基于 SWAT 模型的晋江西溪流域绿水管理措施效益成本分析

荣 琨，李学平，杨 茜，罗 杰，张晨曦

（滨州学院 生物与环境工程学院，山东 滨州 256600）

摘 要：[目的] 计算晋江西溪流域 4 种绿水管理措施的效益和成本，为西溪流域生态治理提供新的参考模式，为完善水资源管理机制提供借鉴。[方法] 以晋江西溪流域为研究区，运用 SWAT 模型对石陇、梯田、等高耕作、地表覆盖 4 种绿水管理措施进行了情景模拟，计算了 4 种措施在增加绿水、水土保持、水质保护、农业增收等方面的效益，并对每种措施进行了效益成本分析。[结果] ①石陇、梯田、等高耕作 3 种绿水管理措施的效益成本比分别为 19.52，13.03，6.98，都远大于 1，非常适合在西溪流域推广应用，3 种措施的平均效益成本比为 10.18。流域实施 3 种措施的年均成本为 3.97×10^6 元，年均效益为 4.05×10^7 元。②地表覆盖的效益成本比仅为 0.63，目前不适合在研究区推广应用。[结论] 石陇、梯田、等高耕作的环境与经济效益较好，有较好的应用前景；今后应进一步探索降低地表覆盖成本的技术，同时辅以适当的政府补贴，以利于该绿水管理措施在研究区的推广。

关键词：绿水管理；效益分析；成本分析；SWAT 模型；西溪流域

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2019)01-0137-05 **中图分类号**：X196，P333

文献参数：荣琨，李学平，杨茜，等. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域绿水管理措施效益成本分析[J]. 水土保持通报，2019，39(1)：137-141. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.022；Rong Kun，Li Xueping，Yang Qian，et al. Benefit-cost analysis on green water management measures in Xixi watershed of Jinjiang River based on SWAT model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：137-141.

Benefit-cost Analysis on Green Water Management Measures in Xixi Watershed of Jinjiang River Based on SWAT Model

Rong Kun，Li Xueping，Yang Qian，Luo Jie，Zhang Chenxi

(*College of Biological and Environmental Engineering*，*Binzhou University*，*Binzhou*，*Shandong* 256600，*China*)

Abstract：[Objective] To calculate the benefits and cost of four green water management measures，in order to provide a new reference pattern for ecological restoration of Xixi watershed，and provide support for improving water resources management mechanisms. [Methods] Taking Xixi watershed of the Jijiang basin as the study area，four green water management measures including stone lines，bench terraces，contour tillage and mulching were simulated by soil and water assessment tool (SWAT) model. The benefits of four measures in increasing green water，soil conservation，water quality protection and agricultural income were calculated，and the benefit and cost of each measure was analyzed. [Results] ① The benefit-cost ratio of stone lines，bench terraces and contour tillage was 19.52，13.03 and 6.98，respectively，which were far greater than 1，so those three green water management measures were suitable for popularization and application in Xixi watershed. The average benefit-cost ratio of the three measures was 10.18，and the average cost of the three measures in Xixi watershed was 3.97 million RMB per year，and the average benefit of that was

收稿日期：2018-09-04 **修回日期**：2018-09-13

资助项目：滨州学院科研基金项目“滨州市农业面源磷污染对土地利用变化的响应与防治技术研究”(BZXYG1716)；滨州学院实验技术资助项目“仿真环境工程实验平台与大数据的耦合对环境工程实验教学的改进”(BZXYSYXM201816)；国家自然科学基金项目“黄河三角洲退化湿地恢复过程中沉积物的截磷机制及定量评估研究”(41601306)，“过渡金属掺杂单 Pd-TWCs 降解汽车尾气的反应机理及活性评价研究”(21607011)。

第一作者：荣琨(1983—)，男(汉族)，山东省滨州市人，硕士，讲师，主要从事水环境方面的研究。E-mail：rongkun_007@163.com。

40.47 million RMB per year. ② The benefit-cost ratio of mulching was only 0.63, so it was not suitable for application in the study area at present. [Conclusion] The environmental and economic benefits of stone lines, bench terraces, contour tillage are good and have a good application prospect. Further exploration should be made to reduce the cost of mulching, and the financial subsidies are also need to be provided, so as to promote the application of the green water management measures in the study area.

