

柑橘果园扩张对寻乌水径流和输沙的影响

徐丹巧¹ 刘贵花¹ 全兴庆² 齐磊³ 李志强¹ 齐述华¹¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院/

鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

2. 赣州市水文局, 江西 赣州 341000;

3. 江西遥览科技有限公司, 江西 南昌 330022)

【摘要】: 土地利用变化的水文效应是当前人类活动环境影响的研究热点。柑橘果园扩张是近 20 年来寻乌水流域最主要的土地利用变化。利用寻乌水流域 3 个时期的土地利用数据, 设定不同土地利用情景, 以 SWAT 模型模拟不同土地利用情景下的径流与输沙, 并结合 2000 年以来柑橘果园扩张的遥感制图成果和寻乌水径流和泥沙观测资料, 分析柑橘果园扩张对流域径流和输沙的影响。研究表明: SWAT 模型模拟径流的效果较好 ($R_e=-0.05$; $R^2=0.79$; $Ens=0.72$), 输沙模拟效果也在合理范围 ($R_e=0.75$; $R^2=0.8$; $Ens=0.71$); 1990~2015 年间, 寻乌水流域林地面积减少 36.83%, 果园面积增加 42.48%, 径流与输沙变化率分别为 2.57% 和 4.27%; 新垦果园面积与河道输沙量的关系不显著, 这是因为河道输沙不仅与土壤侵蚀有关, 同时也与土壤侵蚀地块与河道之间的区位关系有关, 同时, 在反坡水平阶等水保措施的作用下, 果园水土流失得到有效控制。

【关键词】: 寻乌水流域 径流模拟 输沙模拟 SWAT 模型 柑橘果园种植

【中图分类号】: P333.3 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)01-0172-08

土地利用变化的水文效应是当前人类活动环境影响的研究热点。河道径流和输沙是河流最主要的水文特征参数, 径流和输沙显著受地形、气候、土壤等多种自然因素和人类活动的影响^[1,2]。近年来, 国内学者对流域径流输沙变化研究有增无减, 利用水文模型模拟人类活动、气候、植被覆盖度等因素变化及其对水文过程的影响^[3,4]。SWAT 分布式水文模型在 20 世纪 90 年代快速发展, 因其水循环物理基础较好, 拥有强大且高效的模型结构和计算能力, 得以较广泛使用^[5,6]。众多研究表明, 该模型在大、中尺度流域模拟中得到广泛应用取得良好的效果, 而在小尺度流域模拟中应用较少^[7]。

寻乌水流域地跨江西与广东两省, 在江西省境内多处于山地丘陵区, 河床陡峭窄浅, 是珠江流域中东江的主要源头, 为香港、深圳和惠州等地区提供日常的生活用水, 因此维护寻乌水流域水资源安全至关重要。此外, 稀土矿开采是寻乌县重要产业, 采矿加重了寻乌水流域的水土流失。本文以寻乌水流域为研究区, 以水背水文站控制的流域范围为模拟范围, 结合 SWAT 模型和土地利用

作者简介: 徐丹巧(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源与水土保持。E-mail: xiaoxuinsist@163.com

齐述华 E-mail: qishuhua11@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41867012; 41961004); 江西省教育厅科学基金项目(GJJ160321)

制图成果,模拟分析 2008~2015 年该流域的径流输沙变化,研究不同土地利用情景下的径流与输沙变化,评价柑橘果园扩张对寻乌径流和输沙的影响,为流域水资源管理提供科学建议。

1 研究区概况

寻乌水又称寻邬水,位于江西省东南角,起源于江西省寻乌县大竹岭桎髻钵山,此流域由北向南全长 138km,在江西境内河道长 115.4km,流域面积 1841km²^[18],地处亚热带季风湿润性气候区,多年平均降水量约 1600mm,年均径流量约 15.1×10⁸m³^[9]。柑橘果园种植是寻乌县主要经济产物,大量土地被开垦为柑橘果园,显著改变了土地利用结构,耕地和林地面积显著减少,据统计,耕地与林地由 1990 年的 13.61%和 81.98%减少至 2015 年的 7.34%和 45.13%,分别降低了 6.27%和 36.83%;而柑橘果园和建设用地由 1990 年的 1.15%和 0.15%分别增长到 2015 年的 42.48%和 2.06%,各增长了 41.33%、1.91%。未利用土地与水域虽有波动变化,但总体维持在 2.5%和 0.55%左右。

