网络首发时间：2026-08-28 14:50:21　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2031.Q.20260828.0956.011

第 46 卷第 23 期　　生　态　学　报　　Vol.46,No.23
2026 年 12 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Dec.,2026

DOI: 10.20103/j.stxb.202512293514

张瑛淇,李颖璇,张晓宇,丁蓓蓓,刘晓洁,辛良杰,李保国,陈永.黑土区松花江流域玉米增产和水土保持的协同提升路径模拟评价.生态学报,2026,46(23): - .

Zhang Y Q, Li Y X, Zhang X Y, Ding B B, Liu X J, Xin L J, Li B G, Chen Y.Simulation and evaluation of synergistic enhancement technologies for maize yield and soil and water conservation in the Mollisol regions of the Songhua River Basin.Acta Ecologica Sinica,2026,46(23): - .

黑土区松花江流域玉米增产和水土保持的协同提升路径模拟评价

张瑛淇[1],李颖璇[1],张晓宇[1],丁蓓蓓[1],刘晓洁[2],辛良杰[2],李保国[1],陈　永[1,*]

1 中国农业大学土地科学与技术学院,北京　100193

2 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室,中国科学院地理科学与资源研究所,北京　100101

摘要:松花江流域是我国典型黑土区及重要的粮食主产区,近年来面临着严重的黑土侵蚀退化问题。如何在保障粮食生产的同时有效控制水土流失,是实现黑土地保护性利用亟待解决的关键科学问题。旨在流域尺度上系统评估能够协同提升玉米产量和稳定性以及土壤侵蚀阻控效果的农业管理措施。为此,研究首先构建并率定验证了适用于松花江流域的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型,进而设计了基准情景与多种增产和水土流失阻控集成技术组合情景(合理密植+灌溉、保护性耕作+灌溉及合理密植+保护性耕作+灌溉),系统模拟了不同技术情景对玉米产量、产量稳定性和土壤侵蚀的影响。结果表明,将灌溉分别与密植和保护性耕作两种技术组合后,松花江流域年均玉米单产分别达到 8.5 t/hm^{2}和 8.0 t/hm^2,相较于基准情景分别增加了 40.9%和 33.3%,且均使产量变异系数减少了近 10%。同时,两种组合技术情景也明显减少了流域内的土壤侵蚀量,但需注意的是,合理密植在局部地区可能轻微加剧土壤侵蚀,而保护性耕作则通过增强土壤自身韧性,在全流域范围内均表现出明显减蚀效果。最后,集成三种技术的情景可实现最大化的增产约 41.4%,同时产量稳定性较高,变异系数相对于基准情景降低 9.2%,并且阻控土壤侵蚀约 74.0%。研究结果可为实现黑土地保护与产能协同提升提供理论和技术支撑。

关键词:黑土区;SWAT 模型;玉米产量;产量稳定性;水土流失;农业管理措施

Simulation and evaluation of synergistic enhancement technologies for maize yield and soil and water conservation in the Mollisol regions of the Songhua River Basin

ZHANG Yingqi[1], LI Yingxuan[1], ZHANG Xiaoyu[1], DING Beibei[1], LIU Xiaojie[2], XIN Liangjie[2], LI Baoguo[1], CHEN Yong[1,*]

1 *College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*

2 *Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Ministry of Natural Resources, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

Abstract: The Songhua River Basin is a typical Mollisol grain production region in China. However, it has been facing severe issues of soil erosion and land degradation in recent years. How to effectively control soil and water loss while ensuring grain production is a key scientific problem that urgently needs to be solved for the protective utilization of Mollisols. This study aims to systematically evaluate agricultural management practices that can synergistically enhance maize yield, yield stability, and control soil and water erosion at the watershed scale. To achieve this, the SWAT (Soil and

基金项目:国家重点研发计划(2024YFD1500900);国家自然科学基金项目(42471294)

收稿日期:2025-12-29;

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yongchen@cau.edu.cn

Water Assessment Tool) model for the Songhua River Basin was first constructed, calibrated, and validated. Subsequently, this study designed the baseline scenario and several integrated technology scenarios (high-density planting+irrigation, conservation tillage+irrigation, and high-density planting+conservation tillage+irrigation). And the effects of these different integrated technology scenarios on maize yield, yield stability, and soil erosion were systematically simulated. Results showed that the average annual maize yield in the Songhua River Basin was 6.0 t/hm^2, while the coefficient of variation of yield over multiyear reached 14.0%, with a fluctuation primarily driven by inter-annual climatic variability. For instance, the extreme drought in 2007 led to a substantial decline of 21.8% in maize yield. Furthermore, zones with steeper slopes within the basin faced a higher risk of soil erosion, reaching a maximum of 3.12 t/hm^2. After combining irrigation with high-density planting or conservation tillage, the average annual maize yield reached 8.5 t/hm^2 and 8.0 t/hm^2, representing increases of 40.9% and 33.3% compared to the baseline scenario, respectively. Both scenarios also reduced the coefficient of variation of maize yield by nearly 10%. Meanwhile, these two scenarios also obviously reduced soil erosion; however, it was noted that high-density planting may slightly exacerbate soil erosion in some zones of the Songhua River Basin, whereas conservation tillage demonstrated pronounced soil erosion reduction effects across the entire basin by enhancing the inherent resilience of the soil. Finally, the scenario integrating all three technologies achieved the maximum yield increase of approximately 41.4%, high yield stability with the coefficient of variation reduced by 9.2% relative to the baseline, and controlled soil erosion by approximately 74.0%, representing an environmentally friendly, high-yield, and sustainable agricultural management practice. The above results further demonstrate that irrigation is a pivotal factor in enhancing yield stability and strengthening the resilience of agricultural systems in Mollisol regions. Concurrently, conservation tillage emerges as a cornerstone practice for harmonizing productivity objectives with soil and water erosion control, thereby facilitating the long-term sustainable development of Mollisol regions. The findings of this study can provide theoretical and technical support for achieving the synergistic improvement of Mollisols conservation and productivity.