Keywords: green water management; cost analysis; benefit analysis; SWAT model; Xixi watershed

在 1995 年联合国粮农组织召开的大会上,针对水资源和粮食安全,瑞典斯德哥尔摩国际水资源研究所的福尔肯马克提出了绿水的概念。福尔肯马克认为,陆地生态系统上的降水可以分为绿水和蓝水[1];其中蓝水是指湖泊、河流等储存的有助于经济社会发展的地表水和地下水,绿水是降雨下渗到土壤中后通过蒸发蒸腾作用返回到大气中的水,可以认为是总的蒸散发量,是看不见的用于植物生长的水。绿水虽然不可见,但是对陆地生态系统的生产和服务功能具有重要作用,约三分之二的全球降水以绿水的形式存在。可见,绿水是植物蒸腾作用的重要组分,是雨养农业水源的重要支撑,是世界粮食安全和人类福祉的重要保障。

绿水管理是国际水资源研究中心等部门开发的管理机制,该机制中流域上游农户通过采取绿水管理措施参与流域水管理,同时需要外部资金支持;由于下游用水部门需要上游提供清洁的水源,因而下游部门有义务为上游农户进行一定的资金帮扶。绿水管理可以减少水资源的无效蒸发、减少土壤侵蚀量、改善水质、增加农作物产量,引导利益相关部门通过生态补偿的途径改善环境,达到水资源管理的互利共赢。Adeniyi 等[2]将 SWAT 模型用于尼日利亚Jebba 湖流域,研究了植被缓冲带、石陇拦沙等绿水管理措施的效益和成本。结果表明,植被缓冲带、石陇等可将输入 Jebba 湖的泥沙量分别降低至原来的65.6%,12%。同时,与原来治理湖中泥沙的成本相比,植被缓冲带和石陇两种措施的成本比原来分别降低了 84.9%和 70.5%。荷兰的 Hunink 与 Droogers 等人将等高耕作、地表覆盖等绿水管理措施应用于肯尼亚的塔纳河流域[3-5],用 SWAT 模型模拟了不同绿水管理措施在增加绿水,减少土壤侵蚀等方面的不同效果,并分析了不同措施的效益和成本,实施效果比较显著。杨国胜等[6]运用 SWAT 模型模拟了绿水管理措施对堵河上游流域水土保持和水质保护等的影响,发现梯田和石陇等措施的效益成本比都大于 1,几种绿水管理措施适合在研究区进行推广应用。但是,目前有关绿水管理措施效益成本分析的研究仍较少。对绿水管理措施进行效益成本分析,可以定量评价各种措施的效益和成本,优选出最适合相应区域的绿水管理措施,降低资金投入风险,有利于实现综合效益的最大化。

晋江西溪流域是福建省内水土流失最严重的区域之一,面源氮磷污染比较突出,影响了流域水质。流域内山地丘陵较多而平原较少,农民人均收入较低,传统的劳作方式一定程度上制约了农业的发展并加剧了面源污染,如何采取措施以改善生态环境并提高作物产量成为流域急需解决的问题。但是目前有关西溪流域绿水管理措施的研究尚未见报道。因此,本文拟定量评价 4 种管理措施的效益和成本,选出适合在西溪流域推广的管理措施,以期提高资金的综合效益,同时为完善水资源管理机制提供借鉴。

