

# 保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀影响的 SWAT 模拟

王 斌<sup>1</sup>, 杨兴华<sup>1</sup>, 张秀芳<sup>2</sup>, 樊林生<sup>3</sup>, 黄金柏<sup>4</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院; 2. 黑龙江农业工程职业学院水利与建筑工程学院;  
3. 黑龙江省农村水利水电保障中心; 4. 扬州大学水利科学与工程学院)

**摘要:**为在区域尺度评估保护性耕作对东北黑土区土壤侵蚀的阻控效果,构建了黑龙江省呼兰河流域的 SWAT,设置 8 种模拟情景研究了免少耕播种、秸秆还田、深松及其技术组合对旱田土壤侵蚀的影响。结果表明:SWAT 在率定期和验证期对径流与输沙的模拟效果良好,流量纳什效率系数分别为 0.90 和 0.97,百分比偏差分别为 9.59% 和 -12.63%;输沙量纳什效率系数分别为 0.75 和 0.64,百分比偏差分别为 -0.63% 和 -15.43%;5—9 月作物全生育期内,旱田土壤侵蚀量先增大后减小,7 月和 8 月土壤侵蚀量较大,5 月较小;在阻控旱田土壤侵蚀效果方面,秸秆还田最佳,免少耕播种次之,深松欠佳,且深松在 4 月、5 月和 9 月加剧了土壤侵蚀。因此,保护性耕作宜优先采用秸秆还田技术,其次为免少耕播种技术;多种技术集成时,推荐秸秆还田与免少耕播种技术组合。

**关键词:**保护性耕作;旱田土壤侵蚀;SWAT;呼兰河流域

**SWAT-based simulation of impact of conservation tillage on soil erosion in rainfed cropland of the Hulan River Basin**//Wang Bin<sup>1</sup>, Yang Xinghua<sup>1</sup>, Zhang Xiufang<sup>2</sup>, Fan Linsheng<sup>3</sup>, Huang Jinbai<sup>4</sup>(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University; 2. Department of Hydraulic and Architectural Engineering, Heilongjiang Agricultural Engineering Vocational College; 3. Heilongjiang Province Rural Water Conservancy and Hydropower Security Center; 4. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University)

**Abstract:** To evaluate the effectiveness of conservation tillage in mitigating soil erosion at a regional scale in the black soil zone of Northeast China, a SWAT model was developed for the Hulan River Basin in Heilongjiang Province. Eight simulation scenarios were designed to investigate the effects of none/reduced tillage seeding, straw returning, subsoiling and their combinations on rainfed cropland soil erosion. The results indicate that the SWAT model performs well in simulating runoff and sediment yield during both the calibration and validation periods. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) values for runoff were 0.90 and 0.97, with percentage bias (PBIAS) values of 9.59% and -12.63% during the calibration and validation periods, respectively. The NSE values for sediment yield were 0.75 and 0.64, with PBIAS values of -0.63% and -15.43% during the calibration and validation periods, respectively. During the crop growing season from May to September, the soil erosion in rainfed cropland first increased and then decreased, with higher erosion in July and August and lower erosion in May. In terms of erosion control effectiveness, straw returning showed the best performance, followed by none/reduced tillage seeding, whereas subsoiling was less effective and even intensified soil erosion in April, May and September. Therefore, straw returning is recommended as the priority conservation tillage practice, followed by none/reduced tillage seeding. When multiple practices are integrated, the combination of straw returning and none/reduced tillage seeding is recommended.

**Key words:** conservation tillage; rainfed cropland soil erosion; SWAT; the Hulan River Basin

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,黑龙江省处于东北黑土区的核心地带,粮食生产能力尤为突出。截至 2025 年,黑龙江省粮食总产量已连续 16 年居全国首位。然而,受自然和人为等因素综合影响,东北黑土区正面临黑土层厚度下降和土壤

质量退化的问题,已对作物产量和国家粮食安全构成威胁<sup>[1]</sup>。动态监测结果显示,东北黑土区 70% 的水土流失发生在耕地上,不仅导致黑土层变薄,还使黑土肥力下降;此外,黑土地 70% 以上的侵蚀沟发育于耕地中,且呈现加剧发展态势,不仅切割和蚕食

耕地、阻碍机械化耕作,还会加剧土壤流失,危害粮食生产<sup>[2]</sup>。因此,采取切实有效的黑土地保护措施,对于保护黑龙江省乃至东北黑土区的土地资源、维持该地区的粮食生产能力,具有重大现实意义。

土壤侵蚀与水土流失是水土保持领域中使用频率较高且至关重要的术语,但对这两个术语的界定与区分尚未达成广泛共识。综合多位学者观点<sup>[3-5]</sup>,土壤侵蚀一般是指在自然力和人类活动的共同作用下,陆地表面的土壤及其他地表物质遭受破坏并发生迁移的过程;而水土流失通常是指在自然力的作用下,水资源(包括水中溶解的各种物质)和土地资源(包括尚未发育成土壤的其他物质)被搬运到一定区域边界之外的过程。本文的土壤侵蚀模拟是指在流域水文循环的陆面阶段,对因土壤侵蚀产生的泥沙及其向水体迁移过程的模拟。具体而言,是指利用 SWAT(soil water assessment tool)模拟子流域内因土壤侵蚀产生的泥沙以及这些泥沙向子流域主河道输送的过程。其中,土壤侵蚀量主要指子流域内水文响应单元(hydrologic response unit, HRU)因侵蚀产生的泥沙数量。