本文以水背水文站的控制范围为研究区域,水背水文站位于寻乌县南桥镇水背村,是寻乌水流域的主要控制站,控制流域面积 974km²,河长 86km,流域介于北纬 24°45′~25°12′,东经 115°32′~115°52′,如图 1 所示。研究区范围总体地势东西两边高,中间低,北高南低。主要土地利用类型为林地(45.05%)、园地(42.40%)和耕地(7.33%),主要土壤类型有红壤、黄红壤、黄壤、暗黄棕壤、山地草甸土和潜育水稻土,其中红壤分布最广泛。

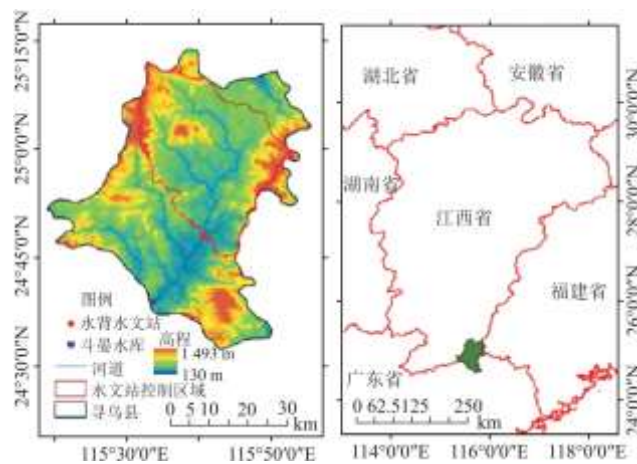


图 1 研究区位置图

2 数据与方法

2.1 数据收集与预处理

本研究基础数据主要包括:DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、气象数据和水文数据等。空间数据均采用 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系,Transverse Mercator 投影类型,中央经线为 117 度,横轴偏移量为 500000m,纵轴偏移量为 0m。

(1) DEM

源自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)下载的 ASTER GDEM V2,空间分辨率 30m;

(2) 土地利用数据

寻乌水流域的土地利用数据来自于江西省土地利用数据库, 空间分辨率 30m;

(3) 柑橘果园分布数据

以每年 4 个季节的 Landsat 影像, 利用随机森林算法提取的柑橘果园种植范围^[10] (图 2, 表 1)。

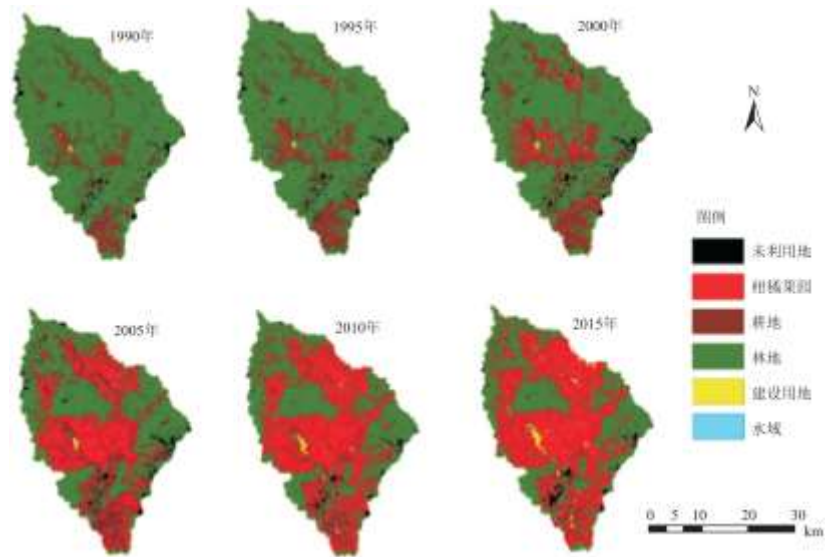


图 2 不同时期土地利用图

表 1 不同时期各主要土地类型面积统计 (km²)