1 研究区概况

晋江西溪发源于福建省戴云山脉的梯仔岭,从西北向东南流,介于东经 118°24′—118°34′,北纬 24°33′—24°54′。西溪流域主要位于福建省泉州市的安溪、永春两县境内,小部分位于泉州市的德化县、南安县及厦门市的同安区。在泉州南安的双溪口汇入晋江干流。西溪全长 105 km,流域面积为 2 451 km^2,约占晋江流域总面积的 55%,主要支流有蓝溪、龙潭溪、金谷溪、坑仔口溪、一都溪。西溪流域是福建省水土流失最严重的区域之一,年均侵蚀模数约为 835 t/km^2,局部地区如官桥、龙门等镇为崩岗群发育区,年均侵蚀模数超过 5 000 t/km^2。流域地貌以山地丘陵为主,平原较少,最高海拔为 1 500 m,属于亚热带海洋性季风气候,降雨充沛,但时空分布不均匀。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型建立与验证

SWAT 模型可以对各种绿水管理措施进行模拟[2-6]。该模型是由美国农业部开发的分布式面源污染模型,可以模拟较长时期土地管理措施对水资源、土壤侵蚀、河流水质等的影响。部分学者运用 SWAT 模型模拟了绿水管理措施对水土流失及河流水质的影响[3-6],基于 SWAT 模型研究绿水管理措施的可行性得到了证明。

搜集 SWAT 模型所需的西溪流域 DEM、降雨、气象、土地利用、农业管理措施等数据资料,运行 SWAT 模型,并利用实测径流、实测输沙、实测氮磷等数据对模拟值进行校准。结果表明,1973—1979 年,西溪流域径流月模拟的效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,Ens)为 0.91,R^2 为 0.92,产沙月模拟的 Ens 为 0.63,R^2 为 0.65,氨氮年模拟的 Ens 为 0.69,R^2 为 0.95,矿物林的年模拟 Ens 为 0.79,R^2 为 0.85,可见模拟效果较好,模拟结果符合相关模拟要求,表明建立的西溪流域 SWAT 模型可以进一步用于研究绿水管理措施。模拟所需的 DEM[7]、土壤[7]、土地利用[8]、降雨[9]、气象[10]、实测径流[9]、输沙[9]、氮磷[9]资料分别来源于相应引文,模拟详细过程详见荣琨等[11]研究结果。

2.2　绿水管理措施的设置

根据西溪流域的实际情况,选取等高耕作、地表覆盖、石陇和梯田作为流域具体的绿水管理措施选项,其中等高耕作是沿着等高线进行耕作,并将田间土埂或植被缓冲带作为分隔,可以使径流更加缓慢,并减少土壤侵蚀;地表覆盖是将秸秆、杂草或地膜等覆盖在农田表面,可以减少暴雨对地表的冲刷,降低土壤的无效蒸发,保持土壤的湿度;石陇是把石块沿着等高线走向堆积为一条线,石陇的走向与坡面是垂直的,可以减弱降雨径流,阻滞土壤流失;梯田是沿着等高线修建堤坝,形成可以耕种的阶梯状农田,可以降低坡长,减弱降雨径流,降低水土流失。

在前期研究的基础上,以 1973—1979 年作为模拟分析时期。借鉴肯尼亚塔纳河流域[3-5]、中国堵河上游流域[6]在 SWAT 模型中各种绿水管理措施的参数设置值;同时结合研究区的实际情况,制定了西溪流域 4 种绿水管理情景的模拟参数值,实现 4 种情景的 SWAT 模型表达见表 1。

表 1　晋江西溪流域 SWAT 模型中各种绿水管理情景的参数设置

序号	情 景	土地利用	USLE_P (水田)	USLE_P (旱地)	CN2	SLOPE	OV_N	FilterW
0	现 状	耕 地	0.170	0.210	73～84	35%	0.15	0
1	石 陇	耕 地	0.170	0.210	71～82	35%	0.15	0.5
2	梯 田	耕 地	0.136	0.168	71～82	28%	0.15	0
3	等高耕作	耕 地	0.153	0.189	66～77	35%	0.42	0
4	地表覆盖	耕 地	0.153	0.189	71～82	35%	0.15	0