Key Words: Mollisol region; SWAT; maize yield; yield stability; soil and water loss; agricultural management practices

黑土是重要的优质耕作资源[1—3],我国东北松花江流域作为非常典型的黑土区,粮食产量约占全国总产量的五分之一,为国家的粮食安全做出了突出贡献[4—5]。然而,长期高强度的农业生产已导致该区域面临严峻的黑土侵蚀退化问题。水土流失作为黑土退化的最主要形式,直接导致黑土层变薄,土壤肥力下降,最终削弱耕地的可持续生产力[6—8]。全国第二次土壤侵蚀遥感调查结果显示,东北黑土区水力侵蚀面积高达 5.19 万 km^2,占黑土区总面积的近 25%[9]。研究表明,黑土流失强度与作物产量呈显著负相关关系[10]。在粮食需求持续增长和气候变化背景下[11—12],如何形成以粮食产量与水土保持协同提升为核心的黑土地保护性利用技术体系是黑土区农业可持续发展的重要前提[13]。

典型黑土区松花江流域以种植玉米、大豆和水稻为主,其中玉米通常具有更高的单位面积产量潜力,且适应性强、用途广泛,在松花江流域广泛种植[14—15]。现有研究多集中于探索玉米平均产量提升的单一技术,而对产量稳定性及可能伴随的水土流失代价关注不足[16]。研究表明,近年来东北地区逐步扩张的灌溉农业虽然能提高粮食产量,但也增加了水土流失阻控的压力[17]。同时,降水气候因子也是影响玉米产量的关键因素[18]。例如,极端干旱事件会导致玉米减产 30%以上,其中高密度种植田块的减产情况尤为严重[19—20]。也有研究发现平水年和丰水年的产量稳定性要明显高于枯水年[21]。这表明,在气候波动加剧的背景下,产量稳定性也应成为评估增产技术效果的关键指标[22]。近年来,逐渐推广的保护性耕作通过秸秆覆盖虽然可以有效阻控水蚀和增强土壤的蓄水保墒能力,但玉米增产效果不明显[23]。因此,探索能够兼顾产量提升、效果稳定和低侵蚀风险的农业管理措施,对推动黑土区农业可持续发展具有重要意义。

本研究选取松花江流域这一典型黑土区作为研究区域,重点围绕“不同农业管理技术对农业生产系统的调控机制如何? 如何通过不同调控机制的组合来实现玉米增产稳产与水土流失阻控的协同优化?”等科学问

题展开研究,采用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型进行情景模拟,综合评估多种技术组合情景对玉米增产、稳产以及水土流失阻控的效果及其差异,以期为松花江流域及类似区域黑土地保护与产能协同提升提供科学依据与可行路径。

1　数据来源与研究方法

1.1　研究区概况

研究区松花江流域位于中国东北部,介于东经 119°52′—132°31′,北纬 41°42′—51°38′之间(图 1)。流域东西跨度约 920 km,南北纵距约 1070 km,流域地势特征四周高中间低,总面积约 55.6 万 km^2,行政范围覆盖黑龙江、吉林、辽宁及内蒙古自治区共 28 个市(盟)[24]。流域内水系发达,是我国北方地区十分重要的水资源供给地,为区域农业灌溉提供了坚实的保障。此外,该流域黑土资源丰富,土壤有机质含量高、土质疏松,是非常优质的耕地资源。流域主要农作物包括玉米、大豆和水稻等作物,种植制度为一年一熟制[25]。流域属于北温带季风气候,具有光照充足、夏季雨热同期的显著优势,为农作物生长提供了优越条件,使该区域成为保障国家粮食生产的战略要地[26]。