土地类型	1990	1995	2000	2005	2010	2015
未利用地	23.20	29.76	30.22	27.95	18.22	23.43
柑橘果园	11.16	22.81	79.04	273.71	359.35	413.81
耕地	132.57	143.35	146.50	136.39	106.27	71.53
林地	798.37	769.94	709.29	526.98	475.69	439.65
建设用地	1.46	2.56	2.71	4.29	9.28	20.09
水域	7.38	5.73	6.38	4.82	5.34	5.62

(4) 土壤数据。

寻乌水流域的土壤类型数据是采用 1:50 万土壤数据, 该流域主要分布的土壤有 6 类, 如图 3 所示。流域土壤属性数据由于 1:50 万土壤图采用国际制土壤质地分类, 与 ArcSWAT 采用的 USDA 简化的美国制土壤质地不同, 所以本文运用三次样条插值法将国际制土壤质地标准转换为适用于 ArcSWAT 模型支持的土壤质地标准^[11,12], 并建立土壤属性数据库。

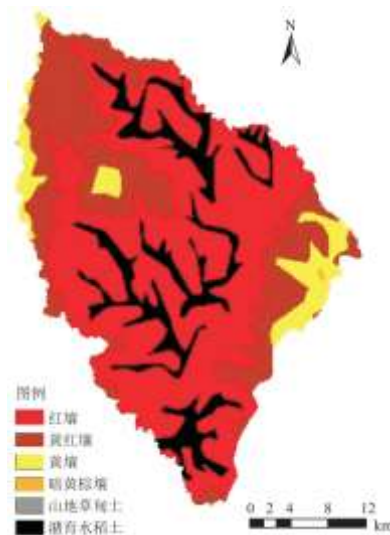


图 3 土壤类型图

(5) 气象数据。

包括 2008~2015 年温度、降水量、相对湿度、风速与日照时数等数据。本文收集了寻乌水流域的日降水数据和日最高温度、日最低温度数据,其他数据通过利用寻乌水流域周边 6 个气象站点作为气象数据库基础,借助 SwatWeather 模块将天气发生器的空缺的数据补齐,建立该流域完整的气象数据库。

(6) 水文数据。

收集研究区域水背水文控制站 2008~2015 年日径流和输沙观测数据。

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型是基于物理机制直接模拟流域径流、输沙等物理过程分布式水文模型,具有输入变量较容易获取、计算效率较高且能对流域进行长期模拟等优点。但 SWAT 模型由美国农业部(USDA)研究中心开发,且模型数据库是适应北美地区的,所以将模型推广到国内流域中使用,需要建立相应的空间数据和属性数据,优化 SWAT 模型,提高其在中国流域模拟中的适用度和精确度。主要步骤如下:

(1)子流域和水文响应单元划分。以 ArcSWAT 中的 Automatic Watershed Delineation 模块,导入研究区 DEM 数据,通过 Stream network 和 Create stream and outlets 提取该流域河网并设置流域出水口。模型提取河网时,加载 Google Earth 平台提取的流域水系以提高精确度,设定合适阈值划分子流域。

(2)敏感参数分析。以 ArcSWAT2009 自带的 Sensitivity Analysis 工具为主要参数评价标准,并借助 SWAT-CUP 作为辅助工具。将设定好的数据导入,工具自动将模拟值与观测值进行多次率定,并计算模拟结果的精度以此评价各参数的重要性和最佳取值区间。SWAT-CUP 参数率定评价方式与 SWAT 模型体系一致,因此其评价结果具一定参考意义。按照先径流后输沙的校准顺序调试运行^[13],以 ArcSWAT 模型给定的参数范围为基准,结合 SWAT-CUP 的参数校准工具和 sensitivity analysis 工具确定各参数敏感性。

2.3 精度评价

为评价 SWAT 模型模拟效果, 选用相对误差 (R_e)、决定系数 (R^2) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Ens) 作为评价指标。其中 R_e 评价模拟值与实际值的偏差, R_e 值越趋于 0 说明模拟结果越好; R^2 描述模拟值与观测值的序列变化趋势的一致性, R^2 值越趋于 1, 说明模拟精度越高; Ens 表示模拟值与实际值的接近程度, Ens 越接近于 1, 模拟值与观测值越吻合, 一般来说, $Ens > 0.5$ 时, 模拟结果基本令人满意, $Ens > 0.65$ 时, 模拟结果较好^[14, 15]。在径流和输沙校准时, 要求相对误差 R_e 绝对值小于 0.55, $R^2 > 0.6$, 且 $Ens > 0.5$ 。三者计算公式如下:

$$R_e = \frac{P_i - Q_o}{Q_o} \quad (1)$$

式中: P_i 为模拟值; Q_o 为实测值。 $R_e > 0$ 则表示模拟值大于观测值, $R_e < 0$ 则表示模拟值小于观测值, 若 $R_e = 0$, 则模拟值等于观测值。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_i - Q_a)(P_i - P_a)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_a)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_a)^2} \quad (2)$$