注:表 1 中模型参数 USLE_*P* 是水土保持因子,降低此参数值则造成土壤蒸发减小;CN2 是径流曲线系数,降低此参数值则会减小土壤侵蚀量,增大地下水补给量;SLOP*E* 是亚流域中坡度的平均值,此参数值减小则造成土壤侵蚀量减少;OV_*N* 是地面径流的曼宁系数 *n*,增大此参数值则造成径流阻力增大、径流速度降低、土壤侵蚀减小;Filter*W* 是过滤带宽度,增加此参数值则会减少土壤侵蚀量,增大水分下渗量,减少地面径流。

3　绿水管理措施效果分析

3.1　绿水增加与水土保持效益

经计算 4 种绿水管理措施的年均绿水增加效益与水土保持效益见表 2。4 种措施都导致流域绿水量增加,绿水增量最多的为等高耕作,增加了 8.74×10^5 m^3,绿水增量最少的为地表覆盖,增加了 4.32×10^5 m^3,绿水增量的平均值为 5.96×10^5 m^3。单方水价值计算时,借鉴前人相关成果[6],同时结合西溪流域实际,将单方水价值定为 1.26 元/m^3,进而得出相应的绿水增加效益。

4 种措施的绿水增加效益从大到小为:等高耕作>梯田>石陇>地表覆盖,4 种措施的平均绿水增加效益为 7.52×10^5 元。

表 2　晋江西溪流域不同绿水管理措施的年均绿水增加效益和水土保持效益

绿水管理措施	绿水增加量/10^5 m^3	单方水价值(元/m^3)	绿水增加效益/10^5 元	土壤保持量/10^5 t	单位水土保持价值(元/t)	水土保持效益/10^6 元
石 陇	4.85	1.26	6.11	7.84	12.8	10.03
梯 田	5.96	1.26	7.50	10.28	12.8	13.16
等高耕作	8.74	1.26	11.01	6.51	12.8	8.34
地表覆盖	4.32	1.26	5.44	3.31	12.8	4.24
平均值	5.96	1.26	7.52	6.99	12.8	8.94

实施 4 种绿水管理措施后,西溪流域出口断面的输沙量平均每年可减少 6.99×10^5 t(见表 2),其中梯田的土壤保持量最大,为 1.03×10^6 t,地表覆盖的土壤保持量最小,为 3.31×10^5 t。计算单位水土保持价值时,借鉴相关研究成果[6];同时结合西溪流域实际,将单位水土保持价值定为 12.8 元/t,进而得出相

应的水土保持效益。4 种措施的水土保持效益从大到小为:梯田>石陇>等高耕作>地表覆盖,从最大的 1.32×10^7 元至最小的 4.24×10^6 元不等,4 种措施的平均水土保持效益为 8.94×10^6 元。

3.2 水质保护与农业增收效益

实施绿水管理措施后,输沙量减少的同时,总氮和总磷流失量也减少了,其年均水质保护效益和农业增收效益见表 3。4 种绿水管理措施实施后,西溪流域的总氮流失量平均每年可减少 431.3 t,总磷流失量平均每年可减少 95.9 t。计算单位水质保护效益时,参考前人相关成果[6];同时结合西溪流域实际,将单位 TN,TP 水质保护效益分别定为 48 824 元/t,52 688 元/t,进而得出相应的水质保护效益。4 种措施的水质保护效益从大到小为:等高耕作>梯田>石陇>地表覆盖,从最大的 4.15×10^7 元至最小的 1.82×10^7 元不等,4 种措施的平均水质保护效益为 2.61×10^7 元。

表 3 西溪流域不同绿水管理措施的年均水质保护效益和农业增收效益

绿水管理措施	TN 流失减少量/t	TP 流失减少量/t	水质保护效益/10^7 元	农田蒸腾量的增加值/10^5 m^3	1 m^3 水的农作物价值/元	农业增收效益/10^5 元
石 陇	352.0	78.4	2.13	4.85	0.625	3.03
梯 田	386.4	86.3	2.34	5.96	0.625	3.72
等高耕作	685.6	152.0	4.15	8.74	0.625	5.46
地表覆盖	301.2	66.9	1.82	4.32	0.625	2.70
平均值	431.3	95.9	2.61	5.96	0.625	3.73