保护性耕作是以免少耕播种、秸秆还田、深松等为主要技术内容的耕作体系,具有防治农田扬尘和水土流失、蓄水保墒、培肥地力等多重作用<sup>[6]</sup>。因此,保护性耕作是减少土壤侵蚀、阻控土壤水分与养分流失、促进农业可持续生产的重要措施<sup>[7-8]</sup>。土壤侵蚀与水土流失都是与不同空间尺度紧密联系的复杂过程<sup>[9-10]</sup>,然而目前关于保护性耕作对农田土壤侵蚀影响的研究,大多停留在径流小区和田间小区的试验层面<sup>[11-13]</sup>。虽然这些小尺度试验为研究土壤侵蚀积累了丰富资料,但现实中各种技术难以在大范围内同时实施,因此仅依据小区试验结果,尚难以定量评估保护性耕作对区域农田土壤侵蚀的阻控效果。盲目增加试验小区的数量或扩大试验区面积,无疑会大幅增加人力、物力和财力投入。相对而言,综合考虑地形、土壤类型、土地利用方式和气候条件等因素的水文模型,能够在田间、坡地、子流域、流域等不同空间尺度模拟土壤侵蚀及水土流失过程<sup>[14-16]</sup>。

本文在呼兰河流域设置了8种保护性耕作模拟情景,通过运用 SWAT 模拟流域各 HRU 内旱田的土壤侵蚀过程,研究不同保护性耕作技术对旱田土壤侵蚀的影响,定量评估大规模实施保护性耕作技术对土壤侵蚀的阻控效果,旨在为东北黑土区制定高效的黑土地保护策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 流域概况

呼兰河是松花江左岸的一级支流,整体水系位

于黑龙江省中部,地理范围介于 45°47'N~48°08'N、125°23'E~128°44'E 之间。流域上游的东北部和东部地势较高,主要由山地和丘陵组成,植被以落叶林、针叶林和混交林为主。中下游的西部和西南部为地势平坦的农业区,该区域的农田面积约占流域总面积的 65%左右,是黑龙江省开发较早的农业带,主要种植玉米、水稻和大豆。呼兰河流域属于温带大陆性季风气候,多年平均气温为 2.5℃,多年平均降水量为 565.5 mm。流域冬季寒冷漫长,降雪期和积雪期主要集中在 11 月至次年 3 月,融雪期则在 3—4 月。

### 1.2 土壤侵蚀量计算方法

在水文循环的陆面阶段,SWAT 能够模拟每个子流域内水流、泥沙等向主河道的输入过程;在水文循环的汇流阶段,SWAT 能够模拟河网中水流、泥沙等向流域出口的运移过程<sup>[17]</sup>。SWAT 采用修正的通用土壤流失方程(modified universal soil loss equation, MUSLE)计算土壤侵蚀量(产沙量)<sup>[18]</sup>。

### 1.3 数据来源

DEM 来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m×30 m,主要用于提取流域、识别河网等。以兰西水文站(46°15'N, 126°21'E)为出口提取的呼兰河流域面积为 27 873 km<sup>2</sup>,其地形与水文和气象站点分布等情况见图 1。

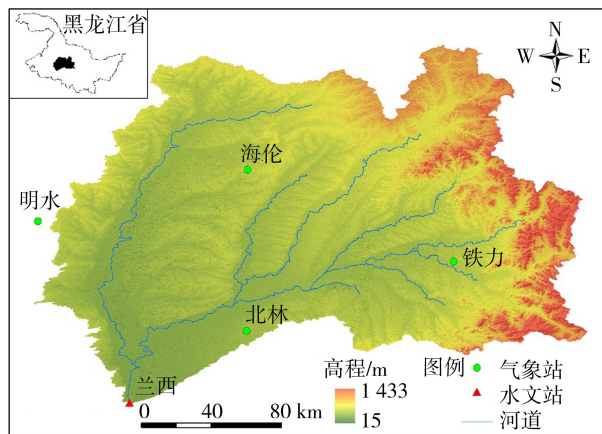


图 1 呼兰河流域地形与水文和气象站点分布

土地覆盖数据来源于中国科学院空天信息创新研究院刘良云团队的 1985 年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0<sup>[19]</sup>,重分类后呼兰河流域共有 10 种土地覆盖类型,其中旱田、落叶林、稻田、城镇分别占流域总面积的 61.9%、31.0%、4.1%、1.7%,其他类型占比共计 1.3%。

土壤数据来源于联合国粮食与农业组织(FAO)的世界和谐土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)<sup>[20]</sup>。呼兰河流域共有 16 种

HWSD 土壤类型,其中 7 种黑土合计占流域总面积的 74.8%,筒育淋溶土占 19.0%,其他类型土壤占比共计 6.2%。建模所用的土壤容重、饱和导水率等采用 SPAW(soil plant air water)模型<sup>[21]</sup>计算。