式中: Q_i 为实测值; P_i 为模拟值; Q_a 为实测平均值; P_a 为模拟平均值; n 为实测值的个数。 R^2 可评价模拟值与观测值的拟合程度, R^2 越接近于 1, 模拟的结果越好, 拟合程度越高, R^2 越接近于 0, 说明模拟结果精度低, 拟合程度差。

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_a)^2} \quad (3)$$

式中: P_i 为模拟值; Q_o 为实测值; Q_a 为实测平均值; n 为模拟时间段内实测数据个数。 Ens 越接近于 1, 模拟值与观测值越吻合, 当 $Ens = 1$ 时, 则表示模拟值与观测值完全吻合。

3 结果与讨论

3.1 子流域和 HRU 划分

对 DEM 数据填洼处理, 导入水背水文站坐标, 并将其设为流域出水口, 通过适度指数法确定阈值, 提取水背卡口水文站控制流域集水面积为 974 km², 将寻乌水流域划分为 59 个子流域, 进一步划分了 372 个水文响应单元 (图 4)。

3.2 流域敏感性参数确定

根据寻乌水流域水背水文站 2008~2015 年日径流、输沙数据, 建立寻乌水 SWAT 模型。分别设定预热期 (2008 年)、率定期 (2009~2012 年) 和验证期 (2013~2015 年)。其中预热期用于确定模型初始变量; 率定期用来率定模型的敏感参数; 验证期是对率

定期确定的敏感参数和模拟结果的评价^[16]。经过模型多次运行,并借助 SWAT-CUP 软件和 Sensitivity Analysis 工具进行参数校正,确定寻乌水流域径流和输沙敏感参数及其最佳值(表 2)。



图 4 寻乌水流域子流域划分

表 2 SWAT 模型中的敏感性参数取值

序号	参数	参数名	最小值	最大值	最佳值
1	CN2. mgt	SCS 径流曲线系数	35	98	95. 53
2	GWQMN. gw	浅层地下水径流系数	0	5000	4908
3	RCHRG_DP. gw	深蓄水层渗透系数	0	1	0. 65
4	ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	0	1	0. 48
5	REVAPMN. gw	浅层含水层“再蒸发”	0	500	9. 57
6	GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	0. 02	0. 2	0. 02
7	CH_K2. ret	河道有效水力传导度	0	150	146
8	ALPHA_BF. gw	基础 alpha 因子	0	1	0. 05
9	SPEXP. bsn	输沙重新携带的幂指数	1	2	1. 5
10	SPCON. bsn	输沙重新携带的线性指数	0. 0001	0. 01	0. 0001
11	USLE_P. mgt	土壤侵蚀防治因子	0	1	0. 01

3.3 径流和输沙模拟

依据确定的模型敏感性参数值,校准 SWAT 模型。通过计算模型模拟效果评价指标,评价模拟值与实测值拟合程度(表 3)。其中率定期相关系数可达 0.91,观测值与模拟值高度重合;在验证期阶段,由于 2015 年观测值波动较大,导致模拟峰值偏高而谷值偏低。但从整个时期段来看,径流模拟的相关系数高达 0.84,模拟结果较好。

表 3 2008~2015 年寻乌水径流和输沙模拟精度评价

项目	时间	R_e	R^2	Ens
径流	率定期(2008~2012)	0.03	0.91	0.89
	验证期(2013~2015)	-0.05	0.79	0.72
输沙	率定期(2008~2012)	0.75	0.80	0.71
	验证期(2013~2015)	0.32	0.71	0.68