注:水质保护效益=48 824 元/t×TN 流失减少量/t+52 688 元/t×TP 流失减少量/t

绿水管理措施促进农业收入增加,主要是通过作物蒸腾量增加导致的作物增产体现出来的[12-13]。模拟结果表明,实施 4 种绿水管理措施后,西溪流域的农田蒸腾量平均每年可增加 5.46×10^5 m^3(见表 3)。前人相关研究表明,每增加 1 m^3 的植被蒸腾量,可产生 0.625 元的农作物价值[14]。4 种绿水管理措施的农业增收效益从大到小为等高耕作>梯田>石陇>地表覆盖,年平均效益为 3.73×10^5 元。

3.3 绿水管理措施的效益成本分析

为了评估西溪流域实施绿水管理措施的经济可行性,计算了其年平均效益和成本(如表 4 所示)。计算中,由于一次性建设石陇与梯田工程后,能够多年受益,同时借鉴相关成果[6],将石陇和梯田产生效益的期限按 10 a 计算,其总成本也均摊到每一年。由于等高耕作仅是在原先耕作方法的基础上略微变化一下耕作方法,其花费的成本和原有成本变化不大,同时借鉴相关成果[6],将额外新增成本定为 150 元/hm^2。参考相关资料[6,15];同时结合西溪流域实际,将地表覆盖的单位成本定为 750 元/hm^2。

表 4 西溪流域绿水管理措施的年平均效益成本对比

绿水管理措施	单位成本/(元/hm^2)	数量/10^4 hm^2	总成本/10^6 元	总效益/10^7 元	效益成本比
石 陇	857	1.93(7.78%)	1.65	3.23	19.52
梯 田	1 500	1.93(7.78%)	2.89	3.77	13.03
等高耕作	150	4.92	7.38	5.15	6.98
地表覆盖	750	4.92	36.89	2.33	0.63
前 3 种平均值	835.67	2.93	3.97	4.05	10.18
4 种平均值	814.25	3.43	12.20	3.62	2.96

由表 4 可知,石陇、梯田、等高耕作 3 种措施的效益成本比都大于 1,其中石陇、梯田的效益成本比居前两位,分别为 19.52,13.03,主要原因是这两种绿水管理措施有巨大的水质保护和水土保持效益,同时其总成本也较少,等高耕作的效益成本比为 6.98。石陇、梯田、等高耕作这 3 种绿水管理措施都适合在西溪流域进行推广,这 3 种措施的年均单位成本为 835.67 元/hm^2,每种措施的年均成本为 3.97×10^6 元,年均效益为 4.05×10^7 元,平均效益成本比为 10.18。而地表覆盖的总效益是 4 种措施中最小的,为 2.33×10^7 元,同时其总成本却是 4 种措施中最大的,为3.69×10^7 元,因此其效益成本比仅为 0.63,在没有政府补贴的情况下不适合在研究区推广。今后,应进一步探索降低研究区地表覆盖成本的技术方法,同时辅以适当的政府补贴,以利于地表覆盖措施的推广使用。

4 结论与讨论

(1) 本文运用 SWAT 模型研究了石陇、梯田、等高耕作、地表覆盖等 4 种绿水管理措施在增加绿水、水土保持、水质保护、农业增收等方面的效益,表明西溪流域绿水管理措施的实施效果可以通过模型进行量化评估,为研究区生态治理提供了一种新的参考模式。

(2) 石陇、梯田、等高耕作 3 种绿水管理措施的效益成本比均大于 1,都适合在西溪流域推广使用,效益成本比从大到小的顺序为石陇(19.52)>梯田(13.03)>等高耕作(6.98),3 种措施的平均效益成本

比为 10.18，年均成本为 3.97×10^6 元，年均效益为 4.05×10^7 元。

(3) 由于总成本显著高于其他 3 种措施等原因，地表覆盖的效益成本比仅为 0.63，暂不适合在研究区推广应用，今后应进一步探索降低其成本的技术，同时辅以适当的政府补贴，以利于该绿水管理措施在研究区的推广。