气象数据涵盖了呼兰河流域内及周边的海伦、明水、北林、铁力 4 个气象站的逐日气象信息,下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。逐日的降水量、平均流量、平均含沙量数据摘自《中华人民共和国水文年鉴》第 1 卷第 3 册。需要说明的是,呼兰河流域内监测含沙量的水文站数量较少,且各站开始监测含沙量的时间并不一致,特别是每年的 11 月至次年 3 月,各站均会暂停含沙量监测。因此,本文仅采用兰西水文站 1971—1985 年(1981 年数据缺失)4—10 月的平均含沙量数据。秸秆还田量通过作物产量和秸秆系数估算,其中作物产量数据来源于《黑龙江统计年鉴》,秸秆系数参考文献<sup>[22]</sup>确定。

#### 1.4 情景设置

综合考虑呼兰河流域的土地覆盖、土壤类型以及水文站的空间分布情况,并依据《黑龙江省水土保持条例》中关于禁止开垦 15°以上坡地用于种植作物的规定,把 15°作为划分缓坡和陡坡的临界坡度阈值,将呼兰河流域划分为 17 个子流域和 150 个 HRU。由于呼兰河流域内稻田面积占比较小,且稻田主要集中于呼兰河水系干流和支流沿岸的平原地带,加之稻田的格田地势平坦,因此暂不考虑稻田的土壤侵蚀问题。旱田在呼兰河流域的分布最广泛,其面积超过流域总面积的 60%,是农业活动对流域扰动最大的区域,因此研究保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀的影响在东北黑土区具有代表性。

玉米和大豆轮作是呼兰河流域旱田的主要种植模式,目前流域内采用的保护性耕作技术主要有免少耕播种、秸秆还田、深松等。基于这些技术措施,设置了 8 种保护性耕作技术组合情景如表 1 所示,其中情景 S1 作为对照。通过对比分析不同情景下的土壤侵蚀量,评估保护性耕作技术在减少土壤侵蚀方面的效果。设置模拟情景具体方法为:①通过

表 1 呼兰河流域旱田保护性耕作技术组合情景

情景	免少耕播种	秸秆还田	深松
S1	否	否	否
S2	否	否	是
S3	否	是	否
S4	否	是	是
S5	是	否	否
S6	是	否	是
S7	是	是	否
S8	是	是	是

设置耕作深度、耕作效率、农机具类型等参数,在 SWAT 的 HRU 内实现常规播种、免少耕播种等管理;②依据作物产量和秸秆系数估算秸秆还田量,继而通过编辑 HRU 参数实现秸秆还田管理;③通过设置耕作深度、耕作效率以及农机具类型等参数,在 HRU 实现作物收获后的深松作业管理,且每隔 3 a 深松 1 次。

#### 1.5 模型率定与评价

鉴于呼兰河流域旱作物的全生育期主要集中在 5—9 月,以及含沙量数据存在缺测等原因,本文在月尺度上采用 SWAT 模拟陆面土壤侵蚀和河道输沙过程,并将 4—10 月作为统计分析旱田土壤侵蚀的时段。在模拟过程中,取 1964—1967 年为模型预热期,1968—1981 年为模型率定期,1982—1985 年为模型验证期。参考 SWAT 相关文档<sup>[17]</sup>,依据呼兰河及周边流域的 SWAT 参数率定经验<sup>[23-25]</sup>,确定了与流量、产沙量和输沙量模拟相关的参数,并采用 SWAT-CUP(calibration uncertainty programs)中的 SUFI-2 算法对这些参数进行率定。

为全面评价 SWAT 的模拟效果,采用纳什效率系数(NSE)和百分比偏差两项指标进行评价。NSE 越接近 1,表明模型的模拟精度越高;百分比偏差越接近 0,表明模型的模拟值与实测值偏差越小。NSE 对洪峰段赋予了更高的权重,忽视平水期或枯水期的拟合情况,而百分比偏差可以评价模型在水量平衡方面的表现,能弥补 NSE 的不足。

## 2 结果与分析

### 2.1 流量与输沙量模拟结果验证

呼兰河流域流量和输沙量模拟时 SWAT 参数率定结果见表 2,表中各参数已按敏感性从高到低进行了排序, $t$  统计量和  $P$  值为参数敏感性评价指标。其中, $t$  统计量用于量化参数的敏感程度,其绝对值越大,表明参数对 SWAT 模拟的影响力越强; $P$  值用于判断参数敏感性的显著性,其值越接近 0,意味着该参数的敏感性越显著。将这些参数输入到情景 S1 后,在率定期和验证期,SWAT 模拟流量的 NSE 分别为 0.90 和 0.97,百分比偏差分别为 9.59%和-12.63%;SWAT 模拟侵蚀量的 NSE 分别为 0.75 和 0.64,百分比偏差分别为 -0.63%和 -15.43%。

兰西水文站流量和输沙量 SWAT 模拟结果与该站实测数据的对比见图 2,可以看出,在模型的率定期和验证期,SWAT 对兰西水文站流量和输沙量的模拟结果与实测数据的变化趋势基本一致,流量和输沙量的峰值均出现在相同月份,并且变化趋势