输沙模拟结果表明,全时段输沙模拟变化趋势与观测值基本一致,相关系数可以达到 0.75,但计算发现全时段输沙观测值比模拟值变幅略大,峰值高于模拟值而谷值低于模拟值。这是因为在柑橘刚种下去的时候,地表植被受到严重的破坏,一定时间内地表水土保持能力差。由于柑橘果园在寻乌水流域所占比例较大,精准的数据库建立对寻乌水水文模拟起着重要作用,但柑橘果园数据库的建立需采集大量实地调查数据,由于资料的欠缺,本文采用肖军仓建立的果园数据库,该数据库虽在江西省内有一定的适用性,但对寻乌水流域柑橘果园的针对性尚有欠缺,故产生输沙模拟精度略偏低的情况。即便如此,本文在研究时间段输沙模拟的相关系数依然高于 0.75,纳什系数高于 0.7,可认为模拟精度符合研究要求。

3.4 柑橘果园扩张对径流输沙影响

将 1990、2000、2015 年三期土地利用数据带入校准后的寻乌水流域 SWAT 模型,结合流域内主要气象站点,模拟了寻乌水流域在 1990~2015 年间月径流和输沙情况(图 9、图 10),结果表明:3 个时期土地利用情境下模拟的流量和输沙量趋势基本一致。定量分析不同土地利用情景下的径流和输沙变化表明(表 4):寻乌水在 1990、2000、2015 年土地利用情景下的流量和输沙量均有所变化。1990~2000 年间流量和输沙量较 2000~2015 年间的流量和输沙量变化略明显,1990~2000 年变化率分别为 3.00%和 5.28%,2000~2015 年变化率为-0.41%和-0.95%。从总体上看,寻乌水流域在近 25 年来流量和输沙量略有上升。