(4) 绿水管理措施仅仅是生态治理机制的一部分内容，由于资料有限等原因，本研究没有考虑水环境治理成本等因素。今后在充实资料的基础上，可进一步将调整种植结构、治理水污染等因素纳入效益成本分析的范围，更深入的开展生态治理机制研究。

(5) 本研究结果也存在一定的不确定性。绿水管理措施参数在不同研究区的敏感性差异，在不同时间和空间尺度上有效性的差异，在不同下垫面的空间异质性都会导致研究结果存在一定的不确定性；同时，由于不同的 SWAT 模型参数组合都能使模拟的 Ens 达到几乎同样的水平，参数的“异参同效”现象比较普遍，这也会使研究结果存在一定的不确定性。本文在借鉴塔纳河、堵河上游流域参数值设置 4 种绿水管理措施参数的过程中，参数设置可能具有不确定性，进而导致研究结果也存在一定的不确定性。今后，应进一步深入研究参数之间的相关性，探索高效的参数分析方法并进行参数本地化，同时采用人工校准和自动校准相结合、多站点校准、多重指标评价模拟效果等方法，从而降低 SWAT 模型参数的不确定性，提高模型预测能力。

[参 考 文 献]

[1] Falkenmark, M. Coping with Water Scarcity under Rapid Population Growth[C]// Conference of SADC Minister, Pretoria, 1995:23-24.

[2] Adeogun G, Sule B F, Salami A W. Cost effectiveness of sediment management strategies for mitigation of sedimentation at Jebba Hydropower reservoir, Nigeria[J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2018,30(2):141-149.

[3] Hunink J E, Immerzeel W W, Droogers P. Green Water Credits for the Upper Tana Basin, Kenya(Phase Ⅱ): Pilot Operations:Biophysical assessment using SWAT[R]. Isric, 2009.

[4] Kauffmana S, Droogers P, Hunink J E, et al. Green Water Credits-exploring its potential to enhance ecosystem services by reducing soil erosion in the Upper Tana basin, Kenya[J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2014,10(2):133-143.

[5] Hunink J E, Droogers P, Kauffmana S, et al. Quantitative simulation tools to analyze up and downstream interactions of soil and water conservation measures: Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya[J]. Journal of Environmental Management, 2012,111:187-194.

[6] 杨国胜，黄介生，李建. 基于 SWAT 模型的绿水管理生态补偿标准研究[J]. 水利学报，2016，47(6)：809-815.

[7] 王林，张明旭，陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域径流模拟[J]. 亚热带资源与环境学报，2007，2(1)：28-33.

[8] 陈志强. 区域多尺度 LUCC 及空间数据库研究[D]. 福建福州，福建师范大学，2006.

[9] 福建省水文总站. 中华人民共和国水文年鉴 1972—1979 年第 7 卷浙闽台河流水文资料[M]. 福州：福建省水文总站，1975-1981：112-180.

[10] 福建省气象局. 福建省晋江气候资料 1951—1980[M]. 福州，福建省气象局，1981：21-65.

[11] 荣琨，陈兴伟，林文娇. 晋江西溪流域非点源污染的 SWAT 模型模拟[J]. 亚热带资源与环境学报，2008，3(4)：37-43.

[12] 王晓娟，黄高宝，李卿沛，等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. 干旱区资源与环境，2010，24(5)：172-177.

[13] 秦舒浩，黄高宝. 不同耕作措施下绿洲灌区冬小麦蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. 中国生态农业学报，2008，16(3)：611-614.

[14] Brandsma J, Eertwegh G A, Droogers P, et al. Green and blue water resources for the Upper Duhe Basin: Soil and water management scenarios using the soil and water assessment tool SWAT: Feasibility study[R]. Future Water Report 126,2013.

[15] 王云凡. 机械化秸秆还田技术的应用成本分析[J]. 江苏农机化，2010，34(6)：49-50.