表 2 呼兰河流域流量和输沙量模拟时 SWAT 参数率定结果

参数符号	参数名称	参数值	t 统计量	P 值
USLE_P	USLE 的水土保持措施因子	0.02	-25.47	<0.01
DEP_IMP	不透水层深度	1566.14 mm	14.61	<0.01
ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.94	-11.49	<0.01
CANMX	最大冠层截留容量	12.88 mm	9.86	<0.01
CH_K2	主河道冲积层有效导水率	410.06 mm/h	-5.74	<0.01
LAT_SED	侧向流和地下径流的含沙量	1310.86 mg/L	-3.13	<0.01
ADJ_PKR	洪峰流量校正因子	1.36	2.75	0.01
CH_N2	主河道曼宁糙率系数	0.24	2.22	0.03
ALPHA_BF	基流 $\alpha$ 因子	0.72	2.22	0.03
SPCON	输沙方程系数	<0.01	-1.89	0.06
ALPHA_BNK	河岸蓄量的基流 $\alpha$ 因子	0.33	-1.69	0.09
SURLAG	地表径流延迟时间	18.21	1.56	0.12
SNO50COV	50%积雪覆盖时的雪水占 SNOCOVMX 的比例	0.62	-1.53	0.13
EPCO	植被吸收补偿因子	0.75	1.43	0.15
SNOCOVMX	100%积雪覆盖时的雪深阈值	89.94 mm	-1.30	0.19
CH_COV2	河岸覆盖因子	0.65	-0.85	0.39
GW_DELAY	地下水延迟时间	144.20 d	0.82	0.41
SFTMP	降雪临界气温	2.19℃	-0.70	0.48
SMTMP	融雪基温	1.35℃	-0.65	0.52
SMFMX	年内最大融雪速率	6.57 mm/(℃·d)	0.63	0.53
SMFMN	年内最小融雪速率	0.71 mm/(℃·d)	0.41	0.68
TIMP	积雪温度延迟因子	0.21	-0.40	0.69
CH_COV1	河道侵蚀因子	0.42	0.15	0.88
SPEXP	输沙方程指数	1.36	-0.01	0.99

注:参数值均保留到小数点后两位,其中 SPCON 的率定值为 0.0022。

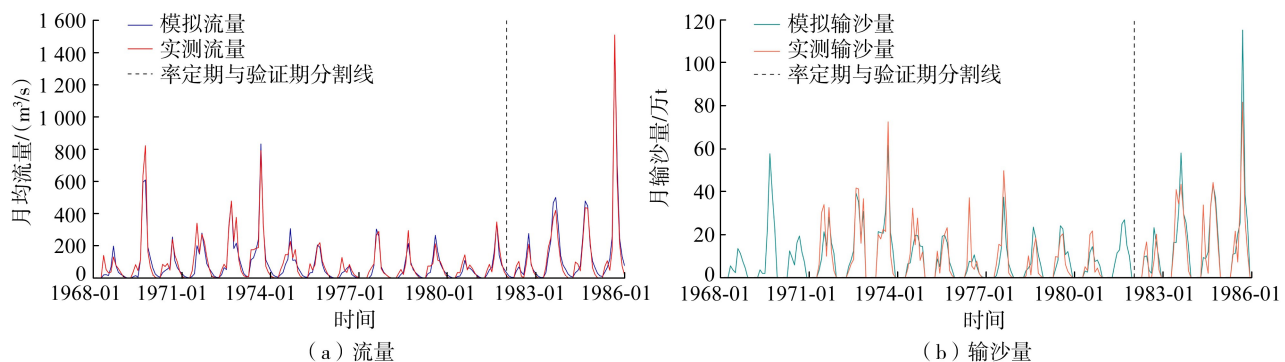


图 2 兰西水文站流量和输沙量的 SWAT 模拟结果

能保持同步。此外,对比流量和输沙量的模拟评价指标可以发现,SWAT 对流量的模拟精度高于输沙量,其可能原因是:①SWAT 计算产沙量的 MUSLE 在很大程度上依赖于经验公式,未能充分考虑复杂的物理过程;②泥沙颗粒的物理特性在 SWAT 中经过了高度概化<sup>[17]</sup>,导致这些特性无法得到精确反映;③侵蚀物从侵蚀地点向河道输送的过程,以及泥沙在河道内悬浮、沉积、输移等过程,比水流的物理过程更加复杂多变,增加了精准模拟的难度。尽管如此,SWAT 模拟的径流与泥沙过程能够较好地反映呼兰河流域的径流与泥沙特征。

将情景 S1 下校核的参数应用于其他情景,即可利用 SWAT 模拟不同情景下呼兰河流域的土壤侵蚀过程。进一步提取各情景下全流域 1968—1985 年早田 HRU 逐月的产沙量数据,并汇总为早