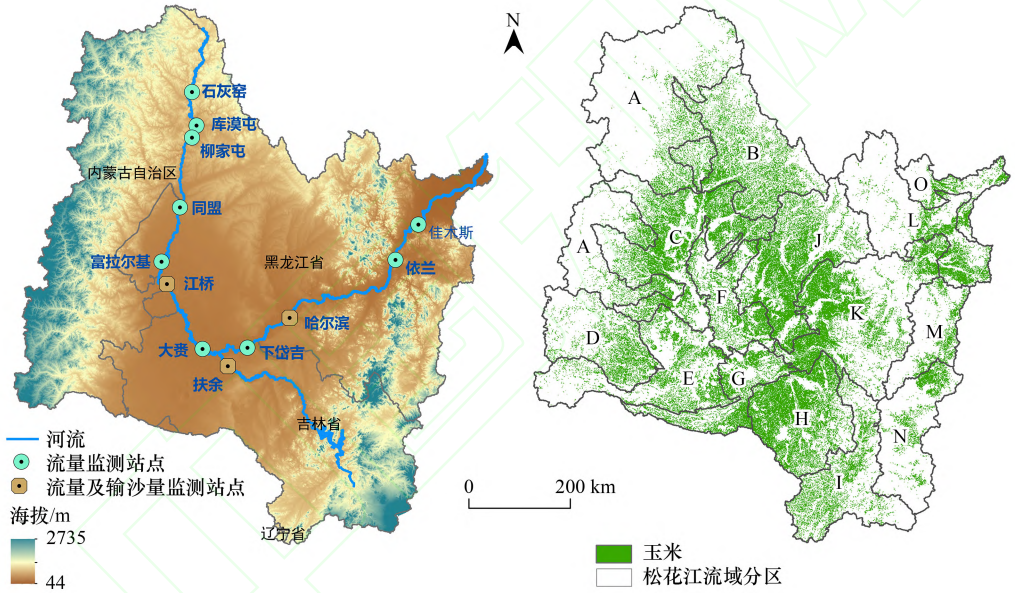

图 1　研究区地理位置及分区

Fig.1　Geographical location of the study area and regional division

A—O:松花江流域进一步划分的 15 个分区 A—O

1.2　模型构建

本研究采用 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型开展情景模拟与综合评估,SWAT 模型凭借其在作物-水文-侵蚀过程的耦合优势,已成为国际上开展流域尺度农业系统综合评估的核心工具,能在流域尺度上灵活模拟多样化的措施情景。构建 SWAT 模型所需的基础数据库主要包括空间数据、时间序列数据以及用于模型率定与验证的数据。空间数据包含数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)、土壤类型、土地利用分布等信息,用于界定流域范围并划分流域内的子流域,以实现空间异质性模拟。时间序列数据主要包括气象数据和农业管理措施,作为模型的主要驱动力,用以模拟水文循环及作物生长等动态过程。用于模型率定与验证的数据,如实测河流流量、泥沙及作物产量数据,是评估模型性能、优化模型参数的关键依据,旨在确保模型能够可靠反映研究区的实际过程。模型构建、率定及验证所需各类数据的详细信息见表 1。

表 1 模型构建、率定及验证所需数据信息及来源

Table 1 Data information and sources for model setup, calibration, and validation

数据类型 Data type		描述 Description	来源 Source
空间数据 Spatial data	数字高程 DEM	SRTMDEM 90M 分辨率原始高程数据	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
	土地利用	空间分辨率为 1 km(2018)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
	土壤	1∶100 万中国土壤矢量图	中国科学院南京土壤研究所
时间数据 Temporal data	农业管理	农作物种植、施肥、收获等管理信息	统计年鉴和文献[27]
	气象数据	日降雨量、最高气温、最低气温、太阳辐射、相对湿度	中国地面气候资料日值数据集(V3.0)
率定数据 Calibration data	径流数据	逐月平均流量(2009—2015)	《中华人民共和国水文年鉴》
	输沙量数据	逐月平均输沙量(2009—2015)	《中华人民共和国水文年鉴》
	玉米产量	地级市尺度(2001—2018)	中国经济社会大数据研究平台(https://data.cnki.net/yearData)

模型构建基于 ArcGIS 10.3 平台下的 ArcSWAT(rev. 664),首先将松花江流域划分为 168 个子流域,并进一步依据土地覆被、土壤类型和坡度数据细分为 4969 个水文响应单元(HRU,Hydrologic Response Unit)。HRU 是模型执行模拟计算的基本单元,在 HRU 尺度上,SWAT 模型模拟的主要水文过程包括冠层截留、入渗、再分配、蒸散发、壤中流、地表径流、回归流等。根据现有的气象数据,本研究选择 Penman-Monteith 方法计算潜在蒸散发(即在土壤水分充足条件下,植被均匀覆盖区域的蒸散发速率),采用 Muskingum 方法进行河道汇流计算模拟。此外,考虑到玉米作为一年一熟作物,其生长发育与温度条件密切相关,模型采用基于热量单元的方法来模拟其生长过程,即当逐日有效积温累积至特定阈值时,模型自动触发作物进入出苗、拔节、成熟等相应的生长阶段。此外,本研究对所有玉米种植的 HRU 启用自动施肥,设置胁迫阈值为 0.75,即当作物氮胁迫指数达到阈值时系统自动触发施肥[28]。

1.3 模型率定与验证

SWAT 模型率定和验证是确认模型可靠性和准确性的关键步骤,本研究采用 SWAT-CUP 程序及其内嵌的 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting version 2)算法对松花江流域的 SWAT 模型进行率定与验证。模型性能通过决定系数(R^2)、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency,NSE)以及百分比偏差(Percent Bias,PBIAS)三个关键统计指标进行量化评价。本研究对松花江流域的玉米产量、径流量和泥沙量进行了参数校准。研究依据作物分布、流域水系特征和行政区划,将松花江流域划分为 15 个作物种植区进行分区率定,率定时期为 2001—2018 年(图 1)。河流流量率定则采用“先上游后下游、先年值后月值”的策略,通过反复迭代优化,使模拟值在趋势、峰值和基流等方面更好地吻合实测水文过程。在率定验证时间段的划分上,基于初步评估和水文年的干湿分布特征,将观测时段合理划分为独立的率定期(2009—2012 年)与验证期(2013—2015 年)。松花江流域最终校准得到的玉米生长参数见表 2,径流与泥沙运移相关参数见表 3。

1.4 情景设计

已有研究表明,灌溉是农业领域广泛采用的增产措施之一,但尽管灌溉措施能有效缓解水分胁迫、提升产量,其同时也可能因增加土壤湿润度和地表径流而加剧水土流失[29—30]。因此,为协同玉米增产与水土保持,近年来农业管理技术已从单一技术逐渐向组合技术演变[31]。为定量评估松花江流域玉米增产潜力及其可能带来的水土流失环境效应,本研究基于已率定验证的 SWAT 模型,构建了多种技术组合的模拟情景。情景设置旨在模拟并量化农业管理措施(包括合理密植、保护性耕作以及灌溉)的组合效应对玉米产量及水土流失的影响,从而为区域玉米可持续生产与水土流失阻控提供科学依据。研究期选取模拟时期为 2001—2018 年,技术情景包括合理密植+灌溉、保护性耕作+灌溉以及合理密植+保护性耕作+灌溉,并将不使用任何技术的情况设定为基准情景。

表 2　松花江流域分区玉米生长参数率定值

Table 2　Calibrated parameter values for maize in different zones of the Songhua River Basin