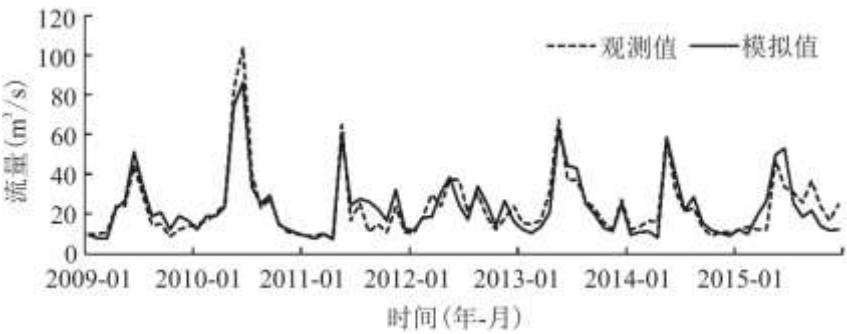


图 5 寻乌水径流模拟值与观测值对比

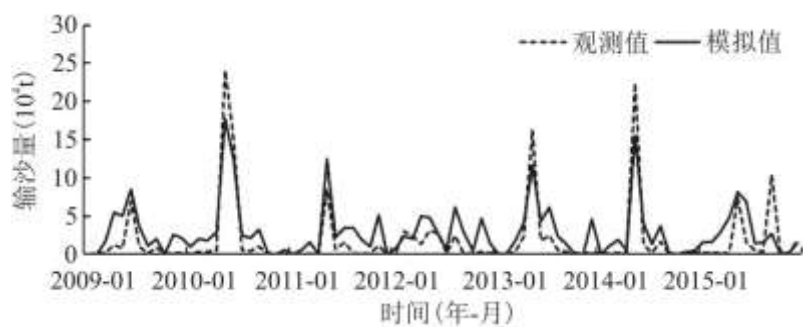


图 6 寻乌水流域输沙模拟值与观测值对比

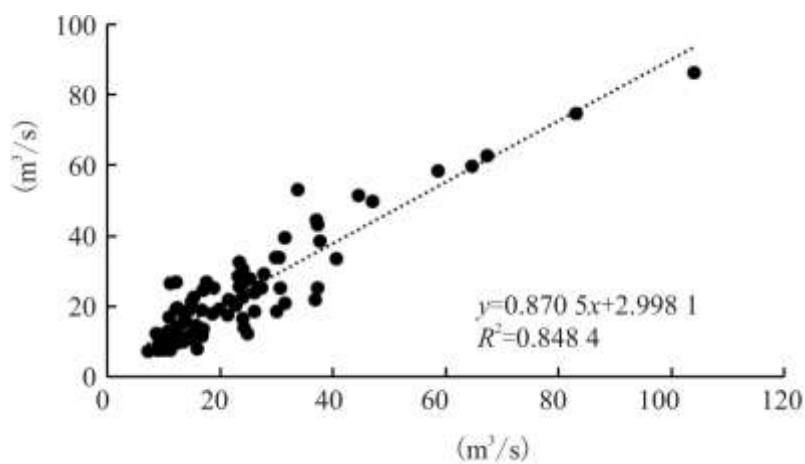


图 7 寻乌水径流模拟值与观测值比较

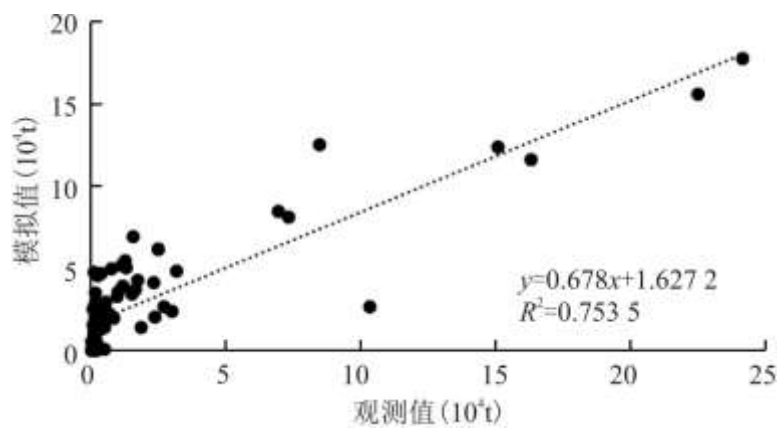


图 8 寻乌水输沙量模拟值与观测值比较

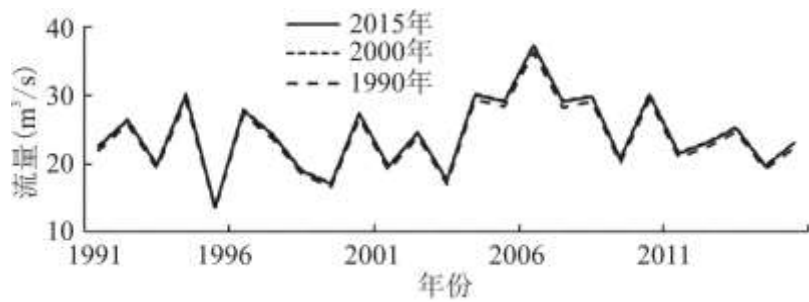


图 9 不同土地利用情景下寻乌水河道径流模拟比较

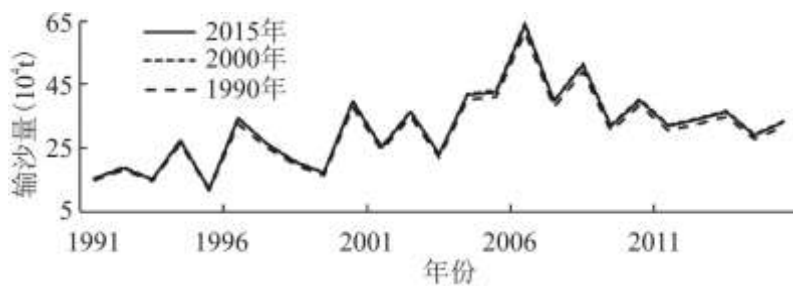


图 10 不同土地利用情景下寻乌水河道输沙模拟比较

表 4 不同土地利用情景下寻乌水河道径流和输沙统计

水文要素	1990 年	2000 年	2015 年	1990~2000 年 变化率 (%)	2000~2015 年 变化率 (%)	1990~2015 年 变化率 (%)
流量 (m³/s)	23.68	24.39	24.29	3.00	-0.41	2.57
输沙量 (t)	302064.06	317998.70	314970.45	5.28	-0.95	4.27

