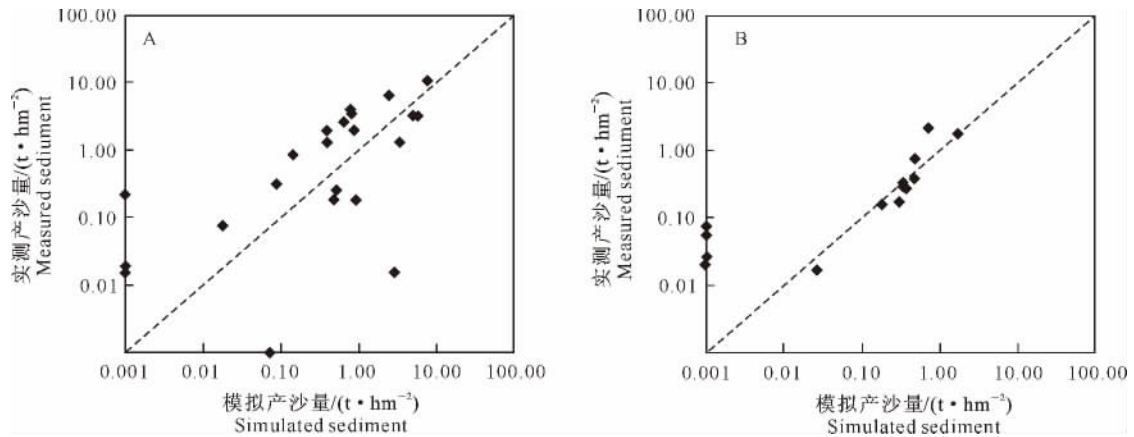


图 5 基于 SWAT 模型梯田模块的侵蚀产沙量模拟结果

A. 无梯田对照小区 1:1 侵蚀产沙量对比结果; B. 梯田小区 1:1 侵蚀产沙量对比结果

Fig. 5 Sediment yield simulation of the terrace algorithm in SWAT model

A. Sediment yield comparison in the control plot; B. Sediment yield comparison in the terrace plot

从图 6 可以看出, SWAT 模型梯田模块在模拟梯田小区的总氮时, 相对于无梯田小区其模拟精度更好, 说明 SWAT 模型梯田模块模拟的梯田调控作

用以及所考虑的参数, 能在一定程度上反映梯田条件下总氮流失的实际情况。

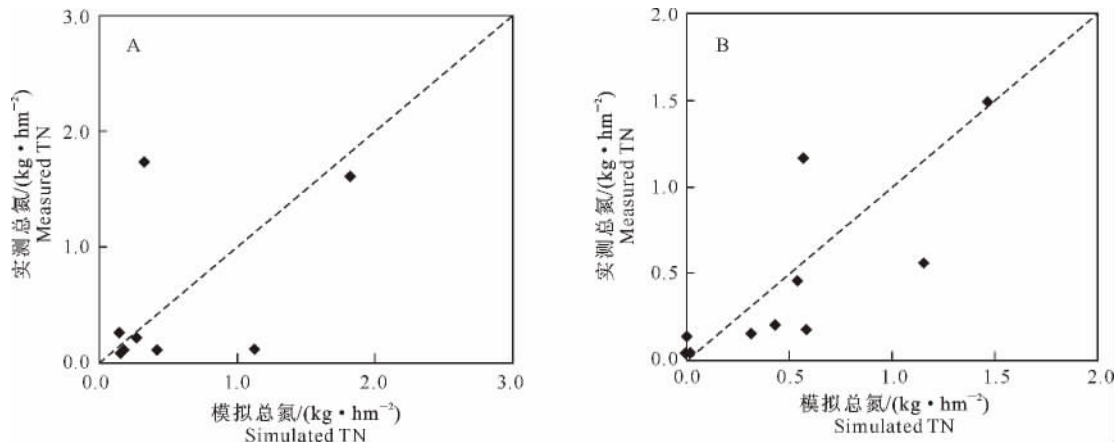


图 6 基于 SWAT 模型梯田模块的总氮模拟结果

A. 无梯田对照小区 1:1 总氮对比结果; B. 梯田小区 1:1 总氮对比结果

Fig. 6 Total nitrogen simulation of the terrace algorithm in SWAT model

A. Total nitrogen yield comparison in the control plot; B. Total nitrogen yield comparison in the terrace plot

2.4 红壤区隔坡梯田结构的优化

土壤侵蚀及伴随流失的土壤养分是目前我国最严重的生态环境问题之一, 数学模型可通过快速变更情景方案模拟不同条件下的土壤侵蚀量。因此, 本研究基于前文分析, 使用 SWAT 模型梯田模块对隔坡梯田不同平坡比及不同梯田单元长度条件下的土壤侵蚀模数进行模拟, 从而可以为梯田结构的优化提供依据。