区域 Zone	率定值 Calibrated value						百分比偏差 PBIAS
	BIO_E	HVSTI	BLAI	T_OPT	WSYF	DLAI	
A	38.00	0.47	6.00	25.00	0.30	0.70	5.8%
B	37.00	0.41	6.00	25.00	0.30	0.70	5.9%
C	37.00	0.52	6.00	25.00	0.30	0.70	7.4%
D	35.00	0.46	6.00	25.00	0.30	0.70	-10.9%
E	39.00	0.57	6.00	25.00	0.30	0.70	-2.4%
F	40.00	0.56	6.00	25.00	0.30	0.70	0.1%
G	44.00	0.68	6.80	25.00	0.30	0.70	1.3%
H	39.00	0.50	6.00	25.00	0.30	0.70	-8.1%
I	37.00	0.45	6.00	25.00	0.30	0.70	5.8%
J	39.00	0.53	6.00	25.00	0.30	0.70	1.2%
K	39.00	0.55	6.00	25.00	0.30	0.70	-2.5%
L	40.00	0.58	6.50	25.00	0.30	0.70	-2.5%
M	36.00	0.51	6.00	25.00	0.30	0.70	-4.2%
N	32.00	0.42	5.00	25.00	0.30	0.70	-1.5%
O	37.00	0.41	6.00	25.00	0.30	0.70	8.4%

BIO_E:辐射利用效率 Radiation use efficiency;HVSTI:收获指数 Harvest index for optimal growing conditions;BLAI:潜在叶面积指数 Maximum potential leaf area index;T_OPT:最适宜温度 Optimal temperature for plant growth;WSYF:收获指数下限 Lower limit of harvest index;DLAI:叶面积减少时生长时间占生长季分数 Fraction of growing season decline when leaf area begins to decline;A—O:松花江流域进一步划分的 15 个分区 A—O

表 3　松花江流域径流与泥沙运移参数及范围

Table 3　Final range or values of calibrated parameters for streamflow and sediment yield of the Songhua River Basin

参数定义 Parameter definition	参数名称 Parameter name	参数范围 Parameter range
SCS 径流曲线数 SCS runoff curve number	CN2	-20%—25%
土壤饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	SOL_K	0%—30%
土壤有效水容量 Available water capacity of the soil layer	SOL_AWC	-28%—30%
土壤湿容重 Moist bulk density	SOL_BD	-15%—18%
地下水蒸散系数 Groundwater “revap” coefficient	GW_REVAP	0.02—0.19
潜水蒸散阈值深度 Threshold depth of water in the shallow aquifer for “revap” to occur	REVAPMN	750
基流 α 因子 Baseflow alpha factor	ALPHA_BF	0.048—0.51
产生回归流的浅层含水层最小水量阈值 Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	GWQMN	370—1250
深层含水层补给比例 Deep aquifer percolation fraction	RCHRG_DP	0.03—0.81
地下水延迟时间 Groundwater delay	GW_DELAY	31—100
坡面曼宁糙率系数 Manning′s “n” value for overland flow	OV_N	-14%—16%
子流域平均坡长 Average slope length	SLSUBBSN	-20%—0%
植物吸收补偿因子 Plant uptake compensation factor	EPCO	0.40—0.99
土壤蒸发补偿因子 Soil evaporation compensation factor	ESCO	0.40—0.99
最大冠层截留量 Maximum canopy storage	CANMX	0.28—2
主河道曼宁糙率系数 Manning′s “n” value for the main channel	CH_N2	0.014—0.19
主河道冲积层有效导水率 Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	CH_K2	1—5
支流河道曼宁糙率系数 Manning′s “n” value for the tributary channels	CH_N1	0.014—0.30
支流河道冲积层有效导水率 Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium	CH_K1	2—120
USLE 水土保持措施因子 USLE equation support practice factor	USLE_P	0.12—1

续表

参数定义 Parameter definition	参数名称 Parameter name	参数范围 Parameter range
USLE 土壤可蚀性因子 USLE equation soil erodibility (K) factor	USLE_K	-22%—97%
HRU 平均坡度 Average slope steepness	HRU_SLP	-13%—24%
泥沙输移方程线性参数 Coefficient in sediment transport equation	SPCON	0.00021
泥沙输移方程指数参数 Exponent in sediment transport equation	SPEXP	1
地表径流延迟系数 Surface runoff lag time	SURLAG	4
洪峰流量调整因子 Peak rate adjustment factor	ADJ_PKR	2
河道可蚀性因子 Channel erodibility factor	CH_COV1	0.02—0.26
河道植被覆盖因子 Channel cover factor	CH_COV2	0.00—0.91
河道抗侵蚀能力 Channel resistance to erosion	CH_ERODMO	0.195—0.96
壤中流坡长 Slope length for lateral subsurface flow	SLSOIL	2.7—38.8
主河道长度 Length of main channel	CH_L2	0%—17%
主河道平均坡降 Average slope of main channel along the channel length	CH_S2	-18%—27%
降雪临界温度 Snowfall temperature	SFTMP	1
融雪基准温度 Snow melt base temperature	SMTMP	0.5
融雪因子(6 月 21 日最大值) Melt factor for snow on June 21	SMFMX	4
融雪因子(12 月 21 日最小值) Melt factor for snow on December 21	SMFMN	4
雪包温度滞后因子 Snow pack temperature lag factor	TIMP	1

其中,灌溉技术是在基准情景基础上,对所有玉米种植的 HRU 启用自动灌溉,设置作物水分胁迫阈值为 0.90,即当作物水分胁迫指数达到阈值时系统自动触发灌溉[28]。针对合理密植情景,本研究依据已发表文献中建立的种植密度与叶面积指数(LAI)的经验关系(图 2),通过调整作物数据库(.dat)中的最大潜在叶面积指数(BLAI)参数,来间接体现种植密度增加对冠层结构的影响[32—35]。

