

湟水流域绿水管理模拟与水-沙-质协同调控效果评价

王玉宝^{1,2} 白雅文^{1,2} 刘荣^{1,2} 张文^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在黄河流域生态保护和高质量发展战略背景下,流域上游实施绿水管理对于涵养水源、保护脆弱生态,以及缓解流域缺水形势具有重要意义。选取黄河流域上游的湟水流域构建 SWAT 水文模型,模拟等高耕作、残茬覆盖、石线、梯田和 15°以上坡地退耕还林等 5 种绿水管理措施,分析水量、水沙和水质的变化;结合水-沙-质管理协同水平,探究不同措施的效果与适用性。结果表明,15°以上坡地退耕还林在增加产水量和地下水补给方面效果最优,分别为 $1.77 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $1.72 \times 10^7 \text{ m}^3$;等高耕作和石线能有效调节年内径流分配、削减汛期径流量。5 种措施均能削减产沙负荷,其中梯田和石线的效果较显著,削减率分别为 13.5% 和 13.0%。5 种措施均能减少总氮(TN)和总磷(TP)负荷量,且干旱年削减率高于湿润年;梯田和等高耕作削减效果较好,削减率分别为 24.6%、14.7% (TN) 和 45.3%、21.9% (TP)。通过水-沙-质管理协同分析,除残茬覆盖为高等耦合外,其他 4 种情景下均能达到优等耦合;耦合协调度由大到小依次为梯田、15°以上坡地退耕还林、石线、等高耕作、残茬覆盖。研究结果可为黄河流域绿水管理措施选取和水资源优化配置提供参考。

关键词: 绿水管理; 水-沙-质协同调控; 耦合协调度; 湟水流域; SWAT 模型

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)11-0347-12

OSID:



Simulation of Green Water Management and Effect Evaluation of Water – Sediment – Quality Coordination Regulation in Huangshui Basin

WANG Yubao^{1,2} BAI Yawen^{1,2} LIU Rong^{1,2} ZHANG Wen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the context of ecological protection and high-quality development strategy in the Yellow River Basin, green water management in the upper reaches of the basin is of great significance for conserving water sources, protecting fragile ecology and alleviating water shortage in the basin. There are many measures for green water management, and their effect needs to be further studied. An SWAT hydrological model was constructed in Huangshui Basin in the upper reaches of the Yellow River Basin. Five green water management measures, including contour tillage, residue mulching, stone line, terraced field and farmland conversion to forest on slopes above 15° were simulated, and the changes of water quantity, sediment and water quality were analyzed. Combined with the coordination level of water, sand and quality management, the effects and applicability of different measures were explored. The results showed that farmland conversion to forest on slopes above 15° had the best effect on increasing water yield and groundwater recharge, which were $1.77 \times 10^7 \text{ m}^3$ and $1.72 \times 10^7 \text{ m}^3$, respectively. Contour tillage and stone line can effectively regulate annual runoff distribution and reduce runoff in flood season. All the five measures can reduce the sediment yield load, among which terrace and stone line had the most significant effect, and the reduction rate was 13.5% and 13.0% respectively. All the five measures can reduce the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) load, and the reduction rate in dry years was higher than that in wet years. The reduction effect of terraced and contour tillage was better, which was 24.6% and 14.7% for TN and 45.3% and 21.9% for TP, respectively. Through the water – sand – quality management collaborative analysis, excellent coupling can be achieved in the other four scenarios

收稿日期: 2023 – 05 – 04 修回日期: 2023 – 07 – 08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900501)和国家自然科学基金项目(42271306)

作者简介: 王玉宝(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: wyb0406@sina.com

except for the residue mulching which was high coupling. The order of coupling coordination degree was terraced field, farmland conversion to forest on slopes above 15°, stone line, contour planting, residue mulching. The results can provide reference for green water management measures and optimal allocation of water resources in the Yellow River Basin.

Key words: green water management; water – sediment – quality coordination regulation; coupling coordination degree; Huangshui Basin; SWAT model

0 引言

黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略,事关我国经济社会发展和国家安全大局^[1]。当前黄河仍存在水资源保障形势严峻^[2]、流域生态环境脆弱^[3]等突出问题。湟水是黄河上游最大的一级支流,是黄河上游径流的重要来源区。流域内过度放牧、垦殖等人类活动的加剧^[4]、传统耕作方式为主的种植形式^[5-6],导致水土流失^[7]、农业面源污染^[5-6]问题日趋严重,且流域内存在径流年际年内分配不均匀的问题^[8],绿水管理是在流域上游采取保护性耕作^[9]、地表覆盖^[10]、梯田^[11]、陡坡退耕还林还草^[12]和合理灌溉施肥^[13-14]等绿水管理措施,能够在控制上游水土流失、减少农业面源污染的同时,改善下游的水量水质,为下游生态环境保护和社会经济发展提供更加清洁稳定的水资源^[15-16]。KAUFFMAN 等^[17]耦合 SWAT 模型与 WEAP 模型,在 Tana 流域开展了梯田、地表覆盖和筑垄等绿水管理研究,证明上述措施能有效减少农田地表径流,增加水库入库流量和地下水回灌,减少土壤流失,提升上下游效益;杨国胜等^[18]在堵河上游流域通过 SWAT 模型对绿水管理措施进行效果模拟,结果表明梯田、石线、等高耕作和地表覆盖 4 种绿水管理措施在水源涵养、水土保持和水质保护方面均产生了良好效益;ANTOLINI 等^[19]将水文模型(SWAT)与标准洪水损失估计模型(HAZUS-MH)相结合,量化耕地管理措施降低的洪水风险,结果表明在密西西比河开展流域规模性管理不仅能减少侵蚀,改善水质,还可以减少洪水损失。因此在湟水流域实施绿水管理,对于涵养水源、减少水土流失、保护脆弱生态,以及缓解黄河流域缺水形势、优化配置水资源具有重要意义^[20-21]。

协同治理是在协同论和治理理论的基础上形成的新兴理论^[22-23],该理论强调:各子系统产生控制系统发展的序参量,支配系统向有序方向发展、导致系统功能整体出现放大或倍增^[23],迄今为止国内流域相关的研究尚不多见。有关流域绿水管理效果的研究^[17-19],也仅关注水量、水沙或水质中的一个方面,缺少水-沙-质协同发展的评价指标,难以基于多目标优选水土管理措施。考虑到不同流域的自然条

件不同,对绿水管理措施的适用性和实施效果开展研究是必要的。鉴于此,本文以湟水流域为例,应用水文模拟方法,深入研究不同绿水管理措施的实施效果,从流域水量、泥沙、水质这 3 个子系统选取指标,构建流域水-沙-质协同治理的评估指标体系,采用耦合协调度模型,剖析流域各系统之间的耦合协同程度,以期对湟水流域生态保护与高质量发展提供参考。

1 研究区概况

湟水是黄河上游径流重要的来源,发源于祁连山脉达坂山南麓的包呼图山,河长 336 km。流域面积约为 $1.62 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于北纬 $36^{\circ}02' \sim 37^{\circ}28'$,东经 $100^{\circ}42' \sim 103^{\circ}04'$ 之间,处于青藏高原和黄土高原的过渡区,海拔为 1 629 ~ 4 860 m,地势西北高东南低。流域属高原干旱半干旱大陆性气候,多年平均气温为 $2.5 \sim 7.5^{\circ}\text{C}$,日照时间长,昼夜温差大,流域内农田耕地面积占青海省总耕地面积的 50%^[5],是青海省重要的粮食产区。流域的总出口水文测站为民和站^[24],其控制面积占流域总面积的 95% 以上(图 1)。2020 年,湟水流域平均降雨量为 568.6 mm,水土流失面积 $5.30 \times 10^3 \text{ km}^2$,流域干支流总体水质优,Ⅰ~Ⅲ类监测断面占总数的 96.6%,Ⅳ类断面占断面总数的 3.4%。