田土壤侵蚀量,作为对比分析不同情景的基础数据。

## 2.2 保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀量的影响

情景 S1 下 4—10 月旱田土壤侵蚀量分别为 3.21 万、3.46 万、6.32 万、11.93 万、14.58 万、6.51 万、4.27 万 t,即 4—10 月各情景的土壤侵蚀量普遍呈现出先增大后减小的趋势,从高到低的排序为 8 月、7 月、9 月、6 月、10 月、5 月、4 月。其中,8 月的土壤侵蚀量达到峰值,而 4 月土壤侵蚀量最小,7 月和 8 月的侵蚀量占该时段总侵蚀量的 52.7%,8 月的侵蚀量为 4 月的 4.54 倍。其他情景的土壤侵蚀量的时程分布特征与情景 S1 相近,7 月和 8 月的侵蚀量占该时段内总侵蚀量的 52.3%~53.0%,8 月的侵蚀量为 4 月的 4.3~4.7 倍。

表 3 为与情景 S1 相比,不同保护性耕作技术组

表3 保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀的阻控效果

情景	减少的月均土壤侵蚀量/t							
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	累计
S2	-719.06	-17.65	50.19	202.00	44.36	-2.28	3.59	-438.85
S3	76.11	72.65	1428.14	3303.19	3346.31	576.66	217.63	9020.69
S4	-791.41	41.18	948.30	2567.02	3328.67	607.09	198.06	6898.91
S5	823.71	1811.87	367.30	84.30	206.37	-33.51	6.53	3266.57
S6	85.02	1262.70	549.94	-15.11	215.56	-84.49	8.20	2021.82
S7	911.56	1998.66	1598.94	3087.13	3729.61	532.72	216.44	12075.06
S8	-27.77	1451.97	1295.72	2478.70	3094.13	546.89	211.37	9051.01

注:负值表示增加的土壤侵蚀量。下同。

合情景减少旱田土壤侵蚀的效果。由表3可见,免少耕播种技术(情景S5)在9月加剧了土壤侵蚀,但在其他月份有助于减少土壤侵蚀量;秸秆还田技术(情景S3)在各月均能有效减少土壤侵蚀量;深松技术(情景S2)在6—8月能够降低土壤侵蚀量,但在4月、5月和9月加剧了土壤侵蚀。具体来看,免少耕播种技术在5月表现最佳,4月、6月和8月表现较好,4月、5月对土壤侵蚀的阻控效果在3种技术中表现最好;秸秆还田技术在7月和8月表现相当,均能对土壤侵蚀起到很好的阻控作用,6月、9月和10月也能有效减少土壤侵蚀量,6—10月对土壤侵蚀的阻控效果在3种技术中表现最佳;深松技术在6—8月对土壤侵蚀具有阻控效果,其中在7月的表现好于免少耕播种技术。在阻控土壤侵蚀量方面,秸秆还田技术效果最好,其次是免少耕播种技术,而深松技术效果相对较差。综合来看,相较于对照情景S1,情景S7、S8、S3和S4在阻控呼兰河流域旱田各月土壤侵蚀的效果明显优于情景S5、S6和S2,这4种情景对土壤侵蚀的阻控效果在7月和8月尤为突出。然而,情景S3和S4对5月土壤侵蚀的阻控作用很小。此外,情景S3和情景S8对4月土壤侵蚀的阻控作用不明显,而情景S5和S6则在5月显示出对土壤侵蚀的阻控作用。值得注意的是,情景S2和S4在4月加剧了土壤侵蚀,尤其是情景S2,是唯一总体表现出加剧土壤侵蚀的情景。

### 2.3 保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀总量的影响

呼兰河流域在情景S1~S8下旱田土壤累计侵蚀量分别为905.28万、906.07万、889.04万、892.86万、899.40万、901.64万、883.54万、888.99万t,其中,情景S7的土壤侵蚀量最少,而情景S2的土壤侵蚀量最大。表4为保护性耕作技术组合情景对呼兰河流域旱田土壤侵蚀总量的影响。由表4可见,免少耕播种技术能够有效减少土壤侵蚀量,其中单独采用免少耕播种技术的情景S5,比不采用任何保护性耕作技术的对照情景S1减少了5.9万t的土壤侵蚀量。同样,秸秆还田技术也能够

明显减少土壤侵蚀量。与对照情景S1相比,单独采用秸秆还田技术的情景S3减少了16.2万t的土壤侵蚀量。然而,从情景模拟结果看,无论是单独应用,还是与秸秆还田及免少耕播种技术相结合,深松技术都加剧了土壤侵蚀。采用深松技术的情景S2、S4、S6、S8的土壤侵蚀量,均高于不采用深松技术的情景S1、S3、S5、S7。

表4 保护性耕作对呼兰河流域旱田土壤侵蚀总量的影响

保护性耕作技术	情景对比	减少的土壤侵蚀量/万t
免少耕播种	S1与S5(无)	5.9
	S2与S6(深松)	4.4
	S3与S7(秸秆还田)	5.5
	S4与S8(秸秆还田、深松)	3.9
秸秆还田	S1与S3(无)	16.2
	S2与S4(深松)	13.2
	S5与S7(免少耕播种)	15.9
	S6与S8(免少耕播种、深松)	12.7
深松	S1与S2(无)	-0.8
	S3与S4(秸秆还田)	-3.8
	S5与S6(免少耕播种)	-2.2
	S7与S8(免少耕播种、秸秆还田)	-5.4