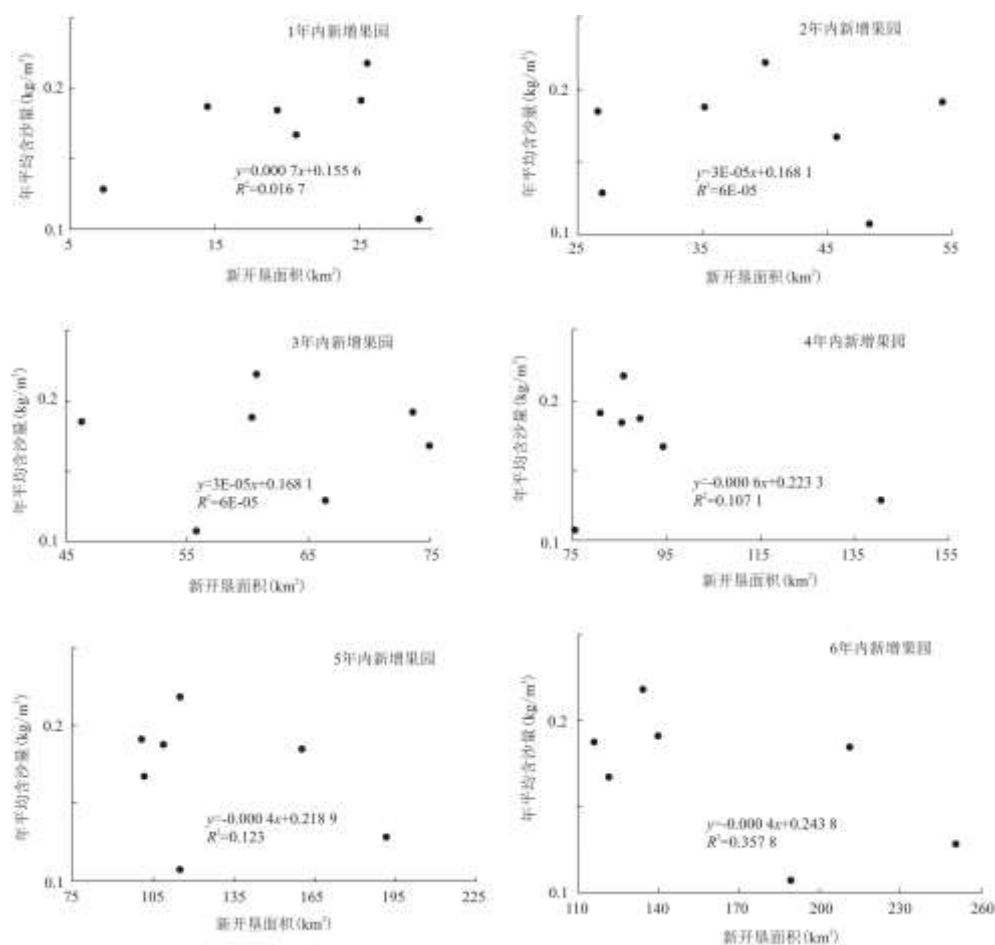


图 11 新垦果园面积与寻乌水年平均含沙量之间的散点关系图

为了进一步探讨柑橘果园扩张对河道输沙的影响,利用寻乌水流域 2002~2015 年的柑橘果园遥感提取的研究成果^[10],分析新开垦果园面积对河道输沙量的影响。由于 2012 年缺乏优质的影像,缺该年度的柑橘果园分布,2012 年新开垦柑橘果园面积以 2013 年相对于 2011 年的果园面积增量除以 2 替代。为了分析新垦果园面积与河道输沙关系,分别利用前 1,2...6 年的新增果园面积与当年河道径流平均含沙量之间的散点关系,分析果园扩张对寻乌水河道输沙量的影响(图 11)。从图 11 结果来看,新垦果园面积与河道输沙量的关系并不显著。这主要有以下几方面的原因:(1)新开垦果园大多数分布于小支流附近或者山坡上,距离主河道较远,产生的泥沙很难跨越大距离进入水文卡口站;(2)有草被覆盖的柑橘果园减沙减流效率高达 90%^[18],随着果园下垫面草被的恢复,有效的减少了水土流失;(3)寻乌县柑橘果园开发主要发生于坡度<25°、50~200m 高程带范围^[19],在坡地开发中往往采区梯地化改造,形成的反坡梯地等水土保持措施,有效遏制强烈水土流失的发生^[20]。