已有研究通过田间试验发现黑土区长期免耕能够增加 10%的有机质含量,并通过带入 SWAT 模型计算其影响的相关参数以及对照长期免耕的实际效果,不断优化得到最终的保护性耕作情景经验参数值[36]。各参数主要调整如下:

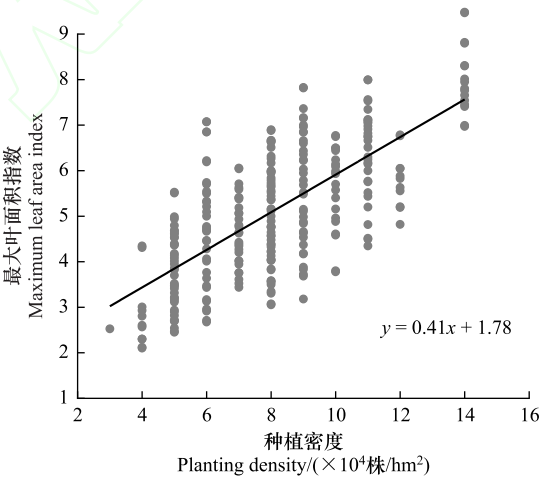

图 2 叶面积指数与种植密度的变化关系

Fig.2 Relationship between leaf area index and planting density

(1)免耕操作参数调整:旨在模拟因减少土壤扰动(如免耕)对土壤物理和水文性质的改善。

径流曲线数(CN2):将 CN2 在现状基准情景的基础上下调 3 个单位,以体现土壤入渗能力的增强[37—38];土壤可蚀因子(USLE_K):将 USLE_K 降低 5%,以体现保护性耕作对土壤抗蚀性的长期改善;土壤保持因子(USLE_P):将 USLE_P 设置为 0.5,代表保护性耕作措施对坡面水土流失的有效阻控;饱和导水率(SOL_K):将 SOL_K 增加 10%,以模拟因土壤孔隙结构改善而提高的入渗速率;

(2)作物残茬覆盖参数调整:旨在模拟因地表残茬保留对水分蒸发和土壤侵蚀的直接影响。

地表覆盖/植物因子(USLE_C):将 USLE_C 降低 30%,以量化残茬覆盖对抑制土壤侵蚀的贡献;土壤蒸发补偿因子(ESCO):将 ESCO 增加 10%,以反映地表残茬覆盖对土壤水分蒸发的抑制作用;植物吸水补偿因子(EPCO):将 EPCO 增加 20%,以模拟土壤水分条件改善后,作物根系吸水效率的提升;有效含水量(SOL_AWC):将 SOL_AWC 增加 5%,以反映有机质增加带来的持水能力提升。

1.5　统计分析

为系统比较不同情景下各输出指标的均值是否存在统计学差异,首先对所有样本数据采用 Shapiro-Wilk 正态性检验。对于服从正态分布的数据,采用独立样本 t 检验进行分析;对于不服从正态分布的数据,则采用非参数的 Mann-Whitney U 检验,并通过 P 值的大小判定各管理技术与基准情景间差异的显著程度($P<0.05$ 表示显著,反之不显著)。此外,流域内玉米单产稳定性采用变异系数(CV,Coefficient of Variation)进行量化,计算公式如下:

$$CV=\frac{\sigma}{\mu}\times 100\% \tag{1}$$

式中,CV 为变异系数;σ 为标准差;μ 为样本平均值。参考常用分级标准,将稳定性划分为三个等级:根据变异系数的大小,$CV>30\%$表示稳定性低(高离散),$10\%<CV<30\%$表示稳定性中等(中离散),以及 $CV<10\%$表示稳定性高(低离散),该分级属于农业与生态统计分析中常用的经验划分标准,用于表征年际波动幅度[39]。

2　结果与分析

2.1　模型率定效果评价

松花江流域 SWAT 模型在率定期与验证期的模拟结果显示,多数站点的流量与输沙量模拟结果达到了 $R^2\geq 0.60$、NSE≥0.60 且|PBIAS|≤15%的良好标准(表 4 和图 3)。模型模拟流量和观测值较为一致,多数站点的 R^2介于 0.60—0.80 之间,NSE 介于 0.50—0.70 之间,平均 PBIAS 为 3.0%。在验证期内,模型表现依然稳健,平均 R^2提升至 0.73,NSE 平均值为 0.65,PBIAS 平均值为 12.9%,表明模型在流域尺度上能够合理刻画水量平衡过程,有效捕捉流量峰值变化,可为流域水资源趋势分析等提供支持。流域输沙量模拟整体 R^2和 NSE 均大于 0.50,且在验证期 R^2平均值提升至 0.73、NSE 平均值提升至 0.67。这表明模型能够较为准确的刻画该区域的侵蚀产沙过程(表 4)。此外,松花江流域玉米产量模拟的 PBIAS 范围介于-10.9%—8.4%之间,进一步印证了模型在产量预测方面具有较高的准确性与可靠性(表 2)。

表 4　模型率定验证结果

Table 4　Model performance statistics during calibration and validation periods

指标 Indicator	站点 Station	率定期 Calibration			验证期 Validation		
		R^2	NSE	PBIAS/%	R^2	NSE	PBIAS /%
流量	石灰窑	0.77	0.71	14.2	0.63	0.54	23.7
Streamflow	库漠屯	0.75	0.70	5.2	0.62	0.54	7.7
	柳家屯	0.75	0.75	3.5	0.78	0.78	3.6
	同盟	0.59	0.58	4.1	0.65	0.61	7.2
	佳木斯	0.67	0.65	1.7	0.82	0.76	14
	富拉尔基	0.65	0.63	-3.6	0.63	0.58	4.1
	依兰	0.63	0.59	8.1	0.79	0.69	18.2
	江桥	0.67	0.66	4.0	0.68	0.57	12.1
	哈尔滨	0.64	0.58	-1.9	0.82	0.77	13.3
	大赉	0.66	0.58	-19.5	0.75	0.66	7.8
	下岱吉	0.61	0.56	0.2	0.82	0.75	12.6
	扶余	0.58	0.53	20.5	0.73	0.56	31.0
输沙量	江桥	0.54	0.51	-2.1	0.62	0.55	-14.0
Sediment	哈尔滨	0.61	0.57	-34.1	0.78	0.74	5.1
	扶余	0.62	0.60	21.6	0.80	0.72	-19.0