注:减少的土壤侵蚀量是指3种保护性耕作技术中,当其中两种技术的实施情况相同时,第三种技术(即第一列内容)单独作用所减少的土壤侵蚀量。括号中内容为两种模拟情景均实施的技术。

综合各情景的模拟结果可以看出,由于深松技术未能达到减少土壤侵蚀量的作用效果,导致3种技术集成应用的情景S8并非阻控土壤侵蚀的最佳模式,而耦合免少耕播种技术与秸秆还田技术的情景S7对土壤侵蚀的阻控效果最好。从实践应用的角度看,如果仅采用一种保护性耕作技术,应优先选择秸秆还田技术,其次为免少耕播种技术。如果采用两种技术集成,则建议应用秸秆还田技术和免少耕播种技术(情景S7)。尽管3种技术综合应用的情景S8阻控土壤侵蚀的效果位居第二,但与仅采用秸秆还田技术的情景S3相比,情景S8减少的土壤侵蚀量有限,且深松作业额外增加了成本,并不具备明显优势。

### 3 讨论

综合呼兰河流域连续18年的旱田土壤侵蚀过

程的模拟结果可以发现:秸秆还田技术对旱田土壤侵蚀的阻控效果最明显,其次是免少耕播种技术,而深松技术对土壤侵蚀的影响最小,甚至会加剧土壤侵蚀。产生这些现象的原因可能是:秸秆还田能够减轻雨滴对地表的冲击,延长了降水的入渗时间,增加了土壤的孔隙度,从而改善了土壤结构。同时,秸秆还田还能增加地表粗糙度,减缓地表径流速度,有效拦截流失的土壤。免少耕播种技术减少了对土壤的扰动,增加了土壤透气性和微生物的数量及活性,有助于土壤中具有黏结作用的有机质积累,促进土壤形成了较稳定的团聚体结构,从而保护了土壤结构层,增加了土壤抗侵蚀能力。深松技术加剧土壤侵蚀的原因可能是该技术对土壤的扰动导致土壤颗粒间的结构变得更加松散,并在耕作层形成了垂直方向的松土沟壑,改变了田间水流的方向和速度,从而降低了土壤的抗冲刷能力,使得土壤更易受到侵蚀。

呼兰河流域旱田土壤侵蚀量在8种模拟情景下的月变化特征表现为:从4月开始逐渐增大,8月达到峰值,之后逐渐减小。4月和5月是呼兰河流域备耕和播种的关键时期,农民在旱田从事整地、播种等农事活动,不可避免地扰动土壤,使土壤更容易受到侵蚀。免少耕播种技术能够有效减少或避免传统播种过程中翻耕、起垄等作业对土壤的扰动和冲击,从而增强了土壤的抗蚀能力,这也是情景S5在4月和5月对土壤侵蚀阻控效果较好的原因。7月和8月汛期到来后,降雨变得频繁,土壤侵蚀量随雨水的冲刷而大幅增加,先前实施的保护性耕作技术对土壤侵蚀的阻控作用更多体现在长期累积效应上。因此,7月和8月是保护性耕作大量减少侵蚀的重要阶段。在9月和10月的收获季节,大部分作物已经成熟并被收割,此时土壤表面相对稳定,降雨及地表径流对土壤的冲刷作用也相应减弱。因此,在这一时期实施保护性耕作,但相较于其他月份效果较小。

为充分发挥免少耕播种和秸秆还田技术在阻控旱田土壤侵蚀方面的优势,并减少深松技术对土壤侵蚀的不利影响,在呼兰河流域旱田实施保护性耕作时,优先推荐耦合应用免少耕播种技术和秸秆还田技术。这两种技术对土壤侵蚀的阻控效果分别在4—5月和6—10月表现最佳,两者结合能够有效覆盖呼兰河流域旱作物的全生育期。鉴于深松技术可能对土壤侵蚀产生的负面影响,建议在秋季收获后实施秸秆还田,并尽量采用覆盖或浅翻碎混方式,避免翻埋方式还田,以减少机械在深耕翻埋秸秆时对土壤的扰动。此外,在实施深松或秸秆翻埋还田后,应适时采取耙地、整平等措施,以消除土壤表面的不平整和不均匀性,降低土壤侵蚀的发生风险。

## 4 结 论

a. SWAT在模拟呼兰河流域的流量和输沙量时表现良好。在率定期和验证期,SWAT模拟流量的NSE分别为0.90和0.97,百分比偏差分别为9.59和-12.63%;模拟输沙量的NSE分别为0.75和0.64,百分比偏差分别为-0.63%和-15.43%。