4 结论与展望

本文利用寻乌水流域 3 个时期的土地利用资料,以 SWAT 模型模拟柑橘果园的扩张对寻乌水小流域径流和输沙的影响,同时结合研究区 2000~2015 年逐年的柑橘果园遥感提取的成果和寻乌水卡口水文站观测的泥沙含量资料,探讨果园扩张对河道输沙的影响,研究结果表明:SWAT 模型模拟径流的效果较好($R_e=-0.05$; $R^2=0.79$; $Ens=0.72$),输沙模拟效果也在合理范围($R_e=0.75$; $R^2=0.8$; $Ens=0.71$);1990~2015 年间,寻乌水流域林地面积减少 36.83%,果园面积增加 42.48%,径流与输沙变化率分别为 2.57%和 4.27%;由于河道输沙不仅与土壤侵蚀有关,同时也与土壤侵蚀地块与河道之间的区位关系有关,同时,在反坡水平阶等水保措施的作用下,新垦果园面积与河道年平均含沙量的关系并不显著。

为了进一步定量研究流域尺度柑橘果园扩张的径流和泥沙效应,有必要通过设置柑橘果园径流小区观测,从机理上研究柑橘果园的冠层高度、叶面积指数、冠层下方草本植物生长等果园林相结构对产流和产沙的影响,用于构建详尽的 SWAT 模型参数库,提高 SWAT 模型的模拟精度,是有待进一步开展的工作。

参考文献:

- [1]ZHANG S H, L Z H, HOU X N, et al. Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation [J]. Catena, 2019, 179:129-138.
- [2]MOMMA H G, PORTERA W S, YASARER L M, et al. Crop conversion impacts on runoff and sediment loads in the Upper Sunflower River watershed [J]. Agricultural Water Management, 2019, 217:399-412.
- [3]SHI P, ZHANG Y, REN Z P, et al. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China [J]. Science of The Total Environment, 2019, 664:984-994.
- [4]杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J]. 水利学报, 2010, 41(10):1142-1149.
- [5]OLIVEIRA V A, DE MELLO C R, BESKOW B, et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome [J]. Ecological Engineering, 2019, 133:20-31.
- [6]陈启会, 张俊, 侯雨坤, 等. 近 60 年气候与土地利用变化对金沙江径流的影响[J]. 人民长江, 2018, 49(23):47-53.
- [7]张东海. 基于 SWAT 模型水文过程的尺度效应分析——以汉江上游为例[D]. 西安:陕西师范大学硕士论文, 2013.
- [8]唐林森, 白丽. 东江源寻乌水河流健康指标评价[J]. 人民珠江, 2017, 38(11):40-44.
- [9]江西省水利规划设计研究院. 寻乌水流域综合规划[R], 2012.
- [10]XUHAN Z Y, QI S, GONG P, et al. Long-term monitoring of citrus orchard dynamics using time-series Landsat data: A case study in Xunwu County, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(22):8271-8292.
- [11]徐冬梅, 胡昊, 王文川, 等. SWAT 模型土壤物理属性数据库本土化构建研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1):36-41.
- [12]蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003(4):511-517.
- [13]NEITSCH S L, ARONLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and wate assessment tool user' s manual (Version2000) [M]. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA, 2002.
- [14]MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [15]潘登, 任理. 分布式水文模型在徒骇马颊河流域灌溉管理中的应用 I. 参数率定和模拟验证[J]. 中国农业科学, 2012,

45(3):471-479.

[16]肖军仓,周文斌,罗定贵,等.非点源污染模型:SWAT 用户应用指南[M].北京:地质出版社,2010.

[17]徐晗泽宇,刘冲,王军邦,等.Google Earth Engine 平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J].地球信息科学学报,2018,20(3):396-404.

[18]杨洁,莫明浩,宋月君,等.红壤坡地水土保持植物措施下柑橘林地水文生态效应[J].长江流域资源与环境,2012,21(8):994-999.

[19]张起明,徐晗泽宇,江丰,等.赣南地区柑橘果园空间分布特征分析[J].江西科学,2018,36(4):591-598.

[20]邢鹏远,王克勤,杨绍兵,等.反坡水平阶水土保持效益观测[J].中国水土保持科学,2010,8(5):119-124.