隔坡梯田设计主要是确定平坡段与隔坡段长度比值(即平坡比, 本研究采用平坡段长度与隔坡段+两切坡段长度的比值表示)以及梯田单元的长度(即

水平投影长度)^[5,25]。本研究通过模拟不同平坡比条件下 2007—2008 年梯田年平均侵蚀模数与梯田单元长度的关系, 结合侵蚀模数控制标准来确定满足水质要求时不同坡长修建单条梯田的最小平坡比, 模拟结果如图 7 所示。本研究所采用的侵蚀模数调控标准是水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)^[26]关于南方红壤区的容许土壤流失量, 即 500 t/(km²·年), 如图 7 中虚线所示。在梯田小区模拟中, 所采用参数除坡长单独计算外, 其余参数值均采用表 1~3 中梯田小区的相关参数值; 而在无梯田对照小区模拟中, 则采用对照小区相关参数

值。需要指出的是,图 7 中所有梯田模拟结果均是在相应坡长条件下,在坡面底部修建单阶地梯田的侵蚀模拟结果,图中部分侵蚀模数曲线出现零值是由于全部径流被拦截而坡面无产流所导致,在梯田结构优化时暂不予考虑。

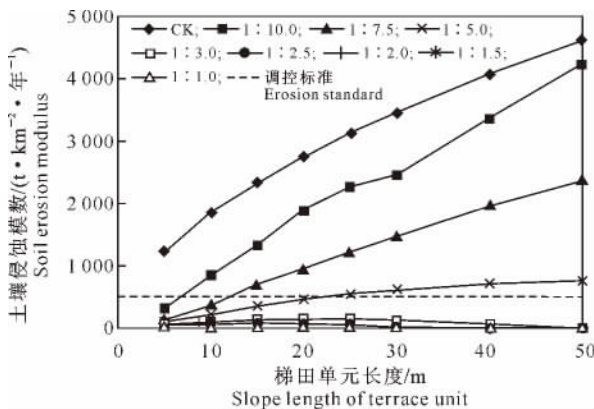


图 7 不同平坡比条件下土壤侵蚀模数与梯田单元长度的关系

Fig. 7 Relation between erosion modulus and unit length of terrace under different ratios of bed to undisturbed segment (RBU)

从图 7 可以看出,在未修建梯田时,坡面侵蚀模数随坡长的增大显著增加。而修建梯田后,侵蚀模数随坡长的增大同样表现出增大趋势。另外,当平坡比小于 1 : 10.0 时,修建单阶地梯田的侵蚀控制效应相对有限,造成该模拟结果的原因一方面是由于较小的平坡比创造的蓄水体积较为有限,梯田的泥沙沉积作用不明显;另一方面,在修建梯田时对原状土壤造成扰动,梯田土壤可蚀性因子即 K 值相对于无梯田小区有所增大,从而增大了梯田小区的产沙量。

从隔坡梯田优化结果(表 5)可以看出,在坡度小于 18.58°、坡长小于 40 m 的坡地上,修建平坡比大于 1 : 3.0 的单阶梯田,坡面侵蚀模数即可满足容许土壤流失量控制目标;对梯田单元长度小于 20 m 的坡地,修建单阶梯田的平坡比大于 1 : 5.0 时,可满足容许土壤流失量的控制目标;而当坡面长度大于 50 m 后,修建单阶梯田已不能满足容许土壤流失量控制标准(图 7 中梯田单元长度 50 m 对应低于虚线的点均为不产流)的要求,故需要修建多阶地梯田以控制坡面产沙。

表 5 中国南方红壤区隔坡梯田结构的优化

Table 5 Optimization result of normal terrace structure in the red soil district of South China

原坡面坡度/(°) Original slope steepness	梯田单元长度/m Terrace unit slope length	平坡段坡度/(°) Slope steepness of bed segment	最优平坡比 Optimized RBU
18.58	5	5	≥1 : 10.0
18.58	10	5	≥1 : 7.5
18.58	15	5	≥1 : 5.0
18.58	20	5	≥1 : 5.0
18.58	30	5	≥1 : 3.0
18.58	40	5	≥1 : 3.0
18.58	50	5	—

3 结 论

针对我国水土保持措施对流域水循环影响亟需研究而缺乏有效工具等问题,利用南方红壤径流小区水量水质资料,采用 SWAT 模型梯田模块对隔坡梯田调控作用进行了模拟验证,并对隔坡梯田结构进行了优化,结果表明:

1)经实测水量水质资料验证,基于 SWAT 模型开发的梯田模块基本可以反映梯田径流、侵蚀泥沙以及总氮流失过程,模拟结果均满足精度要求,表明 SWAT 模型梯田模块在模拟中国红壤区梯田水土流失过程中有一定的适用性,说明其开发成功合理,为研究水土保持措施对流域水循环的影响提供了新的技术支撑。

2)在坡度小于 18.58°,梯田单元长度小于 20 m 的坡地上,修建单阶地梯田的平坡比需大于 1 : 5.0,这样才能满足容许土壤流失量(≤ 500 t/(年·km²))控制目标的要求;而当梯田单元长度大于 50 m 时,需要修建多阶地梯田以满足侵蚀控制指标的需要。

致谢:赵春红、王宏杰、许秀泉、张元星、王红、王飞等在本研究数据收集与处理过程中提供了帮助与支持,在此一并感谢!