R^2:决定系数;NSE:纳什效率系数 Nash-Sutcliffe Efficiency;PBIAS:百分比偏差 Percent Bias

2.2　松花江流域玉米产量与水土流失基准情景分析

2001—2018 年间,松花江流域玉米年均单产为 6.0 t/hm^2,产量总体呈缓慢上升趋势,但年际波动明显,产

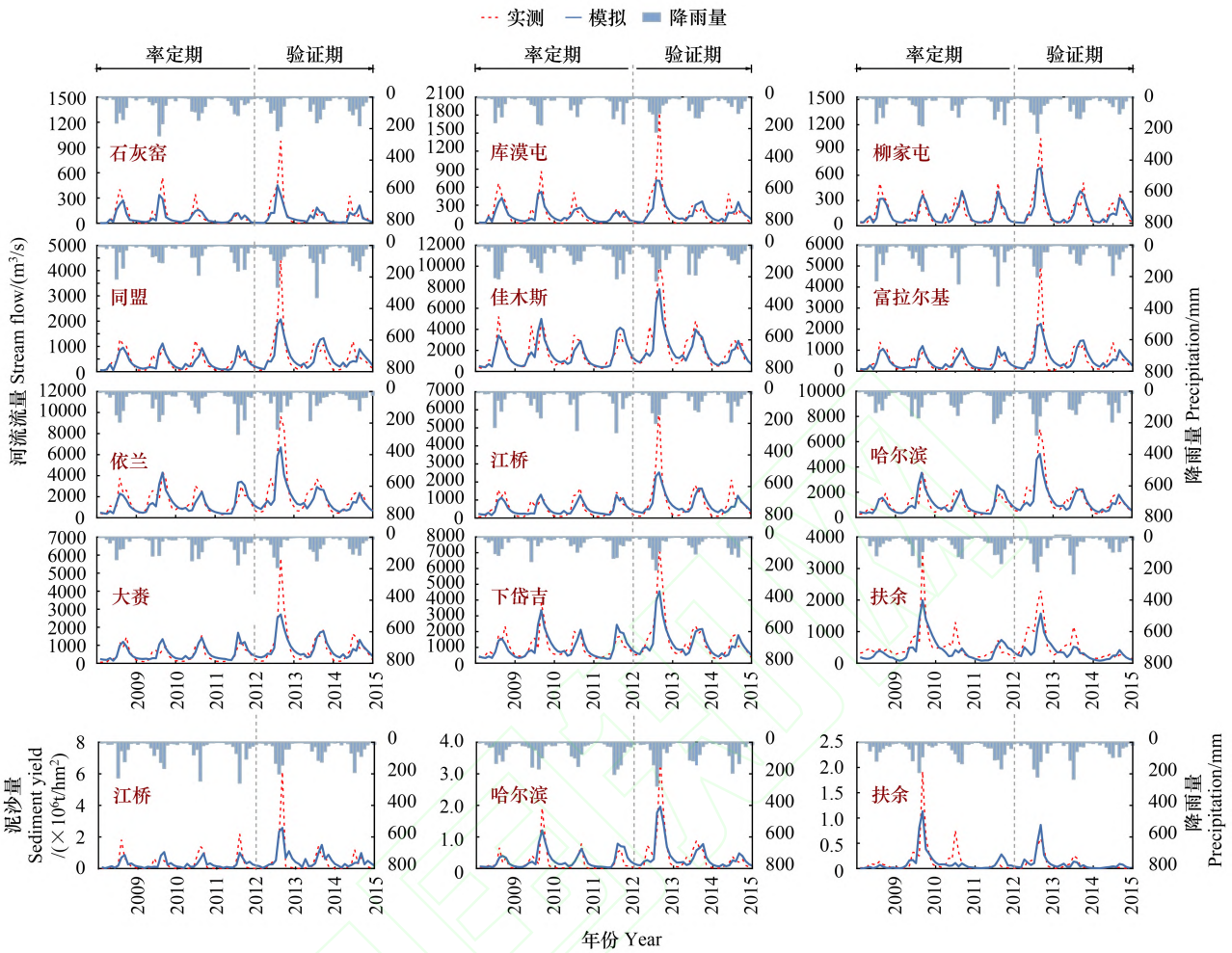

图 3 松花江流域河流流量和输沙量模拟与实测值对比

Fig.3 Graphical comparisons of the observed and simulated streamflow and sediment yield during the calibration and validation periods in the Songhua River Basin

量变异系数为 14.0%,属于中等变异水平(图 4)。2018 年流域玉米单产较 2001 年增长了约 55.5%,表明该流域内玉米产量提升仍存在巨大潜力。空间分析显示,流域内部不同分区的玉米单产水平呈现出明显的空间异质性。松嫩平原作为核心产粮区,其所在的 G 区和 H 区成为了流域的高产区,年均单产分别达到了 7.3 t/hm^2 和 7.2 t/hm^2。松嫩平原地势平坦开阔,黑土广布,为玉米生长提供了良好的基础。同时,该区域气候条件适宜,属于温带季风气候,雨热同期,生长季内的光照、热量和水分条件能够较好地满足玉米生长发育的需求[40]。相比之下,位于松花江流域西北部的区域玉米单产整体相对偏低,其中,D 区的年均单产最低,仅约 4.0 t/hm^2。该区域多为山地和丘陵地形,地势起伏较大,降水较少且分布不均的气象条件成为制约玉米生长的主要因素之一[41]。与此同时,松花江流域水土流失问题较为突出,年均土壤侵蚀量介于 4.7×10^{-3} t/hm^{2}到 3.12 t/hm^{2}之间,土壤侵蚀风险较低的区域主要分布在地势平缓的松嫩平原(如 F 区),而高土壤侵蚀风险主要集中在地形坡度较陡的 D 区,这对流域的作物生产力与水土资源管理构成了挑战。