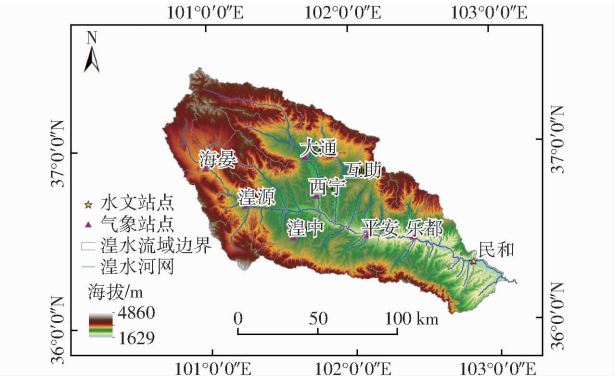


图 1 湟水流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of Huangshui Basin

2 数据与方法

2.1 研究数据

研究数据主要包括湟水流域的空间数据和属性数据,各类数据的来源及相关说明见表 1,其中空间数据均采用 UTM_WGS_84 坐标系。

表 1 研究数据及来源
Tab.1 Research data and sources

数据	描述	分辨率	来源
DEM	ASTER GDEM 数据集	30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
土地利用	2015 年遥感数据	30 m	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
气象	2006—2017 年降水量、风速、气温、太阳辐射数据	日	国家气象信息中心-中国气象数据网 (https://www.cmaads.org.com)
土壤	2015 年世界土壤数据库土壤数据集 (HWSD v1.2)	1:1 000 000	国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpcd.ac.cn/)
作物管理	2015 年流域内作物比例及生长情况		《青海省统计年鉴》及文献[25–27]
污染物	2015 年流域内施肥量和淋溶负荷	年	《青海省统计年鉴》及文献[28–29]
水文	2008—2017 年民和水文站径流、泥沙数据	月	《黄河水文年鉴》

2.2 SWAT 模型构建与验证

SWAT(Soil and water assessment tool)模型是由美国农业部(USDA)历经 30 余年开发的分布式水文模型^[30]。SWAT 模型是具有物理机制的连续时间模拟的分布式模型^[31],它可以将 GIS 和 RS 所提供的空间信息应用到一个复杂的大流域内,对各种不同的水文物理过程进行模拟^[31]。

本研究旨在构建流域水-沙-质协同治理的评估指标体系,利用 SWAT 模型模拟湟水流域不同绿水管理措施的实施效果,需构建土壤、土地利用、气象、空间离散及农业管理措施数据库。

2.2.1 土壤数据库

模型所需土壤数据包括土壤属性数据^[32]和土壤类型空间分布,土壤数据源自世界土壤数据库 HWSD(Harmonized World Soil Database) v1.2,该数据库是基于美国制标准制备的土壤粒径,无需再进行土壤粒径转换,避免数据处理带来的误差^[33]。湟水流域土壤类型空间分布如图 2 所示,流域内土壤类型共 28 种。

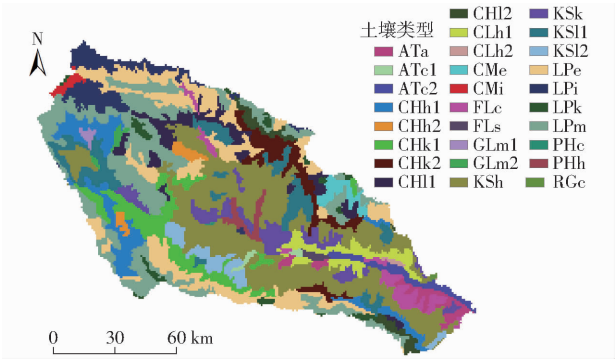


图 2 湟水流域土壤类型

Fig.2 Soil type in Huangshui Basin

建模所需的土壤物理属性参数,按其获取方式,划分为 3 类(表 2):第 1 类从 HWSD 中查取;第 2 类利用 SPAW 软件和统计分析方法计算;第 3 类包括 ANION_EXCL(阴离子交换孔隙度)和 SOL_CRK(土壤最大可压缩量),两者均取默认值(0.5)。

表 2 土壤属性数据库参数

Tab.2 Parameters of soil properties

序号	代码	模型定义	注释
1	SNAM	土壤名称	查询 HWSD
2	NLAYERS	分层数	查询 HWSD
3	HYDGRP	水文组分组	公式计算
4	SOL_ZMX	土壤剖面最大根系深度 (mm)	查询 HWSD
5	ANION_EXCL	阴离子交换孔隙度	0.5
6	SOL_CRK	土壤压缩量	0.5
7	TEXTURE	土壤层结构	查询 HWSD
8	SOL_Z	土壤表层到底层深度(m)	查询 HWSD
9	SOL_BD	土壤湿密度(kg/m ³)	SPAW 软件计算
10	SOL_AWC	土壤有效持水量(mm)	SPAW 软件计算
11	SOL_K	饱和水力传导系数	SPAW 软件计算
12	SOL_CBN	有机碳含量(%)	有机质含量乘 0.8
13	CLAY	黏土(粒径 0~0.002 mm)含量(%)	查询 HWSD
14	SILT	壤土(粒径 0.002~0.05 mm)含量(%)	查询 HWSD
15	SAND	沙土(0.05~2 mm)含量(%)	查询 HWSD
16	ROCK	砾土(粒径大于 2 mm)含量(%)	查询 HWSD
17	SOL_ALB	地表反射率	0.01
18	USLE_K	USLE 方程中土壤侵蚀 K 因子	公式计算
19	SOL_EC	电导率(dS/m)	查询 HWSD

2.2.2 土地利用数据库

土地利用数据库包括土地利用类型空间分布和属性数据库。我国土地利用类型的属性与 SWAT 自带土地利用数据库一致^[34],不需单独构建属性数据库。湟水流域土地利用空间分布图(图 3),由 2015 年中国土地利用数据库裁剪得到,根据 SWAT 模型输入数据的要求,对原有土地利用类型重分类为 9 种。

根据 2015 年青海省统计年鉴的数据将耕地分为 5 种作物类型,分别为春油菜(6.92%)、马铃薯(4.75%)、小麦(4.55%)、玉米(1.58%)和豆类(1.98%),见表 3。

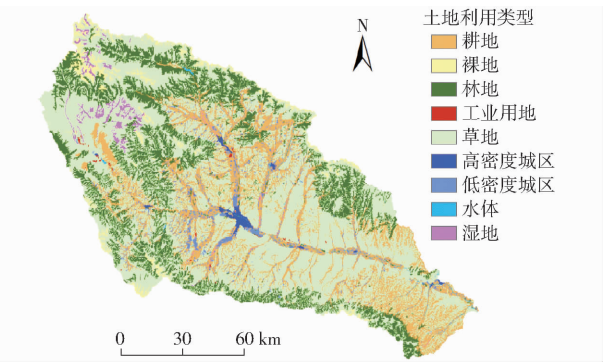


图3 湟水流域土地利用类型

Fig.3 Land use map in Huangshui Basin

表3 主要土地利用比例

土地利用类型		耕地						所占比例
		春油菜	马铃薯	小麦	玉米	豆类		
草地	林地	6.92	4.75	4.55	1.58	1.98	61.55	17.00

2.2.3 气象数据库

采用中国气象数据网湟水流域范围内部8个气象站点(图1)位置信息及各站点2006—2017年的日尺度气象数据(降水量、温度、风速、相对湿度和太阳辐射)构建SWAT模型气象数据库及天气发生器数据。

2.2.4 空间离散数据库

SWAT基于流域的DEM提取河网水系并进行

表4 SWAT模型中输入的作物管理措施

作物种类	耕作时间	播种时间	收获时间	施肥量/(kg·hm ⁻²)
春油菜	4月1日	4月8日	9月15日	180(氮肥)、50(过磷酸钙)
马铃薯	4月20日	4月20日	10月10日	270(磷酸二铵)、225(尿素)
小麦	4月1日	4月5日	9月10日	165(尿素)、150(磷酸二铵)
豆类	3月25日	4月1日	9月10日	150(过磷酸钙)、110(尿素)
玉米	4月15日	4月18日	10月5日	180(尿素)、300(磷酸二铵)

2.2.6 模型参数率定与验证

利用SWAT-CUP软件(SWAT calibration and uncertainty procedures)对模型进行参数率定及径流量、泥沙量的校准(图5、6)。用决定系数(R²)、效率系数(NSE)和偏差百分比(PBAIS)综合评价模拟

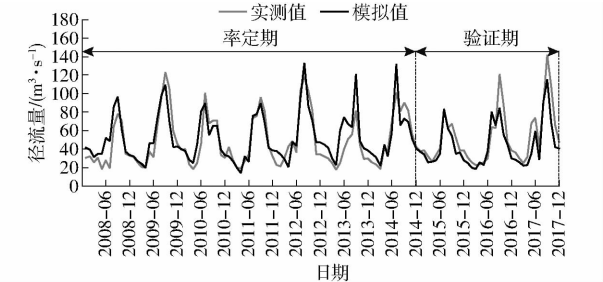


图5 民和站径流量模拟值和实测值

子流域划分,再依据土壤、土地利用及坡度等信息将各子流域分割为若干水文响应单元(HRUs)。湟水流域共划分为38个子流域(图4),为模拟不同作物、不同坡度对于绿水管理措施的响应情况,将坡度分为0°~10°、10°~25°、25°~50°和>50°共4类。在划分HRUs时,土地利用类型、土壤类型、坡度的阈值为10°、15°和20°,共计分为1913个HRUs。

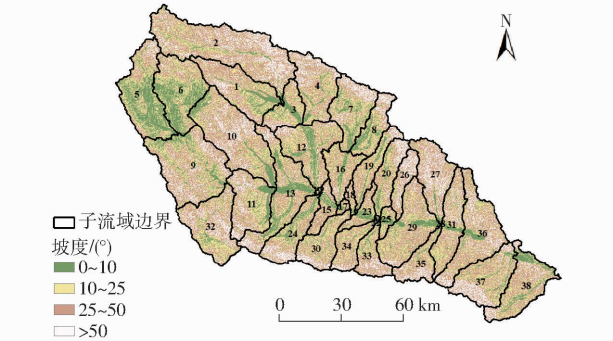


图4 湟水子流域分布图

Fig.4 Subbasin distribution of Huangshui Basin

2.2.5 农业管理设施数据库

为模拟不同耕地上的农业管理措施,在管理模块输入各种作物的播种、耕作、施肥、收获^[25-27]的具体措施(表4),湟水流域灌溉农业约为耕地面积的1/3,其他区域均为雨养农业,将坡度为0°~10°耕地设置为作物需求满足阈值0.9的自动灌溉^[18]。

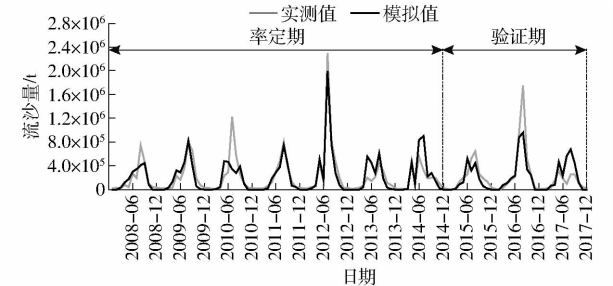


图6 民和站泥沙量模拟值和实测值

Fig.6 Simulated and observed sediment output at Minhe Station

效果。通常R²大于0.6,NSE大于0.5,PBAIS为-20%~20%时,认为模型模拟效果良好^[35],可用于该区域的水文相关研究。本研究构建的湟水流域SWAT模型,以月尺度径流量和泥沙量来率定和验

Fig.5 Simulated and observed runoff at Minhe Station

证(表 5),由表 5 可知, R^2 大于 0.65,NSE 大于 0.65,PBAIS 为 $-11.70\% \sim 1.10\%$,结果满足要求。说明 SWAT 模型在湟水流域具有良好的适用性。

表 5 SWAT 模型月度校准和验证统计数据

Tab.5 Monthly calibration and validation statistics for SWAT models

参数		率定 (2008—2014 年)	验证 (2014—2017 年)
径流量	R^2	0.80	0.84
	NSE	0.76	0.81
	PBAIS/%	-11.70	1.10
泥沙量	R^2	0.72	0.68
	NSE	0.72	0.67
	PBAIS/%	-7.30	-1.20

研究区实测水质数据包含各种污染来源,本研究仅针对农田面源污染物,故水质模块验证采用淋溶负荷、淋溶率计算公式^[34]计算流域出口氮素、磷素淋溶率实测值^[35]和模拟值,计算方法为

$$L = N_A \eta$$

(1)

$$\eta = \frac{L_A - C_K}{R_{NA}} \times 100\%$$

(2)

其中 $N_A = N_s + bN_c$

式中 L ——农田 NO_3^- -N 淋溶负荷,Gg/a

N_s ——合成氮肥施用量,Gg/a

N_c ——复合肥施用量,Gg/a

N_A ——农田肥料施用量,Gg/a

表 6 情景模拟相关参数设置

Tab.6 Set relevant parameters of scenario simulation

情景	CN2	USLE_P	ESCO	OV_N	SLSUBBSN	FILTERW	
基准情况(S0)	60 ~ 67	0. 30	0. 90	0. 13	设置值的 0. 8	0. 50	
梯田(S1)	58 ~ 65	0. 24	0. 90	0. 13			
等高耕作(S2)	55 ~ 62	0. 27	0. 90	0. 42			
石线(S3)	58 ~ 65	0. 30	0. 96	0. 13			
残茬覆盖(S4)	58 ~ 65	0. 27	0. 99	0. 30			
15°以上坡地退耕还林(S5)	58 ~ 65	0. 135	0. 90	0. 20			

CN2 减小将导致土壤侵蚀减小和地下水补给量增加;USLE_P 减小将导致土壤蒸发减小,可以降低土壤侵蚀,增加地下水交换量;ESCO 增加将导致土壤无效蒸发减小,而可供植被蒸腾利用的水(绿水)增加,流域出口的蓝水量增加;OV_N 越大意味着径流的阻力越大,流速越低,侵蚀越少;SLSUBBSN 为单个 HRU 的平均坡长,仅在梯田操作中改变该参数,代表梯田的宽度;FILTERW 越大意味着土壤侵蚀量越小、水分下渗量越大、地表径流越小。

2.4 水-沙-质管理协同水平评价

以系统耦合度 C_d 和耦合协调度 D 作为水-沙-

η ——农田 NO_3^- -N 淋溶率,%
 L_A ——常规施肥 NO_3^- -N 淋失量, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$
 C_K ——不施肥 NO_3^- -N 淋失量, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$
 R_{NA} ——年单位面积 N_A 值, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$
 b ——复合肥中含氮量,取 30% ^[28]

2.3 绿水管理情景设置

根据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》、《关于加强新时代水土保持工作的意见》等政策对绿水管理的需求,结合文献[17-18,36-39],选取并设置 5 种绿水管理情景(表 6),其中梯田和退耕还林在青海省已有实施先例;石线作为梯田的替代措施,成本更低,且材料在研究区内易得,有推广的可能性;等高耕作是一种保护性耕作,成本低且在坡地实施有较好的效果;残茬覆盖可作为地膜覆盖的替代方式,可在达到绿水管理目标的同时减少污染。S0 为经过参数率定后的湟水流域 SWAT 模型模拟结果,S1~S4 通过改变参数实现,修改的相关参数包括径流曲线数(CN2)、水土保持因子(USLE_P)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、地表径流的曼宁系数(OV_N)、坡长(SLSUBBSN)以及过滤带宽度(FILTERW)(表 6);15°以上坡地退耕还林(S5)采用重建 SWAT 土地利用数据库的方法实现,仅需将土地利用图中 15°以上的耕地修改为林地,保持其他输入数据和参数与原 SWAT 工程一致,修改土地利用类型图在 ArcGIS 软件中操作。

质管理协同水平的评价指标^[40-42],有助于厘清研究区的产水作用、土壤保护作用及保肥减污作用 3 个子系统之间相互协同促进的程度。

指标归一化处理公式为^[43]

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{a_{i,j} - \min a_{i,j}}{\max a_{i,j} - \min a_{i,j}} & \text{(正向指标)} \\ \frac{\max a_{i,j} - a_{i,j}}{\max a_{i,j} - \min a_{i,j}} & \text{(负向指标)} \end{cases}$$

(3)

式中 $x_{i,j}$ ——归一化处理后第 i 子系统中第 j 指标的值

$a_{i,j}$ ——第 i 子系统中第 j 指标不同绿水管理情景下的模拟值

借鉴文献[44]中水资源管理、土壤侵蚀、农业面源污染评估指标体系选取, $i=1$, 为水量子系统, 选取指标为流域产水量(WYLD)和地下水补给量(DA_RCHG), 为正向指标; $i=2$, 为泥沙系统, 选取指标为流域出口输沙量(SED_OUT), 为负向指标; $i=3$, 为水质子系统, 选取指标为流域出口总氮(TN)和总磷(TP)输出量, 为负向指标(表7)。

表 7 水量、泥沙、水质子系统指标

Tab.7 Water quantity, sediment, and water quality subsystem index		
子系统	指标	描述
水量	WYLD(mm)	时间步长内从 HRU 进入主河道的总水量
	DA_RCHG(mm)	时间步长内从根区进入深层含水层的水量
泥沙	SED_OUT(t)	时间步长内随水流流出河段的泥沙量
水质	TN(kg)	时间步长内河段有机氮输出量
	TP(kg)	时间步长内河段有机磷输出量

系统评估指数 p_i 计算式为

$$p_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{i,j} \tag{4}$$

其中

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1$$

式中 w_j ——第 j 项指标的权重系数

系统耦合度 C_d 计算式为

$$C_d = m \frac{\left(\prod_{i=1}^m p_i\right)^{\frac{1}{m}}}{\sum_{i=1}^m p_i} \tag{5}$$

其中 $C_d \in [0, 1]$, 其值越大, 子系统间相互作用、相互影响越强烈。

耦合协调度 D 计算式为

$$D = \sqrt{C_d T} \tag{6}$$

其中

$$T = \sum_{i=1}^m \beta_i p_i \tag{7}$$
$$\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$$

式中 T ——耦合系统的协调指数

β_i —— i 子系统的权重, 各子系统在流域治理中发挥同等重要的作用^[42], 故 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1/3$

其中 $D \in [0, 1]$, 表征各子系统之间是在高水平上相互促进还是低水平上相互制约, 其值越大, 各子系统的整体协调性越好。

借鉴相关研究, 将耦合度和耦合协调度分别划分为不同等级^[42, 45], 来衡量 3 个子系统之间不同程度的耦合协同关系(表 8)。

表 8 耦合指标分级

Tab.8 Coupling index classification			
C_d	耦合类型	D	耦合协调类型
[0,0.3]	低等耦合	[0,0.2]	重度失调
(0.3,0.5]	中等耦合	(0.2,0.4]	中度失调
(0.5,0.8]	高等耦合	(0.4,0.6]	基本协调
(0.8,1.0]	优等耦合	(0.6,0.8]	中度协调
		(0.8,1.0]	高度协调

削减率^[46]计算式为

$$R_E = \frac{E_i - E_0}{E_0} \times 100\% \tag{8}$$

式中 R_E ——削减率, 表征实施绿水管理措施后各指标相对于基准情况的优化程度

E_i —— i 绿水管理措施后各指标模拟值

E_0 ——基准情况下各指标模拟值

3 结果与分析

将 5 种情景分别代入已验证好的 SWAT 模型中, 统计不同管理措施下水量、泥沙和水质的变化情况, 计算 3 个子系统之间的耦合协调关系。对流域 2008—2017 年降水资料进行频率分析与计算^[34], 得到湿润年、干旱年对应的年降水量, 对比实测数据, 选取降水量为 479.8 mm 的湿润年(2012 年)、降水量为 355.7 mm 的干旱年(2015 年)以及各年平均值(平均年)3 种情况对结果展开分析和讨论。

3.1 绿水管理的产水减洪作用

绿水管理活动在水量方面对流域的正向作用体现在 3 方面: ①区域产水量增加, 可以为下游提供更多的蓝水资源。②增加深层地下水的补给, 涵养上游水资源。③调整径流的年内分配, 在降水量较大的月份降低径流量, 起到削减洪峰、减少洪水的作用。

3.1.1 可用水量增加效应

产水量是各 HRU 汇入河道中的水量, 数值上是地表径流、侧向壤中流和地下径流之和。在采取不同的绿水管理措施时, 产水量变化呈现两种相反的趋势(图 7)。在 S1、S3、S4 和 S5 情景下, 产水量均有所增加, 而 S2 产水量仅在干旱年有少量增加, 在湿润年和平均年产水量均减少。

S5 在干旱年、湿润年和平均年分别增加 1.66×10^7 、 1.84×10^7 、 $1.77 \times 10^7 \text{ m}^3$, 由于树木的植被根系深、叶面截留雨水, 因此退耕还林使地表径流大幅减少, 但还林也促进了水分下渗过程, 侧向径流和地下径流有所增加, 产水总量因此增加。除 S5 外, S4 的蓝水增加量变化最大, 在干旱年、湿润年和平均年产水量分别增加 1.06×10^7 、 1.11×10^7 、 $1.14 \times 10^7 \text{ m}^3$,

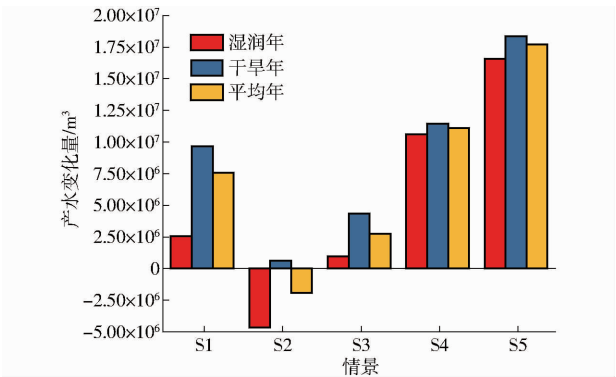


图 7 不同情景下产水变化量

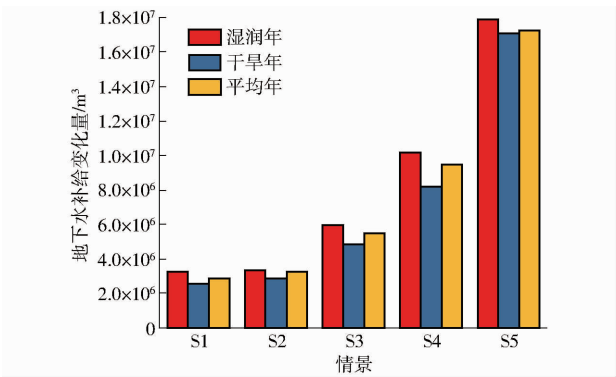


图 8 不同情景下地下水补给变化量

Fig. 7 Changes in water yield under different scenarios

Fig. 8 Changes in groundwater recharge under different scenarios

作物残茬覆盖于土壤之上,大幅减少了土壤蒸发,减少了地表径流,使更多的降水下渗,增加了产水量。S1 和 S3 情景下,产水量增加趋势相似,干旱年和湿润年的增量差距较大,分别为 7.09×10^6 、 $3.38 \times 10^6 \text{ m}^3$,作为梯田的一种替代措施,石线的效果略逊于梯田,但二者均能在干旱年份提供更多的可用水量。上述 4 种措施的作用下,土壤蒸发大幅减少,促使绿水向着可利用的蓝水转化。

而在 S2 情景下,产水量的变化并不剧烈甚至有所减少,在干旱年、湿润年和平均年产水量仅变化 -0.5% 、 0.1% 和 -0.2% 。

3.1.2 地下水补给效应

深层地下水补给直接为下游利用,但能够补充上游地区地下水量,涵养上游水资源,具有重要的生态意义。5 种管理情景的地下水补给均有所增加(图 8),由大到小依次为 S5、S4、S3、S1、S2。S5 情景下的增加最为显著,在干旱年、湿润年和平均年增量分别为 1.79×10^7 、 1.71×10^7 、 $1.72 \times 10^7 \text{ m}^3$,S4 效果次之,在干旱年、湿润年和平均年增长量分别为 1.01×10^7 、 8.21×10^6 、 $9.50 \times 10^6 \text{ m}^3$;S1 和 S2 的地下水补给增加量较为相似,增长率约 0.4% ,增长量在 $2.58 \times 10^6 \sim 3.38 \times 10^6 \text{ m}^3$ 之间。5 种措施地下水补给增加对降水的响应较为一致,在降水偏多的湿润年,地下水补给量的增加明显高于干旱年,降水对于地下水补给有重要作用。

3.1.3 径流调节效应

统计 5 种措施流域出口月度径流数据,并与基准情况进行对比,分析径流年内分布的影响(图 9)。为方便研究,根据湟水流域降水特征,设 6—9 月为丰水期,12 月—次年 2 月为枯水期,其他月份为平水期。

S5 情景下,每个月的径流量均有所增加,枯水期径流量增加最多,平水期次之,丰水期增加量最少,月平均增加量分别为 2.29×10^6 、 1.82×10^6 、 $8.10 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

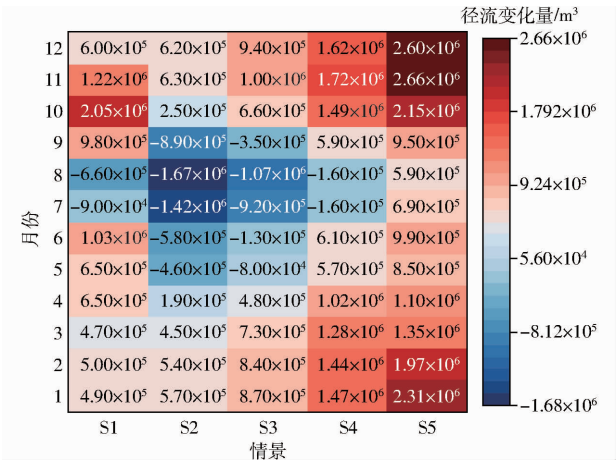


图 9 不同情景下流域出口径流变化量

Fig. 9 Changes in runoff at basin outlet under different scenarios

其他 4 种情景下,径流在枯水期和平水期呈现增加的趋势,且枯水期的月均增量大于平水期。在枯水期,径流增加量由大到小依次是 S4、S3、S2、S1,月增加量分别为 1.51×10^6 、 8.80×10^5 、 5.80×10^5 、 $5.30 \times 10^5 \text{ m}^3$;在平水期,径流增加量由大到小依次是 S4、S1、S2、S3,月增加量分别为 1.38×10^6 、 1.10×10^6 、 7.20×10^5 、 $3.80 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。在丰水期,4 种管理措施在汛期(7—8 月)径流量均有所减少,6 月和 9 月呈现或减或增的趋势,月均径流变化量由大到小依次为 S1、S4、S3、S2,月变化量分别为 3.80×10^5 、 2.90×10^5 、 -5.10×10^5 、 $-1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

3.2 绿水管理的保土减沙作用

统计 5 种绿水管理措施下,湟水流域各 HRU 的产沙负荷情况,按照面积加权平均,得到产沙负荷变化结果(图 10)。基准情况下,2012 年、2015 年和平均年泥沙负荷分别为 $2\,670$ 、 $1\,230$ 、 $1\,850 \text{ kg/hm}^2$ 。

5 种措施对于减少泥沙负荷均有正面效果,削减率由大到小依次为 S1、S3、S2、S5、S4;平均泥沙削减量分别为 4.09×10^5 、 3.83×10^5 、 2.81×10^5 、 1.11×10^5 、 $8.40 \times 10^4 \text{ t}$ 。梯田的固沙效果最佳,在

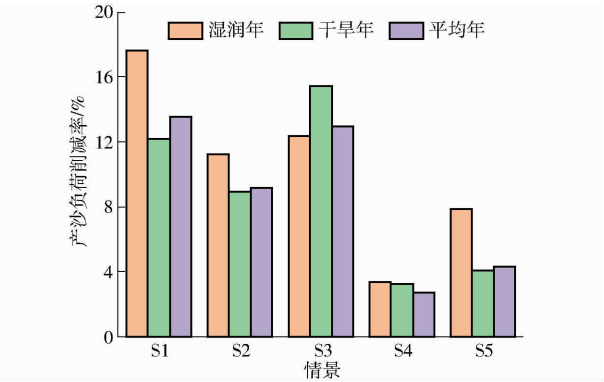


图 10 不同情景下湟水流域产沙负荷削减率
Fig. 10 Sediment load reduction rate in Huangshui Basin under different scenarios

湿润年、干旱年和平均年产沙负荷削减率分别达到 17.6%、12.2% 和 13.5%；在耕地上建造梯田能够降低坡长，增加入渗率，有效拦截地表径流和预防侵蚀，从而有效减少水土流失，仅在耕地上进行统计，削减率为 50.1%、27.5% 和 37.0%。石线沿等高线方向堆积，与坡度方向垂直，可起到减缓暴雨径流和阻挡土壤流失的作用，对于减少土壤流失也有较好的效果，在干旱年、湿润年和平均年产沙负荷量分别为 2 340、1 040、1 610 kg/hm²，削减率分别为 12.4%、15.5% 和 13.0%。等高耕作虽然产水作用有限，但有较好的减沙效果，在干旱年、湿润年和平均年产沙负荷量分别为 2 370、1 120、1 680 kg/hm²，削减率分别为 11.2%、8.9% 和 9.2%。15°以上坡地退耕还林在湿润年的减沙效果优于干旱年，但总体减沙效率较低；残茬覆盖的效果与其他 4 种措施相比减沙效果较差，在干旱年、湿润年和平均年削减率仅为 3.0%、3.3% 和 2.7%。

3.3 绿水管理的保肥减污作用

采取 5 种措施后，流域的 TN、TP 负荷均有所减少，TP 削减量不及 TN 削减量，但 TP 的削减效率总体高于 TN（图 11、12）。基准情景下，2012 年、2015 年和平均年 TN 负荷量分别为 3.46、1.15、2.24 kg/hm²，TP 负荷量分别为 1.14、0.03、0.64 kg/hm²，总体来讲，各措施对 TN、TP 削减的效果趋势较为一致，干旱年比湿润年削减率更高，但湿润年的削减量更大。

TN 负荷削减效果由大到小依次为 S1、S2、S5、S3、S4。TN 负荷削减最为有效的 2 种措施分别为梯田和等高耕作，在湿润年、干旱年和平均年，梯田的削减率分别为 26.0%、27.0% 和 24.6%，等高耕作为 14.7%、17.4% 和 14.7%。石线和 15°以上坡地退耕还林 TN 污染控制效果较好，削减率达 12.5%~20.0%。残茬覆盖能够有效减少无效蒸发，但对于减少污染作用有限，削减率不足 7.0%。削减量在 0.5 kg/hm² 以下。

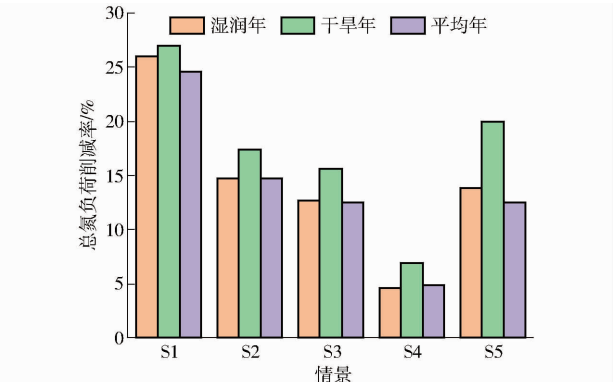


图 11 不同情景下湟水流域总氮负荷削减率
Fig. 11 TN load reduction rate in Huangshui Basin under different scenarios

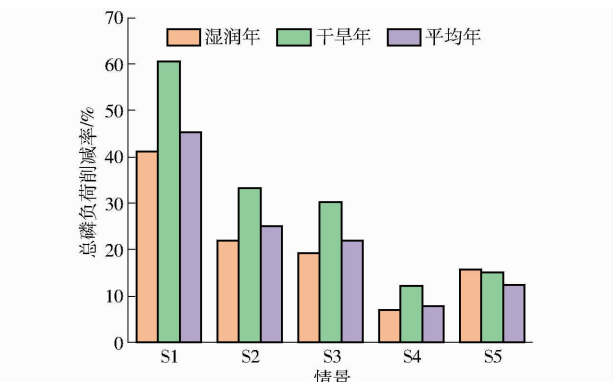


图 12 不同情景下湟水流域总磷负荷削减率
Fig. 12 TP load reduction rate in Huangshui Basin under different scenarios

TP 负荷削减效果由大到小依次为 S1、S2、S3、S5、S4。TP 负荷削减最有效的 2 种措施为梯田和等高耕作，在湿润年、干旱年和平均年，梯田削减率为 41.2%、60.6% 和 45.3%，等高耕作为 19.3%、30.3% 和 21.9%。石线在 3 种水平年 TP 削减率均在 20.0% 以上。残茬覆盖减少 TP 负荷的作用有限，在干旱年、湿润年和平均年削减率分别为 7.0%、12.1% 和 7.8%，远低于其他 4 种措施。

由于退耕还林直接减少了耕地面积，从源头上控制了化肥的使用量，因而在减少污染物排量效果也很好，对流域出口 TP、TN 削减率分别达到 19.7% 和 11.7%。

3.4 水-沙-质管理协同分析

3.4.1 耦合度计算

耦合度解释的仅是各子系统之间相互作用的强弱，不分好坏。采取 5 种绿水管理措施的 C_d 取值在 0.74~0.95 之间，由大到小依次为 S1、S5、S3、S2、S4（图 13）。S1、S3 和 S5 这 3 种情景下，耦合度均在 0.90 以上；S2 的 C_d 为 0.84；S4 情景的 C_d 最小，为 0.74。除 S4 为高等耦合外，其他 4 种情景下均能达到优等耦合。说明与不采取绿水管理措施的基准情

况相比,5 种绿水管理措施作用下流域产水、保土和减污作用耦合程度均有所增强。

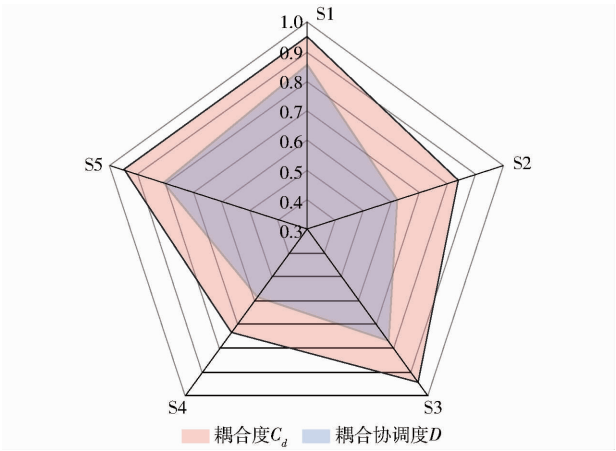


图 13 水-沙-质协同指数

Fig. 13 Water - sand - water quality coordination index

3.4.2 耦合协调度计算

D 更能表征各子系统之间相互促进的作用情况。5 种绿水管理措施的 D 取值在 0.58 ~ 0.86 之间,由大到小依次为 S1、S5、S3、S2、S4 (图 13),其中,S1 情景下 D 最大,为 0.86;S5 的 D 也较高,为 0.81;S2 情景下 D 为 0.77;S4 情景下 D 最小,为 0.58。根据表 8 的评价标准,S1 和 S5 的耦合协调性较好,3 个子系统之间表现为高度协调;S2 和 S3 这 2 种情景表现为中度协调;而 S4 情景下仅为基本协调。

3.4.3 耦合协调性分析

C_d 和 D 的变化具有一致性,经过标准化处理的水量、水沙和水质这 3 个子系统的评估指标差距越大,说明在相应的绿水管理情境下,产水作用、减沙作用和减污作用差距越大, C_d 和 D 越低。结合图 14 中水量、水沙和水质 3 个子系统评估指数 (p_i) 和耦合系统综合评估指数 (T) 能够解释 C_d 和 D 的变化情况。

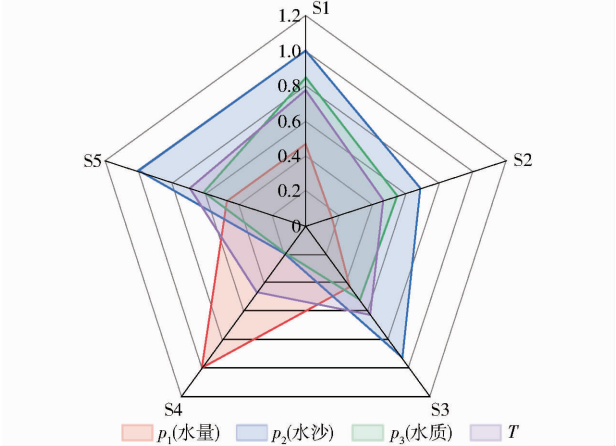


图 14 子系统评估指数、耦合综合评估指数

Fig. 14 Variation of evaluation index and comprehensive evaluation index

残茬覆盖的 C_d 和 D 在 5 种绿水管理情景下均为最小。由于残茬覆盖措施减少了大量的无效土壤蒸发,促进了绿水向蓝水的转化,增加了产水量和地下水补给量,因此产水效益较大,但覆盖地表对于暴雨情况下的水土保持效果有限,其减沙和减污的效果相对较小,因此 3 个子系统差距较大,其 T 值也是 5 种措施中最低的,3 个子系统的协调度和耦合度均较低,呈现一定程度的制约关系。

梯田的 C_d 和 D 在 5 种绿水管理情景下均为最高。由于梯田措施改变了地形和坡度,在拦蓄雨水的同时也增加了土壤下渗量、减少了地表径流,地表径流是水土流失和污染物运移的主要方式,减少地表径流能够极大地减少土壤流失和面源污染,因此梯田措施下,蓝水量增加和减沙、减污的协同性较强,3 个子系统的评估指数在 5 种措施情境下均为最高,其 T 值也是 5 种措施中最高的也充分说明了这一点,梯田措施有较强的产水、固土和保肥作用。

4 讨论

本文构建的湟水流域 SWAT 模型,在前人对流域水沙模拟结果^[24,32]的基础上,结合水沙质基准情况,增加 5 种绿水管理情景设置并展开分析。在本文的绿水管理应用中,除等高耕作外,梯田、石线、地表覆盖和退耕还林这 4 种管理措施,减少了上游无效蒸发和地表径流产水量,同时不同程度地减少了泥沙侵蚀,使更多的绿水转化成清洁的蓝水,对上游地区的水土保持有积极作用,保证了供给下游水资源的水量和水质。

绿水管理对大型流域而言,实质上是对水资源进行二次重分配。第 1 次重分配发生在绿水管理过程中。在流域上游实施绿水管理措施,以产水量增加的形式将上游的绿水转化为蓝水并向下游输送,将水资源由利用率低的上游转移至利用率高的中下游,有利于流域内水资源高效利用和水资源效益的总体提升。第 2 次重分配体现在年内水资源的变化上,绿水管理措施能够有效减少地表径流,以壤中流和地下径流的形式增加产水量,延长产水过程,在枯水期和平水期增加径流量;同时在汛期暴雨产流过程中起到削减洪峰的作用,减少泥沙运移和面源污染,在保证安全的同时,向下游供给更为清洁和稳定的水资源。

不同的绿水管理产水、减沙和减污的效果有所不同,从本文结果来看,耕地上土壤流失和面源污染的削减程度与产水量中地表径流的占比变化趋势相一致,产水量中地表径流的占比越少,对于减沙和减污的效果也就越显著。因此,要提升流域水资源量—

质目标实现的效果,在减少无效蒸发的同时,应设法将地表径流向壤中流和地下径流的方向转化,在保证蓝水量的同时减少水土流失和面源污染。

在大型流域分区域开展绿水管理活动有助于提高整个流域的资源利用效率,形成规模效应。本研究仅对湟水流域展开绿水管理模拟,由于流域上游不同地区具有不同的气候、土地利用特性,适用的水土管理措施也不尽相同,且面积过大水文模拟会降低准确性。因此,应结合不同地区的水土资源禀赋和气候条件,分区域展开适合该地区实际发展条件、满足多目标需求的绿水管理模拟,以达到大型流域多区域协同治理的效果。黄河流域上游各子流域差异大,对于流域整个上游开展绿水管理,则需要在各子流域分别开展绿水管理模拟,且应先对各子流域特点进行识别,确定流域水土管理措施的目标,包括水量、减沙、减污、生态等不同方面,结合流域实际情况,因地制宜地选取合适的绿水管理措施,以形成集群效果。

5 结 论

(1)基于地理、水文及气象数据构建了研究区 SWAT 模型,并对模型进行率定验证,径流量和泥沙

量在率定、验证期的 R^2 大于 0.65,NSE 大于 0.65,PBAIS 为 $-11.70\% \sim 1.10\%$,模拟精度较好,表明构建的模型在湟水流域具有良好的适用性。

(2)水量方面,除等高耕作的产水量减少外,其余 4 种措施均呈现增加效果,年增量为 $9.69 \times 10^5 \sim 1.84 \times 10^7 \text{ m}^3$;5 种措施均能增加地下水补给,年增量为 $2.58 \times 10^6 \sim 1.79 \times 10^7 \text{ m}^3$;其中 15° 以上坡地退耕还林增加产水量和地下水补给的效果最好,等高耕作和石线措施调节年内径流分配、削减汛期径流量的作用较为显著。水沙方面,5 种措施均能在一定程度上减少产沙负荷,其中梯田和石线的削减效果较显著,削减率分别为 13.5% 和 13.0%。在水质方面,5 种措施均能减少总氮(TN)和总磷(TP)负荷量,且干旱年削减率高于湿润年,其中梯田和等高耕作对面源污染的削减效果较好,削减率分别为 24.6%、14.7%(TN)和 45.3%、21.9%(TP)。

(3)水-沙-质管理协同分析表明, C_d 和 D 由大到小排序结果均为:梯田、 15° 以上坡地退耕还林、石线、等高耕作、残茬覆盖, C_d 为 0.74 ~ 0.95, D 为 0.58 ~ 0.86。其中,梯田表现最优, C_d 和 D 分别达到 0.95 和 0.86;残茬覆盖效果最差, C_d 和 D 仅为 0.74 和 0.58。

参 考 文 献

[1] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.

[2] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J].资源科学,2020,42(1):29-36.

JIA Shaofeng, LIANG Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36. (in Chinese)

[3] 金凤君,马丽,许堞.黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J].资源科学,2020,42(1):127-136.

JIN Fengjun, MA Li, XU Die. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 127-136. (in Chinese)

[4] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于RUSLE模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.

CHEN Chaoliang, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion in Huangshui Basin based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 73-79. (in Chinese)

[5] ZHANG L, TAN X F, CHEN H N, et al. Effects of agriculture and animal husbandry on heavy metal contamination in the aquatic environment and human health in Huangshui River Basin[J]. Water, 2022, 14(4): 549.

[6] 殷炳超,赵琰鑫.湟水流域水污染源排放清单及空间分析研究[J].环境保护科学,2022,48(4):68-73.

YIN Bingchao, ZHAO Yanxin. Study on discharge inventory and spatial analysis of water pollution sources in Huangshui Basin[J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(4): 68-73. (in Chinese)

[7] 余欣,李其江,刘希胜,等.湟水流域水沙情势演变及驱动力分析[J].人民黄河,2022,44(9):64-70.

YU Xin, LI Qijiang, LIU Xisheng, et al. Evolution and driving force analysis of water and sediment regime in Huangshui Basin[J]. Yellow River, 2022, 44(9): 64-70. (in Chinese)

[8] 汪清旭,时璐,董胜虎.近20年湟水流域地表水资源量及用水量变化规律与成因分析[J].水利技术监督,2021(2):104-109.

WANG Qingxu, SHI Lu, DONG Shenghu. Variation regularity and cause analysis of surface water resources and water consumption in Huangshui Basin in recent 20 years[J]. Water Technical Supervision, 2021(2): 104-109. (in Chinese)

[9] RISAL A, PARAJULI P B. Evaluation of the impact of best management practices on streamflow, sediment and nutrient yield at field and watershed scales[J]. Water Resources Management, 2022, 36(3): 1093-1105.

[10] IQBAL M A, ANWAR U H, AZIZ T. Effect of mulch, irrigation and soil type on nutrient uptake of forage maize[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2006, 43: 13-16.

[11] ZHANG Q, QIN W, CAO W, et al. Response of erosion reduction effect of typical soil and water conservation measures in

cropland to rainfall and slope gradient changes and their applicable range in the Chinese Mollisols Region, Northeast China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(2): 251–262.

[12] LI S, LI J, HAO G, et al. Evaluation of best management practices for non-point source pollution based on the SWAT model in the Hanjiang River Basin, China[J]. Water Supply, 2021, 21(8): 4563–4580.

[13] DAS T K, SINGH C B, MUKHOPADHYAY R. Effect of straw mulch, irrigation and land configuration on soil hydrothermal regime under Bt cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Ecology, Environment and Conservation, 2015, 21: 135–139.

[14] AHSAN A, DAS S K, KHAN M H R B, et al. Modeling the impacts of best management practices (BMPs) on pollution reduction in the Yarra River catchment, Australia[J]. Applied Water Science, 2023, 13(4): 1–20.

[15] HUNINK J E, DROOGERS P, KAUFFMAN 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.

[16] 白占国,刘昌明,陈莹,等. 绿水信贷及其在中国流域生态补偿中的应用[J]. 水利经济, 2015, 33(4): 66–71.
BAI Zhanguo, LIU Changming, CHEN Ying, et al. Green water credit and its application in ecological compensation of river basins in China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(4): 66–71. (in Chinese)

[17] KAUFFMAN S, DROOGERS P, HUNINK J, 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: 133–143.

[18] 杨国胜,黄介生,李建,等. 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.
YANG Guosheng, HUANG Jiesheng, LI Jian, et al. Research on ecological compensation standard of green water management based on SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 809–815. (in Chinese)

[19] ANTOLINI F, TATE E, DALZELL B, et al. Flood risk reduction from agricultural best management practices[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2020, 56(1): 161–179.

[20] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 1–6, 16.
ZUO Qiting. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 1–6, 16. (in Chinese)

[21] 高学睿,闫程晟,王玉宝,等. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 275–283.
GAO Xuerui, YAN Chengsheng, WANG Yubao, et al. Simulation and evaluation of rainwater harvesting potential simulation and evaluation of rainwater harvesting potential in typical areas of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 275–283. (in Chinese)

[22] 刘伟忠. 我国协同治理理论研究的现状与趋向[J]. 城市问题, 2012(5): 81–85.
LIU Weizhong. Current situation and trend of collaborative governance theory research in China[J]. Urban Problem, 2012(5): 81–85. (in Chinese)

[23] 李汉卿. 协同治理理论探析[J]. 理论月刊, 2014(1): 138–142.
LI Hanqing. Analysis of cooperative governance theory[J]. Theoretical Monthly, 2014(1): 138–142. (in Chinese)

[24] 张杰,贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 6–10.
ZHANG Jie, JIA Shaofeng. Study on difference of blue-green water in Huangshui Basin and green water under different types of land use based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(4): 6–10. (in Chinese)

[25] 宋佳,徐倩,田汇,等. 青海春油菜养分管理现状调查与分析[J]. 土壤, 2018, 50(5): 888–893.
SONG Jia, XU Qian, TIAN Hui, et al. Investigation and analysis of nutrient management status of spring rape in Qinghai Province[J]. Soil, 2018, 50(5): 888–893. (in Chinese)

[26] 朱春来,张荣,孙小凤,等. 青海东部春油菜养分管理技术研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16810–16811.
ZHU Chunlai, ZHANG Rong, SUN Xiaofeng, et al. Study on nutrient management technology of spring rape in eastern Qinghai Province[J]. Anhui Agricultural Science, 2010, 38(30): 16810–16811. (in Chinese)

[27] 刘颖川,杨凯,王金贵. 青海东部旱地玉米覆膜对产量及水热效应的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(22): 17–21.
LIU Yingchuan, YANG Kai, WANG Jingui. Effects of film mulching on yield and hydrothermal effect of maize in dry land of eastern Qinghai Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(22): 17–21. (in Chinese)

[28] 徐鹏,后希康,周丰,等. 华北平原农田硝态氮淋溶率和淋溶负荷估计[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3173–3180.
XU Peng, HOU Xikang, ZHOU Feng, et al. Estimation of nitrate leaching rate and leaching load in farmland of North China Plain[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 33(11): 3173–3180. (in Chinese)

[29] 马林,王洪媛,刘刚,等. 中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 1–10.
MA Lin, WANG Hongyuan, LIU Gang, et al. Prevention and control mechanism of nitrogen and phosphorus leaching loss in farmland in northern China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 1–10. (in Chinese)

[30] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 243–251.

- LAI Geyang, WU Dunyin, ZHONG Yexi, et al. Development and application of SWAT model[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2012, 40(3): 243–251. (in Chinese)
- [31] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003(1): 79–86.
WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. Research on the principle, structure and application of SWAT model[J]. Progress in Geography, 2003(1): 79–86. (in Chinese)
- [32] 杨军军, 高小红, 李其江, 等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 82–88.
YANG Junjun, GAO Xiaohong, LI Qijiang, et al. SWAT model construction and uncertainty analysis on its parameters for the Huangshui River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(1): 82–88. (in Chinese)
- [33] 姜晓峰, 王立, 马放, 等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 135–138.
JIANG Xiaofeng, WANG Li, MA Fang, et al. Research on the localization construction method of SWAT model soil database[J]. Water Supply and Drainage in China, 2014, 30(11): 135–138. (in Chinese)
- [34] 降亚楠, 王蕾, 魏晓妹, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 262–270.
JIANG Ya'nan, WANG Lei, WEI Xiaomei, et al. Effects of climate change on runoff of Jing River based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 262–270. (in Chinese)
- [35] KAUR B, SHRESTHA N, DAGGUPATI P, et al. Water security assessment of the Grand River watershed in Southwestern Ontario, Canada[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 1883.
- [36] 冯畅. 变化环境下涟水流域蓝水绿水水资源的响应特征分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
FENG Chang. Impacts of changing environment on blue impacts of changing environment on blue and green water resources and their response characteristics in the Lianshui River Basin[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2018. (in Chinese)
- [37] 王晓, 郝芳华, 张璇. 丹江口水库流域非点源污染的最佳管理措施优选[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1335–1343.
WANG Xiao, HAO Fanghua, ZHANG Xuan. Optimization of best management practices for non-point source pollution in Danjiangkou Reservoir Basin[J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1335–1343. (in Chinese)
- [38] 王晓. 丹江口水库流域非点源污染时空特征及管理措施研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2010.
WANG Xiao. Temporal/spatial characteristics of non-point source pollution and management practices research in Danjiangkou Reservoir Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2010. (in Chinese)
- [39] 常舰. 基于 SWAT 模型的最佳管理措施(BMPs)应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
CHANG Jian. Evaluation for the effectiveness of best evaluation for the effectiveness of best management practices (BMPs) based on SWAT model—a case study of West Tiaoxi Watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [40] 刘畅, 江恩慧, 刘淑雅, 等. 基于绿色生产和资源协同的农业水土资源利用效率研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 369–378.
LIU Chang, JIANG Enhui, LIU Shuya, et al. Agricultural water and and resources utilization efficiency based on green production and resources synergy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 369–378. (in Chinese)
- [41] 路昌, 耿昊, 刘蕊, 等. 山东省耕地多功能耦合协调度时空格局分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 265–274.
LU Chang, GENG Hao, LIU Rui, et al. Spatial-temporal pattern analysis of cultivated land multi functional coupling coordination degree in Shandong Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 265–274. (in Chinese)
- [42] 王国重, 李中原, 张继宇, 等. 小流域水沙污协同治理协调度分析——以伊河源区为例[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023; 1–12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail1142.1675.t.20230227.1626.002.html>.
WANG Guozhong, LI Zhongyuan, ZHANG Jiyu, et al. Analysis of synergistic control level for water resources, sediment and pollution in small watershed: a case of the source region in Yi River[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023; 1–12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail1142.1675.t.20230227.1626.002.html>. (in Chinese)
- [43] 余敬, 姚书振. 资源型城市可持续发展模糊综合评价模型[J]. 科技进步与对策, 2001(12): 70–71.
YU Jing, YAO Shuzhen. Fuzzy comprehensive evaluation model of sustainable development of resource-based cities[J]. Scientific and Technological Progress and Countermeasures, 2001(12): 70–71. (in Chinese)
- [44] 吴书悦, 杨阳, 黄显峰. 水资源管理“三条红线”控制指标体系研究[J]. 水资源保护, 2014, 30(5): 81–85.
WU Shuyue, YANG Yang, HUANG Xianfeng. Research on “Three red lines” control index system of water resources management[J]. Water Conservation, 2014, 30(5): 81–85. (in Chinese)
- [45] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1100–1114.
WANG Cheng, TANG Ning. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality[J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1100–1114. (in Chinese)
- [46] WANG S L, JIANG Z Q, TANG Z Y, et al. Evaluation of an inflow forecast correction method based on multi-scenarios division[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129162.