b. 在作物全生育期的5—9月,各情景下呼兰河流域旱田土壤侵蚀量均呈现先增大后减小的变化趋势,其中7月和8月的土壤侵蚀量较大,而5月的土壤侵蚀量较小。

c. 在阻控旱田土壤侵蚀方面,秸秆还田效果最佳,免少耕播种次之,而深松表现欠佳,尤其是在4月、5月和9月,深松技术加剧了土壤侵蚀。

d. 在应用保护性耕作技术时,如果仅采用一种技术,宜优先选择秸秆还田技术,其次为免少耕播种技术;如果采用多种技术集成,宜应用免少耕播种和秸秆还田技术。

### 参考文献:

- [1] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12. (Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12. (in Chinese))
- [2] 张兴义,胡伟,李建业,等.水土流失防控是黑土地保护的重点[J].科学通报,2024,69(11):1401-1405. (Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11):1401-1405. (in Chinese))
- [3] 张双银.浅谈水土流失与土壤侵蚀[J].水土保持通报,1992,12(4):53-55. (Zhang Shuangyin. A brief discussion on soil and water loss and soil erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 53-55. (in Chinese))
- [4] 夏卫兵.略谈水土流失与土壤侵蚀[J].中国水土保持,1994(4):48-49. (Xia Weibing. Preliminary discussion on soil loss and soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1994(4): 48-49. (in Chinese))
- [5] 宋桂琴.谈水土流失、土壤侵蚀两概念的区别与联系[J].中国水土保持,1997(2):51-53. (Song Guiqin. The differences and connections between the concepts of soil and water loss and soil erosion[J]. Soil and Water Conservation in China, 1997(2): 51-53. (in Chinese))
- [6] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究

- 进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19. (He Jin, Li Hongwen, Chen Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1-19. (in Chinese))
- [7] 陈仕林,蒙炎成,胡钧铭,等. 秸秆覆盖对粉垄蔗田土壤有机碳及 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(2):307-316. (Chen Shilin, Meng Yancheng, Hu Junming, et al. Effects of smash ridging on soil organic carbon and CO<sub>2</sub> emissions in straw mulching sugarcane field[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(2):307-316. (in Chinese))
- [8] 孟祥玲. 农业技术推广对农业经济增长的贡献分析[J]. 中国集体经济, 2024(16):21-24. (Meng Xiangling. Analysis of the contribution of agricultural technology extension to agricultural economic growth[J]. China Collective Economy, 2024(16):21-24. (in Chinese))
- [9] 姚文艺,肖培青. 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):73-78. (Yao Wenyi, Xiao Peiqing. Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2):73-78. (in Chinese))
- [10] 倪九派,魏朝富,谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报,2005,25(8):2061-2067. (Ni Jiupai, Wei Chaofu, Xie Deti. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):2061-2067. (in Chinese))
- [11] 魏永霞,李晓丹,胡婷婷. 坡耕地保护性耕作技术模式的保水保土增产效应研究[J]. 东北农业大学学报,2013,44(5):51-55. (Wei Yongxia, Li Xiaodan, Hu Tingting. Soil and water conservation and water-saving and soybean yield increasing effects of different conservation tillage technology modes in slopping farmland[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5):51-55. (in Chinese))
- [12] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等. 黑土区不同耕作措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学,2013,11(3):12-16. (Xu Xiaohong, Sui Yuanyuan, Zhang Yu, et al. Effects of different tillages on the soil and water conservation benefits in Northeast black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(3):12-16. (in Chinese))
- [13] 贺云锋,沈海鸥,张月,等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J]. 水土保持学报,2020,34(6):89-94. (He Yunfeng, Shen Haiou, Zhang Yue, et al. Analysis of soil and water conservation effects of different straw returning patterns in sloping farmland in the Chinese black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6):89-94. (in Chinese))
- [14] 郝韵,于瑞宏,郝瑞英,等. 水力侵蚀预测模型 GeoWEPP 研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):99-105. (HAO Yun, YU Ruihong, HAO Ruiying, et al. Research development on geo-spatial interface for water erosion prediction project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3):99-105. (in Chinese))
- [15] 刘伟,安伟,杨敏,等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大宁河流域产流产沙模拟及土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报,2016,30(4):49-56. (Liu Wei, An Wei, Yang Min, et al. Runoff and sediment yield modeling and soil erosion analysis in Daning River watershed in Three Gorges reservoir region based on SWAT model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4):49-56. (in Chinese))
- [16] 丁建华,邓圆溢,田刚,等. 基于 SWAT 模型的钱塘江流域(杭州段)土壤侵蚀模拟研究[J]. 浙江水利科技,2023,51(4):89-95. (Ding Jianhua, Deng Yuanmi, Tian Gang, et al. SWAT model-based simulation for soil erosion in Qiantang River Basin (Hangzhou section) [J]. Zhejiang Hydraulics, 2023, 51(4):89-95. (in Chinese))
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, 等. SWAT 2009 理论基础[M]. 郑州:黄河水利出版社,2012:145-175.
- [18] Williams J R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor [C]//Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources: Proceedings of the Sediment-Yield Workshop. Washington, D. C.: US Department of Agriculture, 1975:244-252.
- [19] Liu Yunliang, Zhang Xiao. 1985 global 30 m surface coverage fine classification products [DS/OL]. Aerospace Information Research Institute, Chinese academy of Sciences [2024-11-15]. [https://data.casearth.cn/thematic/glc\\_fcs30/95](https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30/95).
- [20] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [DS/OL]. IIASA [2024-11-15]. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>.
- [21] 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(5):1569-1578.
- [22] 王晓玉,薛帅,谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. 中国农业大学学报,2012,17(1):1-8. (Wang Xiaoyu, Xue Shuai, Xie Guanghui. Value-taking for residue factor as a parameter to assess the field residue of field crops [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(1):1-8. (in Chinese))

(下转第 89 页)

- Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3):326-343.
- [17] Rowe R K, RimaL S, Sangam H. Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2):137-151.
- [18] Rowe R K, Abdelaal F B, Islam M Z. Aging of high-density polyethylene geomembranes of three different thicknesses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5):04014005.
- [19] Müller W W, Jakob I, Li C S, et al. Durability of polyolefin geosynthetic drains[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(1):28-42.
- [20] 向锐,雷国元,徐亚,等. 填埋场环境下 HDPE 膜老化特性及其对周边地下水污染风险的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(4):978-986. (Xiang Rui, Lei Guoyuan, Xu Ya, et al. Aging behaviors of HDPE geomembrane in landfill environment and its impact on pollution risk of surrounding groundwater [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4):978-986. (in Chinese))
- [21] 娄本星,崔宏艳,刘慧滢,等. 赵口引黄灌区复合土工膜耐久性研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(11):114-117. (Lou Benxing, Cui Hongyan, Liu Huiying, et al. Durability of composite geomembrane in Zhaokou Yellow River irrigation area[J]. Yellow River, 2022, 44(11):114-117. (in Chinese))
- [22] 林伟岸,张宏伟,詹良通,等. 填埋场斜坡上土工膜受力特性的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12):2268-2275. (Lin Weian, Zhang Hongwei, Zhan Liangtong, et al. Centrifugal model tests on stress characteristics of geomembranes placed on landfill slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12):2268-2275. (in Chinese))
- [23] Lin Hai, Zhang Lingling, Xiong Yuechen. Research on shear strength of needle-punched GCL by simple-shear of composite liner[J]. Engineering Geology, 2018, 244:86-95.
- [24] 施建勇,雷省. 考虑破坏面转移和垃圾坝作用的边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):998-1004. (Shi Jianyong, Lei Sheng. Slope stability analysis method considering transfer of sliding failure surface and influence of engineered berm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6):998-1004. (in Chinese))
- [25] 林海,韩卓韦,施建勇. 土工合成材料界面剪切破坏机理和峰值强度分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7):99-106. (Lin Hai, Han Zhuowei, Shi Jianyong. Interface shear failure mechanisms and peak strength analysis of geosynthetics [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7):99-106. (in Chinese))
- [26] 韩卓韦,林海,施建勇. 不同温度下水化针刺 GCL+GM 复合衬里的剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5):962-967. (Han Zhuowei, Lin Hai, Shi Jianyong. Shear characteristics of hydrated needle-punched GCL + GM composite liners at different temperatures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5):962-967. (in Chinese))
- [27] 侯娟,邢行,徐东,等. 土工膜-土工布界面动力剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2):365-376. (Hou Juan, Xing Xing, Xu Dong, et al. Experimental study on dynamic shear characteristics of a geomembrane-geotextile interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2):365-376. (in Chinese))
- [28] Chao Zhiming, Fowmes G, Mousa A, et al. A new large-scale shear apparatus for testing geosynthetics-soil interfaces incorporating thermal condition [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(5):999-1010.
- [29] Rowe R K, Reinert J, LI Y, et al. The need to consider the service life of all components of a modern MSW landfill liner system [J]. Waste Management, 2023, 161:43-51.
- [30] Xu Gaojie, Shi Jianyong. Effect of UV radiation on shear behaviour between geotextile and geomembrane interface [J]. Geosynthetics International, 2025, 32(3):440-453.
- [31] Abdelaal F B, Solanki R. Effect of geotextile ageing and geomembrane surface roughness on the geomembrane-geotextile interfaces for heap leaching applications [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(1):55-68. (收稿日期:2024-10-29 编辑:俞云利)

(上接第 73 页)

- [23] 王斌,郭帅帅,冯杰,等. 基于 SWAT 的积雪消融对高寒区农田土壤水分影响模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):271-278. (Wang Bin, Guo Shuaishuai, Feng Jie, et al. Simulation on effect of snowmelt on cropland soil moisture within basin in high latitude cold region using SWAT [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):271-278. (in Chinese))
- [24] 张丽娜,孙颖娜,申智鹏,等. DEM 分辨率及气象数据对寒区永翠河小流域径流 SWAT 模拟的影响[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10):19-22. (Zhang Lina, Sun Yingna, Shen Zhipeng, et al. Effect of DEM resolution and meteorological data on runoff SWAT simulation of Yongcui River small watershed in cold region [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10):19-22. (in Chinese))
- [25] 胥鹏君,孙颖娜. 基于 SWAT 模型的西南岔河流域洪水资源利用潜力分析[J]. 吉林水利, 2024(10):67-71. (Xu Pengjun, Sun Yingna. Analysis of flood resource utilization potential in the Southwest Chahe River Basin based on SWAT model [J]. Jilin Water Resources, 2024(10):67-71. (in Chinese)). (收稿日期:2024-12-03 编辑:熊水斌)