2001—2018 年,松花江流域年均最高气温为 10.4℃,年均最低气温为-1.12℃,年均降水量为 524 mm。年均最低气温低于 0℃,说明在作物生长季初期和末期阶段存在霜冻风险,可能影响了产量的稳定性。从长期趋势看,气温的年际波动较小,但降水量在研究期间表现出较强的年际不稳定性,年际变异系数为 16.3%。研究期间,流域明显的干湿波动对流域水资源的可利用性和稳定性构成了挑战,其中 2007 年和 2017 年为典型

的极端干旱年份,其降水量远低于其他年份。以 2007 年为例,松花江流域该年平均降水量仅为 405 mm,较多年平均值减少了约 22.7%,且该年年平均气温达到 5.8℃,为研究期内最高,较多年平均值的 4.6℃ 偏高了 1.2℃。与之对应,这两年玉米产量均发生显著下降,2007 年产量从前一年的 6.8 t/hm^{2}骤降到 4.7 t/hm^2,2017 年同样骤降到 5.0 t/hm^2。这表明极端干旱事件引起的水分胁迫是导致松花江流域玉米产量年际差异的关键因素之一。

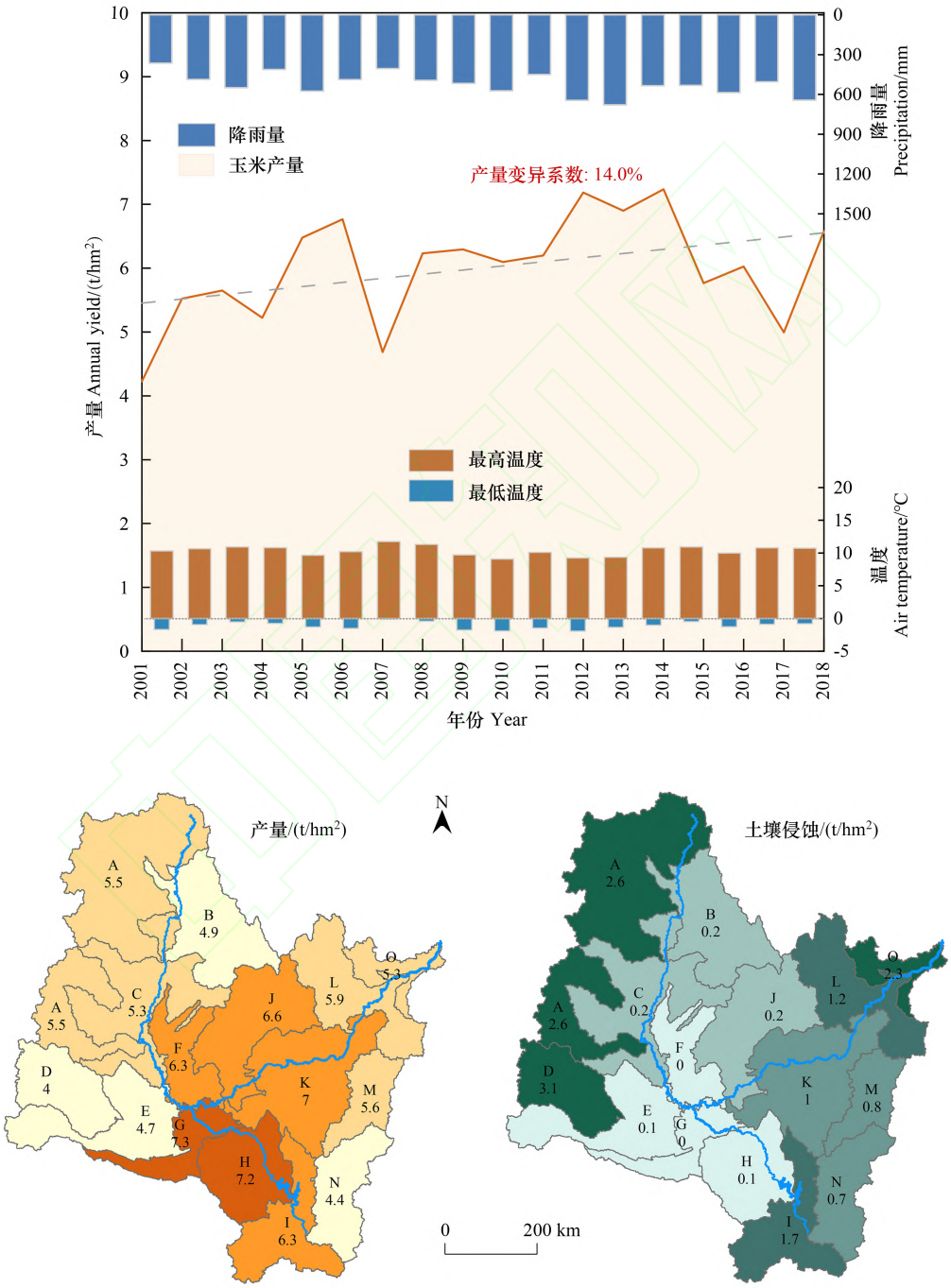

图 4　2001—2018 年松花江流域玉米产量、气象因子与土壤侵蚀时空分布

Fig.4　Temporal-spatial patterns of maize yield, meteorological factors, and soil erosion in the Songhua River Basin from 2001 to 2018