[参考文献]

[1] Dorren L, Rey F. A review of the effect of terracing on erosion [C]//Boix Fayos C, van Asselen S, Imeson A C, Eds. Briefing Papers of the Second SCAPE Workshop. Cinque Terre, Italy: [s. n.], 2004:97-108.

- [2] Neibling W H, Thompson A L. Terrace design affects inter-terrace sheet and rill erosion [J]. *American Society of Agricultural Engineers*, 1992, 35(5): 1473-1481.
- [3] 石生新. 整地造林措施对强化降雨入渗和减沙的影响 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(4): 54-59.
Shi S X. Impact of measures of afforestation with engineering preparation to strengthening rainfall infiltration and reducing sediment [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(4): 54-59. (in Chinese)
- [4] 王 萍, 王克勤, 李太兴, 等. 反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1261-1267.
Wang P, Wang K Q, Li T X, et al. Regulation effects of reverse-slope level terrace on the runoff and sediment yield in sloping farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1261-1267. (in Chinese)
- [5] 梁改革, 高建恩, 韩 浩, 等. 基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 24-32.
Liang G G, Gao J E, Han H, et al. Optimization of structure of slope-separated terrace based on crop water requirement and control of rainfall runoff [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 24-32. (in Chinese)
- [6] 张展羽, 张 卫, 杨 洁, 等. 不同尺度下梯田果园地表径流养分流失特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 105-109.
Zhang Z Y, Zhang W, Yang J, et al. Characteristics of nutrient loss from surface runoff of terraced orchards under different scales [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 105-109. (in Chinese)
- [7] 韩玉国, 李叙勇, 段淑怀, 等. 水土保持措施对径流泥沙及养分流失的影响 [J]. *中国水土保持*, 2010(12): 34-36.
Han Y G, Li X Y, Duan S H, et al. Infiltration performance of different land use in loess hilly region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(12): 34-36. (in Chinese)
- [8] Easton Z M, Fuka D R, Walter M T, et al. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 348: 279-291.
- [9] Jeong J, Santhi C, Arnold J G, et al. Development of algorithms for modeling onsite wastewater systems within SWAT [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 54(5): 1693-1704.
- [10] Deletic A. Modelling of water and sediment transport over grassed areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1/2/3/4): 168-182.
- [11] Arabi M, Frankenberger J R, Engel B A, et al. Representation of agricultural conservation practices with SWAT [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 22(16): 3042-3055.
- [12] Waidler D, White M, Steglich E, et al. Conservation practice modeling guide for SWAT and APEX [R]. Texas: Texas Water Resources Institute Technical Report, 2011.
- [13] Shao H, Baffaut C, Gao J E, et al. Development and application of algorithms for simulating terraces within SWAT [J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(5): 1715-1730.
- [14] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009 [R]. Texas: Texas A&M University System, 2011.
- [15] Arnold J G, Williams J R. SWRRB-A watershed scale model for soil and water resources management [M]. Colorado: Water Resources Publications, 1995.
- [16] Du B, Arnold J G, Saleh A, et al. Development and application of SWAT to landscapes with tiles and potholes [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(3): 1121-1133.
- [17] Panuska J C. Estimating phosphorus concentrations following alum treatment using apparent settling velocity [J]. *Journal of Lake and Reservoir Management*, 1999, 15(1): 28-38.
- [18] Williams J R. The EPIC model [M]. Colorado: Water Resources Publications, 1995.
- [19] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, 1978.
- [20] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1569-1577.
- [21] Saxton K E, Willey P H, Rawls W J. Field and pond hydrologic analyses with the SPAW model [C]//Proceedings of the Annual International Meeting of American Society of Agricultural and Biological Engineers. Portland, Oregon; [s. n.], 2006: 1-13.
- [22] Harmel R D, Smith P K, Migliaccio K W. Modifying goodness-of-fit indicators to incorporate both measurement and model uncertainty in model calibration and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 51(1): 55-63.
- [23] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [24] Maski D, Mankin K R, Janssen K A, et al. Modeling runoff and sediment yields from combined in-field crop practices using the Soil and Water Assessment Tool [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(4): 193-203.
- [25] 高晓玲, 蒋定生. 隔坡梯田优化设计试验研究 [J]. *水土保持研究*, 1994, 1(1): 89-98.
Gao X L, Jiang D S. Experimental study on interval slope terrace [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, 1(1): 89-98. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分级分类标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190—2007 Standards for classification and gradation of soil erosion [S]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese)