

无定河流域土壤保持服务供需关系及服务流模拟

王玉丹¹, 李晶¹, 周自翔², 王一达¹

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2.西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要: 土壤保持服务是生态系统服务中调节服务的一项重要内容, 无定河流域水土流失严重, 土壤保持服务成为其首要的生态系统服务。利用 SWAT 模型和 GIS 对无定河流域土壤保持服务供需平衡和空间流动路径进行探究分析, 揭示无定河流域土壤保持服务供需空间匹配特征及其空间流转机制。结果表明: (1) 无定河流域土壤保持服务供给量与需求量变化趋势具有较强的一致性, 两者都呈波动上升的趋势, 均与降水具有较强的相互对应关系。其中, 2001 年 8 月、2013 年 7 月、2017 年 7 月供给量及需求量达到了 2000—2020 年所有月份中的较大值, 供给量均超过 2.5×10^8 t, 需求量则均超过了 3.5×10^8 t。相应地, 月均降水量在这 3 个月也达到了较大值。(2) 2000—2020 年无定河流域亏损月份多于盈余月份, 且亏损量呈增加趋势。中上游地区为盈余状态, 供略大于需, 中下游地区表现为亏损, 且需远大于供; (3) 对减沙服务空间流动路径模拟, 在此基础上获取了各子流域减沙服务流量及受益量。2000—2020 年流域内减沙服务流量波动性增多, 尤其 2020 年在下游地区增长明显; 减沙服务受益量在流域内具有累加效益, 研究期间总体呈上升趋势。研究结果为流域水土流失治理提供新的视角, 对生态修复和水土流失防治政策制定具有重要参考价值。

关键词: 无定河流域; SWAT 模型; 土壤保持服务流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0138-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.020

Simulation and Analysis of Supply, Demand and Flow of Soil Conservation Service in the Wuding River Basin, China

WANG Yudan¹, LI Jing¹, ZHOU Zixiang², WANG Yida¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119;

2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054)

Abstract: Soil and water loss is serious in the Wuding River Basin, so soil conservation service becomes the primary ecosystem service. Based on SWAT model and GIS, the balance between supply and demand of soil conservation service and spatial flow path were analyzed to reveal the spatial matching characteristics and spatial flow mechanism of soil conservation service in the Wuding River Basin. The results showed that there was a strong consistency between the supply and the demand of soil conservation service in the Wuding River Basin, and both of them showed a trend of fluctuant increase and had a strong correlation with precipitation. The supply and demand in August 2001, July 2013 and July 2017 reached the larger value in all the months from 2000 to 2020, with the supply exceeding 2.5×10^8 t and demand exceeding 3.5×10^8 t. Correspondingly, the monthly average precipitation also reached a large value in these three months. From 2000 to 2020, the deficit months were more than the surplus months, and the deficit was increasing. The middle and upper reaches were in surplus, with the supply slightly greater than the demand, while the middle and lower reaches were in deficit, with the demand far greater than the supply. The spatial flow path of sediment reduction service was simulated. On this basis, the flow and benefit of sediment reduction service in each subbasin were obtained. The fluctuation of sediment reduction service flow increased from 2000 to 2020, especially in the downstream area in 2020. The benefit of sediment reduction service had accumulative benefit in the basin and showed an increasing trend during the study period. The results could provide a new perspective for the con-

收稿日期: 2021-10-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071285); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-382); 研究生创新基金项目(2021CSLY014)

第一作者: 王玉丹(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤保持服务研究。E-mail: wangyd0216@163.com

通信作者: 李晶(1977—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: lijing@snnu.edu.cn

trol of soil erosion in watershed, and have important reference value for ecological restoration and policy making of soil and water loss control.

Keywords: Wuding River Basin; SWAT model; soil conservation service flow

生态系统服务指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效应^[1]。目前,对于生态系统服务的研究多从自然角度出发进行静态研究,以生物物理区域或行政区划作为生态系统边界,忽视了系统的开放性和景观单元的空间异质性导致的生态系统服务供需错位现象^[2]。生态系统服务流能够在供给区与需求区之间建立空间联系^[3],是生态系统服务管理的前提^[4]。

土壤保持服务为自然生态防止水土流失和保持泥沙的能力,能够防治土壤流失、保育土壤生产肥力,为调节服务中的重要内容,也是土壤健康、植被固碳、水质净化等功能的重要保障,研究土壤保持服务供需匹配及其服务流能够为防治水土流失提供新视角。生态系统服务潜在供给为生态系统长期持续提供的服务且不以人的意志为转移,土壤保持服务潜在供给即为生态系统服务的控制侵蚀和拦截泥沙的能力^[5];生态系统服务潜在需求则包括人类社会已获取和人类希望获取但受条件限制而未能获取的生态系统服务^[6],而土壤保持服务的相关研究则对潜在需求没有进行明确的定义。目前,对于土壤保持服务供需匹配关系开展了较多研究^[7-9],但对于土壤保持服务流的模拟研究则较少。肖玉等^[10]将生态系统服务流分为原位、全向和定向服务流3种类型;李双成等^[11]将其分为供给移动服务流和使用移动服务流。对于土壤保持服务,上游地区生态系统防治土壤流失能为下游提供侵蚀调控服务,此为沿水系进行自然传输的定向服务流^[12]。Zheng等^[13]尝试通过Dinf算法来模拟土壤保持服务空间流动路径,并对供给区与需求区进行甄别;王勇智^[14]、梁丽丽^[15]利用SPANs(service path attribution networks)模型对土壤保持服务空间流动路径进行模拟,但在对土壤保持服务流流量模拟时是从输沙量角度来研究,以输沙量的减少程度来研究对下游地区提供土壤保持服务的增加程度。

无定河流域位于黄土高原与毛乌素沙地过渡带,暴雨集中在夏季,水土流失严重,生态环境具有波动性和脆弱性。鉴于此,本文将土壤保持服务作为研究对象,基于SWAT(soil and water assessment tool)分布式水文模型,对无定河流域土壤保持服务供需时空变化进行分析,并从供给移动服务流角度出发,对土壤保持服务中基于“土壤侵蚀—运移—沉积”过程的定向服务流—减沙服务流进行模拟与探究,揭示其

空间流转机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

无定河流域位于黄土高原中部,跨陕西省、内蒙古自治区两省,发源于陕西省白于山北麓,流域面积30 261 km²,海拔为566~1 824 m,总体呈西北高、东南低的趋势。流域地处半湿润、半干旱地区交界带,为温带大陆性季风气候,雨热同期,夏秋季的集中降雨及黄土土质疏松易受降水侵蚀的特性成为无定河流域土壤侵蚀严重的重要影响因素。流域西北部为毛乌素沙地南缘,属于风沙区,分布有流动、固定沙丘,植被稀疏,风蚀剧烈;东南部为黄土丘陵沟壑区,人类活动频繁,以农耕地为主,垦殖指数高,为泥沙的主要来源区。受恶劣的自然条件和强烈的人类活动影响,水土流失严重,土壤侵蚀速率是黄土高原地区最高的,年输沙量占黄河下游输沙量的14.3%。严重的土壤侵蚀、脆弱的生态环境成为制约无定河流域的经济、社会可持续发展的关键问题之一。

1.2 数据来源

SWAT模型模拟的基础数据包括:无定河流域四、五级水系图(中国科学院资源与环境数据中心所, <https://www.resdc.cn/>)、DEM数字高程数据(JAXA全球ALOS—30 m地形数据, <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>)、土地利用(中国科学院资源与环境数据中心,30 m分辨率, <https://www.resdc.cn/>)、世界土壤数据(harmonized world soil database,HWSD,1:100万)、气象数据(国家气象科学数据中心, <http://data.cma.cn>)和水文数据(黄河水利委员会, <http://www.yrcc.gov.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 SWAT模型构建 SWAT模型由美国农业部(USDA)开发,用于流域尺度水质与水量模拟,并对水质与水量受土地利用、土地管理等的影响情况进行定量分析和预测。本文根据无定河流域的地形、地貌、气候、水系等特点设定子流域最小面积阈值为40 000 hm²,把无定河流域划分为45个子流域,并利用土地利用类型、土壤数据、地形坡度等进行水文响应单元(HRU)分析,再输入逐日尺度气象数据库并由模型根据流域特征自动构建、模拟。

(1)SWAT模型算法。SWAT模型可以模拟流

域内部多种地理过程。本文的主要研究内容为无定河流域土壤保持服务,通过 SWAT 模型得到无定河流域产沙量,在算法部分将 SWAT 模型的土壤侵蚀模拟算法作为重点。

SWAT 模型使用通用土壤侵蚀方程 MUSLE (modified universal soil loss equation) 计算泥沙量,其计算公式为:

$$SED_a = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG$$

式中: SED_a 为土壤侵蚀量 (t); Q_{surf} 为地表径流量 (mm/h); q_{peak} 为洪峰流量 (m^3/s); A_{hru} 为水文响应单元的面积 (hm^2); K 为土壤侵蚀因子 (无量纲); C 为植被覆盖和管理因子 (无量纲); LS 为地形影响因子 (无量纲); P 为保持措施因子 (无量纲); $CFRG$ 为粗碎屑系数 (无量纲)。

(2) 基于 SWAT 模型的率定与验证。利用 Arc-SWAT 对无定河流域作水文模拟后,使用 SWAT—CUP (SWAT—calibration and uncertainty programs) 对径流、泥沙进行率定与验证。根据前人^[16-17]研究及无定河流域的实际情况,最终选取 27 个调径流参数 (表 1 中仅体现 $P < 0.5$ 的 18 个) 与 7 个调泥沙参数敏感性参数 (表 1)。

基于白家川水文站的月径流量与月泥沙量,利用 SWAT—CUP 并根据“先径流,后泥沙”的原则,对无定河流域 2008—2013 年径流量与 2008—2018 年泥沙量进行率定与验证,选用决定系数 (correlation coefficient, R^2) 和 NS 系数 (nash—sutcliffe efficiency) 对结果进行适用性评价。当 $R^2 > 0.6$ 且 $NS > 0.5$ 时认为模拟结果可用。由图 1 可知,对于径流量,2008—2010 年为率定期, $R^2 = 0.7$, $NS = 0.64$, 2011—2013 年为验证期, $R^2 =$

0.78, $NS = 0.7$; 由图 2 可知,对于泥沙量,2008—2013 年为率定期, $R^2 = 0.67$, $NS = 0.51$, 2014—2018 年为验证期, $R^2 = 0.74$, $NS = 0.72$ 。

表 1 模型敏感性参数

调参对象	序号	参数名称	参数定义	T	P
径流	1	CN2	SCS 径流曲线系数	-4.258	0
	2	SFTMP	降雪温度	2.521	0.019
	3	SMTMP	融雪基温	-2.506	0.020
	4	TLAPS	气温直减率	2.108	0.047
	5	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	-1.612	0.121
	6	TIMP	积雪温度滞后因子	1.517	0.144
	7	ALPHA_BNK	主河道调蓄系数	1.465	0.157
	8	GW_DELAY	地下水延迟天数	-1.403	0.174
	9	CH_N2	主河道曼宁系数	-1.101	0.283
	10	SOL_Z	土壤底部埋深	1.071	0.295
	11	SURLAG	地表径流滞后系数	-1.048	0.306
	12	SOL_BD	表层土壤容重	-1.008	0.324
	13	ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.986	0.335
	14	SOL_AWC	土壤有效含水量	0.936	0.359
	15	SOL_K	土壤饱和导水率	0.932	0.361
	16	SLSUBBSN	平均坡长	0.911	0.372
	17	BLAI	潜在叶面积指数	0.704	0.488
	18	CANMX	最大冠层截留量	0.703	0.489
泥沙	1	USLE_C	植被覆盖因子的最小值	1.411	0.168
	2	CH_COV2	河道覆盖因子	1.112	0.317
	3	SPCON	产沙转移线性补偿系数	-0.810	0.455
	4	HRU_SLP	坡度因子/平均坡度	0.654	0.542
	5	CH_COV1	河道易蚀性因子	-0.507	0.633
	6	LAT_SED	侧向流与地下径流中的含沙量	-0.124	0.906
	7	SPEXP	产沙转移指数系数	0.077	0.942

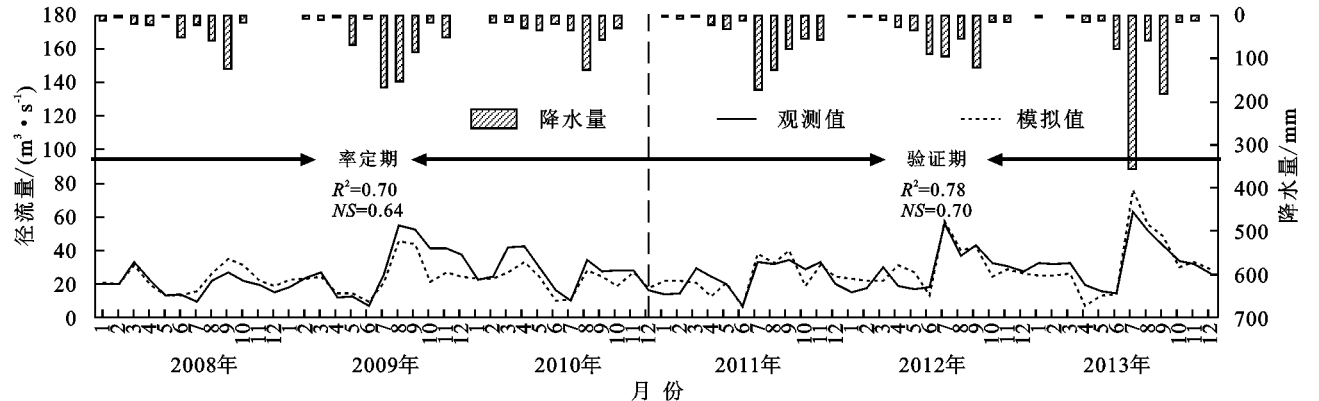


图 1 逐月径流量率定期与验证期的模拟值与观测值对比

1.3.2 土壤保持服务供需模拟

(1) 土壤保持服务供给模拟。本文中土壤保持服务的供给量为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差,计算公式为:

$$As = SED_p - SED_a = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times$$

$A_{hru})^{0.56} \times K \times LS \times CFRG \times (1 - C \times P)$ 式中: A_s 为土壤保持服务供给量 (t); SED_p 为潜在土壤侵蚀量 (t); SED_a 为实际土壤侵蚀量 (t)。SWAT 模型可以直接模拟得到实际土壤侵蚀量,但无法直接获取潜在土壤侵蚀量,因此将 SWAT 模型源代码

中的 C 因子和 P 因子修改为 1, 模拟出假设不存在植被覆盖和保持措施下的侵蚀量, 则为潜在土壤侵蚀量。

(2) 土壤保持服务需求模拟。由于目前研究没有对土壤保持服务潜在需求进行明确定义, 因此, 将土壤保持服务潜在需求定义为不考虑技术、成本和可达

性等限制因素、潜在土壤侵蚀量与通过土壤保持措施适宜分布区的布设获得的最小侵蚀模数之差, 即将潜在土壤侵蚀量与最小可能土壤侵蚀模数之差作为土壤保持服务需求量。最小可能土壤侵蚀模数为某一地区容纳最大适宜水土保持措施量时的土壤侵蚀模数^[18]。

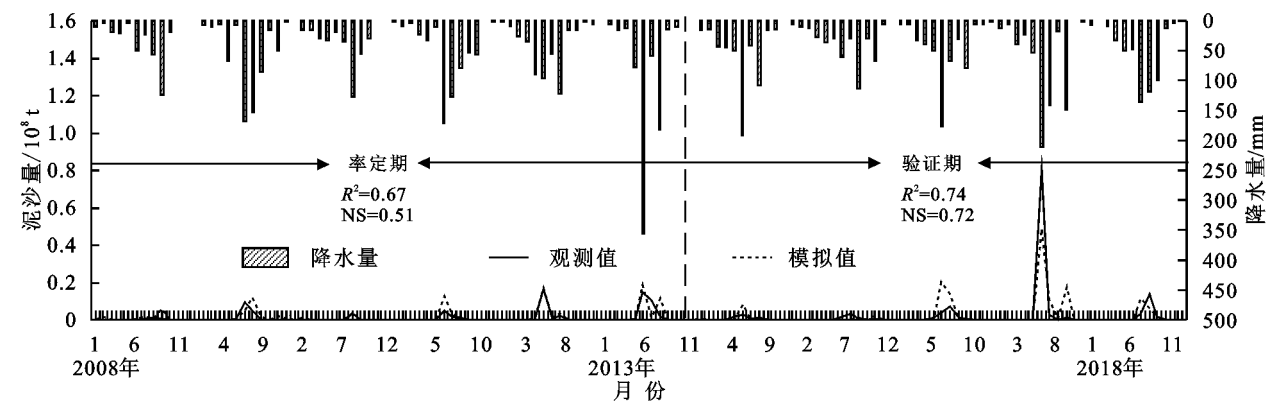


图 2 逐月泥沙量率定期与验证期的模拟值与观测值对比

根据中国水利部发布的《土壤侵蚀分类标准》(SL190—2007)^[19], 黄土高原容许土壤流失量为 1 000 t/(km² · a), 但这一值于 2007 年针对西北黄土高原这一大面积区域提出, 时效性较差, 且对于无定河流域来说区域适用性较小。因此, 拟采用 Gao 等^[18]布设不同土壤保持措施适宜分布区的方法, 并考虑到无定河流域位于半湿润半干旱地区交界处, 西北部为毛乌素沙地过渡带, 生态环境脆弱, 在水土保持措施布设方法基础上修改布设的优先级, 将草地设为最优先的地位, 建立了相应的土地利用类型, 得到 2000—2020 年无定河流域最小侵蚀模数, 求得无定河流域月平均最小侵蚀模数为 45 t/(km² · 月)。

因此, 土壤保持服务需求量具体计算公式为:

$$A_d = A_p - 45$$

式中: A_d 为土壤保持服务需求量(t); A_p 为潜在土壤侵蚀量(t)。

(3) 土壤保持服务盈亏量。为进一步分析土壤保持服务供需关系, 使用土壤保持服务盈亏量来做进一步探究, 即土壤保持服务供给量与需求量之差。计算公式为:

$$A_w = A_s - A_d$$

式中: A_w 即土壤保持服务盈亏量(t); A_s 为土壤保持服务供给量(t); A_d 为土壤保持服务需求量(t)。当 $A_w > 0$, 则子流域土壤保持服务为盈余, 当 $A_w < 0$, 则为亏损; 当 $A_w = 0$, 则子流域的土壤保持服务为盈亏绝对平衡状态。

1.3.3 土壤保持服务空间流动模型 减沙服务是基于“土壤侵蚀—运移—沉积”过程的定向服务流, 因此

以减沙服务量为无定河流域土壤保持服务流的研究对象。

(1) 减沙服务流动模型。使用 Tarboton^[20]提出的多流量模型 Dinf 算法来模拟土壤保持服务流动路径。在 3 像元×3 像元窗口中, 中心栅格单元与周围 8 个栅格单元形成三角形中的最大坡度为该栅格单元坡度, 以该三角形的坡向为流向, 且当前栅格单元流经的水流方向能够确定 2 个下游栅格单元。

(2) 减沙服务流量及受益分析。减沙服务流量计算公式为:

$$F_a = SED_d \times (1 - \exp(-\frac{surlag}{t_{conc}}))$$

式中: F_a 为第 a 个子流域中减沙服务流量(t); SED_d 为步长时间内减沙服务量(t); $surlag$ 为地表径流滞后系数(无量纲); t_{conc} 为汇流时间(h)。 $1 - \exp(-\frac{surlag}{t_{conc}})$ 表示任意一天可进入河段的总有效减沙服务量所占的分数。

b 号子流域减沙服务受益值为与其连通的上游各子流域减沙服务总流量与 b 号子流域减沙服务量之和, 计算公式为:

$$Y_b = \sum F_a + F_b$$

式中: Y_b 为第 b 个子流域减沙服务受益值(t); $\sum F_a$ 为与子流域 b 相连通的所有上游子流域减沙服务流量的累计值(t); F_b 为第 b 个子流域中减沙服务量(t)。

2 结果与分析

2.1 土壤保持服务供需时空变化分析

由图 3 可知, 2000—2020 年无定河流域土壤保

持服务供给量与需求量变化趋势具有较强的一致性,且两者总体上都呈波动上升的趋势,而在 2000—2020 年降水量也大体呈上升趋势,黄土高原降水集中多为暴雨是影响水土流失的重要因素^[21],降水量的增加导致土壤侵蚀强度增加,土壤侵蚀潜力也随之增加,表现出高供给高需求的情况。此外,整体上无定河流域土壤保持服务需求量大于供给量,且供给与需求均主要集中在每年的 6—9 月,与降雨量较多的月份相对吻合。其中,2001 年 8 月、2013 年 7 月、

2017 年 7 月供给量及需求量达到了 2000—2020 年所有月份中的较大值,供给量均超过 2.5×10^8 t,分别为 2.92×10^8 , 2.85×10^8 , 3.14×10^8 t,而这 3 个月的需求量则均超过了 3.5×10^8 t,分别为 3.55×10^8 , 3.59×10^8 , 3.87×10^8 t。相应地,月均降水量在这 3 个月也达到了较大值,分别为 213,209,180 mm。无定河流域土壤保持服务对降水情况尤其是夏季强降雨情况反映迅速,具有较强的相互对应关系,进一步说明降水是影响无定河流域土壤保持服务的决定性因素。

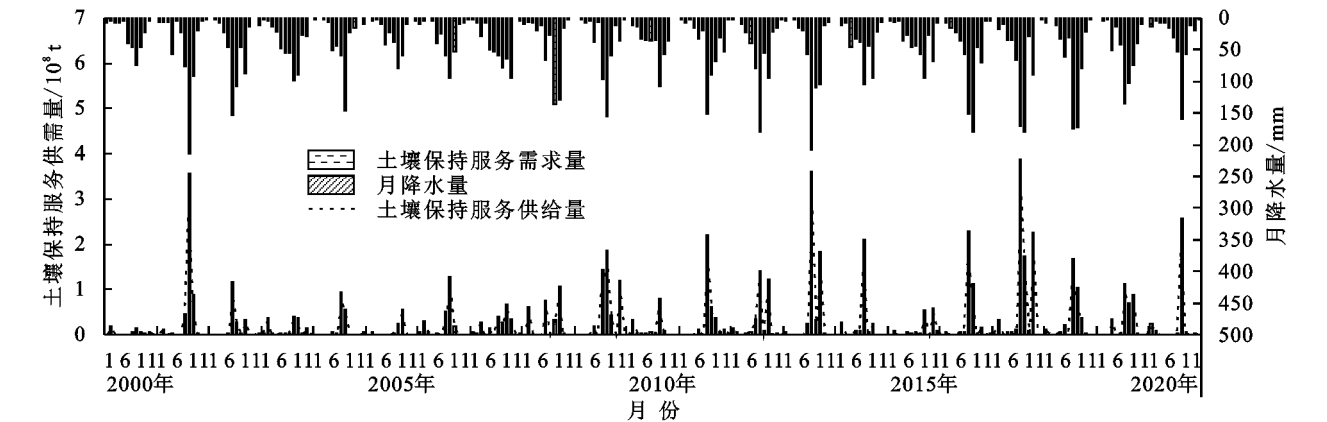


图 3 2000—2020 年无定河流域月土壤保持服务供需量与降水量

空间上,为研究无定河流域土壤保持服务空间分布规律,选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年绘制空间分布图,由图 4 可知,整体上无定河流域的土壤保持服务供给量与需求量的空间分布格局相对具有一致性,具有明显的空间分异规律,均呈西北低、东南高的分布特点,且在 2000—2020 年均呈波动上升趋势。而在我国,降水量空间分布特点为东南向西北逐渐递减,与无定河流域内土壤保持服务供需量空间分布特点相符。在研究期间内,无定河中上游地区供给量与需求量相对较稳定,常年低于 500 t/km^2 。这部分区域以草地为主要土地利用类型,且降水少,大部分区域位于内蒙古自治区,地广人稀,侵蚀潜力小,潜在侵蚀量与实际侵蚀量均小,供给量与需求量较少。而中下游地区供给量与需求量上升趋势明显,这些地区以耕地为土地利用类型,降水量大,潜在侵蚀量与实际侵蚀量较多,供给量与需求量均高。到 2020 年,39,42,43 号子流域供给量与需求量均超过了 $60\,000\text{ t/km}^2$,表明 39,42,43 号子流域在研究期间表现出了较大的不稳定性,2020 年耕地面积占比分别高达 97.35%,98.48%,89.36%,且子流域面积小,单位面积土壤保持服务供给量与需求量显著增高。

2.2 土壤保持服务盈亏时空变化分析

为了凸显无定河流域土壤保持服务的供需情况,本文使用盈亏量来表征土壤保持服务的供需关系。

由图 5 可知,无定河流域土壤保持服务 2000—2020 年间盈余的月份较少,共有 107 个,占研究期的 42%,且盈余量小,均低于 9×10^4 t;而占研究期 58% 的 145 个月份表现为亏损状态,亏损量大且呈波动性增加趋势,其中亏损量较大的月份主要集中在 7—9 月,这进一步体现出在无定河流域降水量尤其是强降雨对于土壤保持服务的盈亏量起着绝对性的作用。

由图 4 可知,空间上,无定河流域土壤保持服务盈余的区域主要为中上游地区,表现为盈余区域的同时盈余量较少,均低于 500 t/km^2 。这表明这些区域土壤保持服务的供需基本保持平衡,供略大于需。在 2000—2020 年间中上游地区实际土地利用类型以草地为主,尽管在 2020 年耕地、裸地、城市用地面积比 2000 年有所增加,但土地利用类型总体上变化不大,且坡度以 5° 以下为主,不易形成地表径流,侵蚀强度较低,因此多为盈余区域的同时盈余量少。无定河流域中下游地区则表现为亏损,2000—2020 年亏损量大且整体为亏损加重趋势,较大面积亏损区域亏损量达到 500 t/km^2 以上。除了其位于半湿润地区降水量相对较多雨水冲刷量大外,这些地区坡度主要为 15° 以上,易受侵蚀,且城市用地扩张、植被占地面积降低导致土壤可侵蚀性增加,土壤实际侵蚀量随之增加。

2.3 土壤保持服务空间流动模拟

减沙服务流量及受益值结果见图 4。服务流

的箭头指向为减沙服务在无定河流域各子流域内的流动路径,而符号的粗细则表示流的大小。无定河流域内减沙服务流的流动路径与河网水系具有较高的一致性,2000—2020 年期间流量波动性增多,尤其 2020 年在下游地区增长明显。以研究期内流量变化

较大的 39 号子流域为例(图 6),研究期内 39 号子流域减沙服务流流量呈波动上升趋势。表明自 2000 年黄土高原地区实施退耕还林还草措施以来,无定河流域保沙能力提升,产沙量减少,生态系统提供的减沙服务逐步增多。

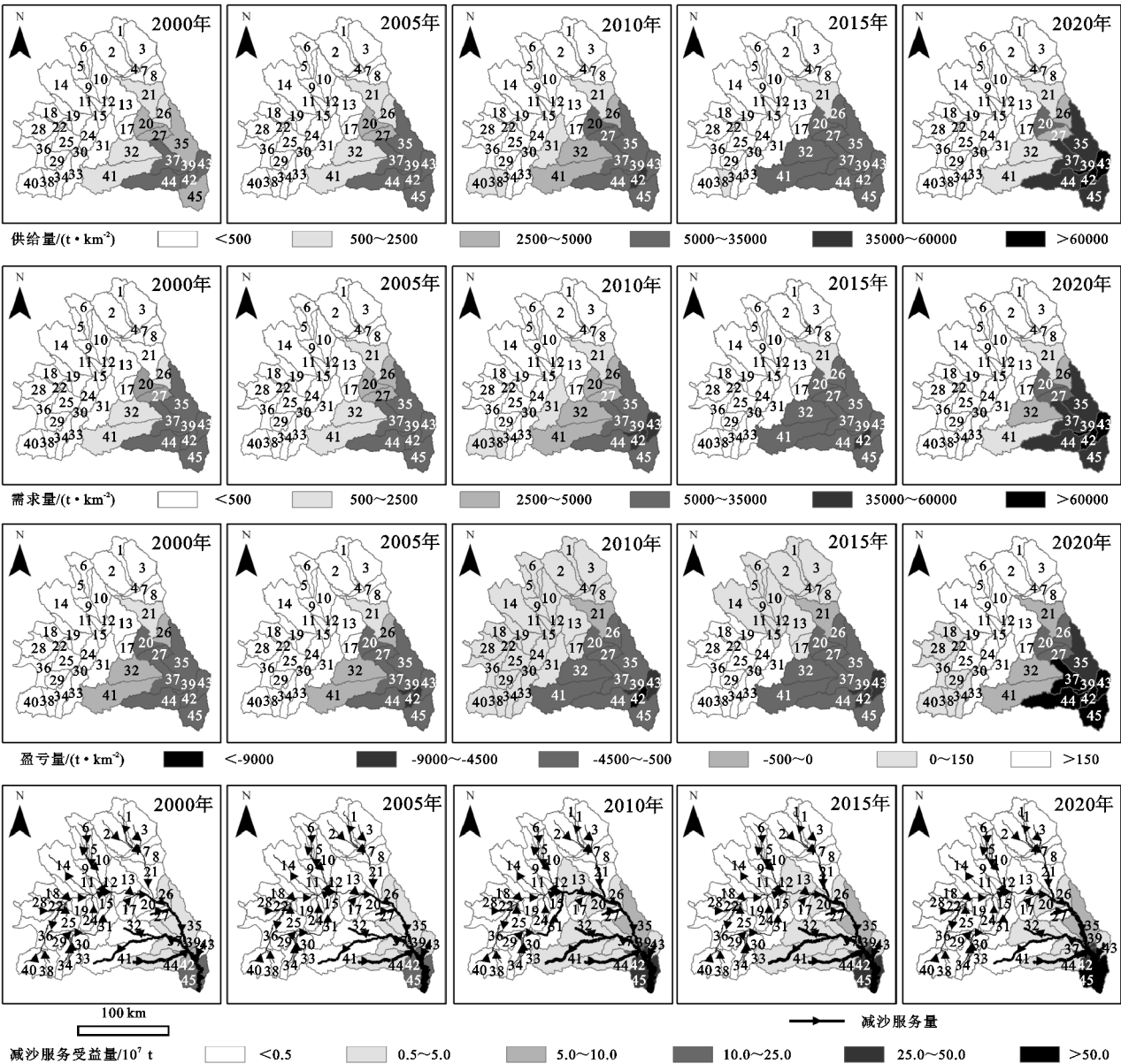


图 4 无定河流域水土保持服务供给量、需求量、盈亏量、受益量时空分布

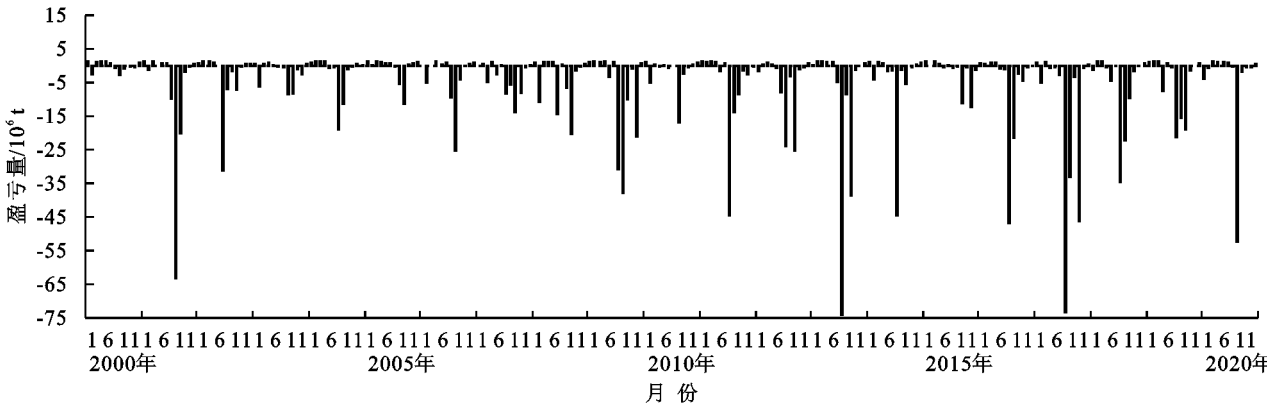
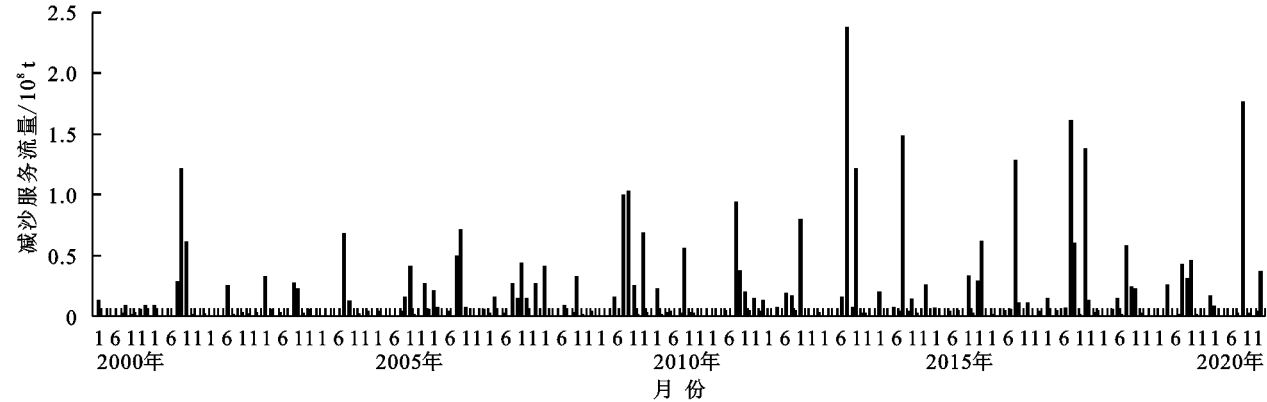


图 5 2000—2020 年无定河流域水土保持服务月盈亏量

生态系统通过植被根系保育土壤,通过截留、吸收、下渗作用降低降水和径流对土地的冲刷力从而能够减少泥沙。当上游子流域泥沙量减少时能够减少径流中携带的泥沙量,从而为下游地区提供减沙服务,此传输过程具有累加效应。因此减沙服务受益量在传输过程中不受子流域的盈亏所影响,子流域的受益值包括其自身和与其联通的上游子流域减沙服务的总量。

鉴于此,选取 3 号子流域、21 号子流域和 45 号

子流域作对比。3 号子流域为无定河流域的边缘子流域,其不与上游连通,受益值为自身减沙服务的值,研究期内年均受益值为 $6.75 \times 10^4 \text{ t}$;21 号子流域与 1,2,3,4,7,8 号这 6 个子流域连通,其受益值为自身减沙服务的值与这 6 个子流域产生的减沙服务受益量之和,研究期内 21 号子流域年均受益值达到 $3.98 \times 10^6 \text{ t}$;而作为无定河流域出水口的 45 号子流域,在经过 1~44 号子流域减沙服务受益量的累加后,其最终的年受益值为 $8.44 \times 10^8 \text{ t}$ 。



注:以 39 号子流域为例。

图 6 无定河流域逐月减沙服务流量变化

3 讨论

土壤保持服务是生态系统调节服务之一,能够抑制侵蚀产沙和调控泥沙传输从而减少对当地和下游带来的负面生态效应。土壤保持服务流通过模拟生态系统阻滞泥沙传输路径,明确服务的供给区与受益区,量化供给与需求的空间失耦程度,建立起流域上中下游之间的空间联系,将上中下游视为一个整体,为流域水土流失综合治理和生态修复提供参考。土壤保持服务与人类福祉密切相关,未来应该关注土壤保持服务与人类福祉的关系,建立两者之间的互馈机制,进一步促进水土流失防治政策的科学制定。

本文在对土壤保持服务需求量化时,重构水土保持措施适宜分布区得到最小土壤侵蚀模数,避免了将实际侵蚀量直接作为土壤保持需求量所存在的问题^[22]。从供给移动服务流角度对减沙服务流进行模拟,一定程度解决了以输沙量减少程度作为服务供给量所导致的土壤保持服务与输沙产沙危害两者的概念冲突问题。路径模拟方法上选取多流量 Dinf 算法来模拟,根据李宗梅等^[23]的研究,Dinf 算法提取水系的质量高于常用的单向流 D8 算法,对 D8 算法易产生的“平行”伪河道问题进行了改进。

使用 SWAT 水文模型模拟时存在不确定性的问题。SWAT 模型能够基于物理过程较好地对水文过程进行长期连续模拟,特别是对月尺度水文过程模

拟,但黄土高原地区河流泥沙通常由汛期的短历时高强度暴雨造成,对其水土流失具有决定性影响^[24]。无定河流域径流量与泥沙量对单日降雨量反映迅速,在 SWAT 模型中不能较好地体现。此外,已有研究^[25]发现,SWAT 模型对夏季汛期径流量模拟较好,对于 3—4 月的春汛或降雨较少的枯水期模拟效果则较差,这与 SWAT 模型在国内其他干旱半干旱地区应用结果一致,径流量枯水期模拟结果或进一步影响泥沙模拟的效果。

对无定河流域土壤保持服务的研究是以 SWAT 模型中使用的 MUSLE 模型所得结果为基础的,其为水力侵蚀模型。无定河流域土壤侵蚀模式以水力侵蚀为主,约 1/6 的输沙量是由风力作用产生的^[26],由风蚀造成的土壤侵蚀在本研究中没有考虑。

4 结论

(1)无定河流域土壤保持服务供给与需求量变化趋势具有较强一致性,二者呈波动上升趋势,均与降水具有较强的相互对应关系。亏损量大的月份集中在夏季,故应关注汛期降水和极端降水对土壤保持服务带来的影响。

(2)无定河流域土壤保持服务盈亏量化识别出供需错配的关键区域。中上游地区整体较稳定,供给略大于需求,盈余量低于 500 t/km^2 ,中下游地区明显不稳定,研究期间亏损量增大且需求远大于供给,大

多数子流域亏损量达到 500 t/km² 以上。故应对无定河流域中下游地区布设针对性的水土保持措施。

(3)无定河流域内减沙服务流动路径与河网水系具有较高的一致性,研究期内流量波动性增多。减沙服务流将服务供给区与受益区联系在一起,突出水土流失治理的流域整体性,可以为生态补偿、土地利用管理提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems [M].Washington D C, USA: Island Press,1997, 12:3-6.
- [2] 陈登帅,李晶,张渝萌,等.延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究[J].生态学报,2020,40(1):112-122.
- [3] Zhang C, Li J, Zhou Z X, et al. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China [J].Ecological Indicators,2021,120:e106974.
- [4] 易丹,肖善才,韩逸,等.生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建[J].应用生态学报,2021,32(11): 3942-3952.
- [5] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.
- [6] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery [J]. Ecological Complexity,2013,15:114-121.
- [7] 杨丽雯,王大勇,王勇智,等.涑水河流域土壤保持服务供需关系量化评估[J].资源科学,2020,42(12):2451-2462.
- [8] 徐彩仙,巩杰,燕玲玲,等.甘肃白龙江流域土壤保持服务供需风险时空变化[J].生态学杂志,2021,40(5): 1397-1408.
- [9] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].地理学报,2019,74(9): 1921-1937.
- [10] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J].生态学报,2016,36(10): 3096-3102.
- [11] 李双成.生态系统服务地理学[M].北京:科学出版社,2014.
- [12] 赵文武,刘月,冯强,等.人地系统耦合框架下的生态系统服务[J].地理科学进展,2018,37(1):139-151.
- [13] Zheng T, Zhou Z X, Zou Y F, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and spatial flow process of soil conservation service in Jinghe Basin of China [J].Sustainability,2021,13(4):1794-1794.
- [14] 王勇智.基于服务路径属性网络模型的土壤保持服务空间流动模拟[D].山西 临汾:山西师范大学,2019.
- [15] 梁丽丽.基于 SPANs 模型土壤保持服务和洪水调控服务供给、需求和服务流的量化评估与制图[D].山西 临汾:山西师范大学,2018.
- [16] 郭姗姗.基于 SWAT 模型的细河流域土壤侵蚀研究 [D].辽宁 大连:辽宁师范大学,2019.
- [17] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等.基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J].环境科学,2021,42 (6):2769-2777.
- [18] Gao H D, Li Z B, Jia L L, et al. Capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree [J].Journal of Geographical Sciences,2016, 26(4):457-472.
- [19] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [20] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models [J].Water Resources Research,1997,33 (2):309-319.
- [21] Bai J Z, Zhou Z X, Zou Y F, et al. Watershed drought and ecosystem services: Spatiotemporal characteristics and gray relational analysis [J].International Journal of Geoinformation,2021,10(2):1-21.
- [22] 刘宇,赵亮.基于过程—效应—功能—服务级联机制的森林减沙服务传输研究[J].长江流域资源与环境, 2019,28(4):883-892.
- [23] 李宗梅,魏锦旺,满旺,等.基于 D8 算法和 Dinf 算法的水系提取研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(5): 42-45.
- [24] 赵阳,刘冰,张晓明,等.极端降雨条件下黄河典型流域水沙变化特性研究[J].泥沙研究,2020,45(6):47-52.
- [25] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等.基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J].干旱区资源与环境,2015,29 (6):139-144.
- [26] 师长兴.风力侵蚀对无定河流域产沙作用定量分析[J].地理研究,2006,25(2):285-293.