2.3 灌溉与侵蚀阻控技术组合情景对玉米单产和水土流失的影响

为评估侵蚀阻控措施(合理密植、保护性耕作)能否缓解单一灌溉可能加剧的径流与侵蚀风险,本研究构建了合理密植+灌溉与保护性耕作+灌溉两种组合技术情景。2001—2018 年模拟结果显示,在产量方面,松花江流域应用合理密植+灌溉技术使玉米年均单产达到约 8.5 t/hm^2,相较于基准情景增加了 40.9%(P<0.05)(图 5),应用保护性耕作+灌溉技术后多年平均产量略低于密植,约为 8.0 t/hm^2,亦显著高于基准情景约 33.3%(P<0.05)(图 6),揭示了在松花江流域,灌溉与两种侵蚀阻控技术之间存在着显著的协同增产效应。同时,产量年际变异系数从基准情景的 14.0%降至 4.7—4.8%,即从中等变异水平降为低变异水平,说明组合技术可在增产的同时也实现了稳产。空间格局分析进一步揭示了灌溉与侵蚀阻控技术组合在流域尺度上的适用性与区域差异。两种侵蚀阻控技术与灌溉技术组合后的增产空间格局类似,E 和 G 等水分限制较为严重的区域成为增产的热点区域(图 5 和图 6)。

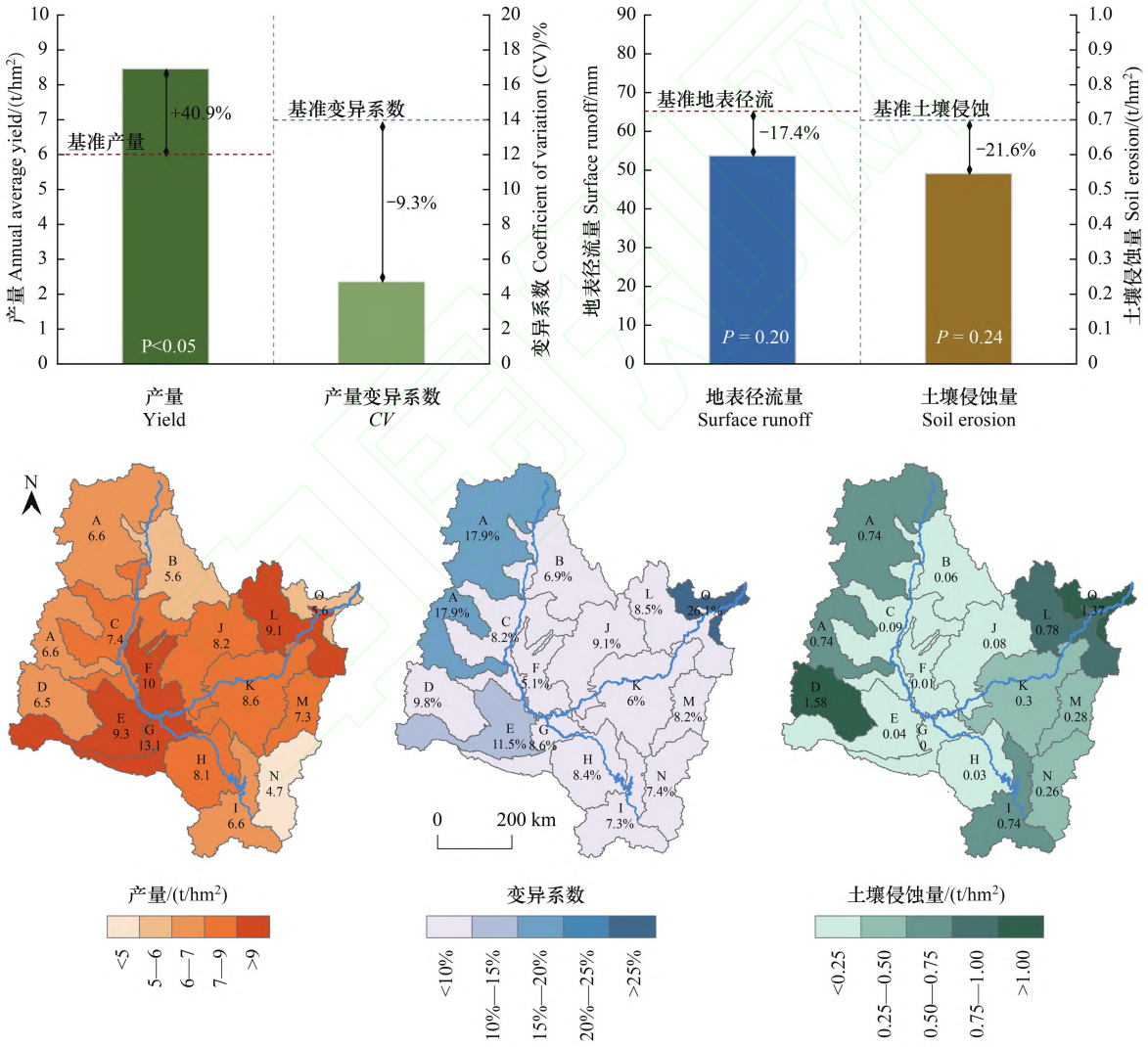

图 5 合理密植+灌溉技术对玉米产量、产量稳定性及水土流失环境效应的评估

Fig.5 Assessment of high-density planting+irrigation technology on maize yield, yield stability, and environmental effects of soil and water losses

但在水土流失阻控方面,两种组合措施表现出明显差异。合理密植+灌溉的地表径流量(53.7 mm)与基准情景无显著差异(P = 0.20),年均土壤侵蚀量为 0.55 t/hm^2,较基准情景下降 21.6%,但差异不显著(P =

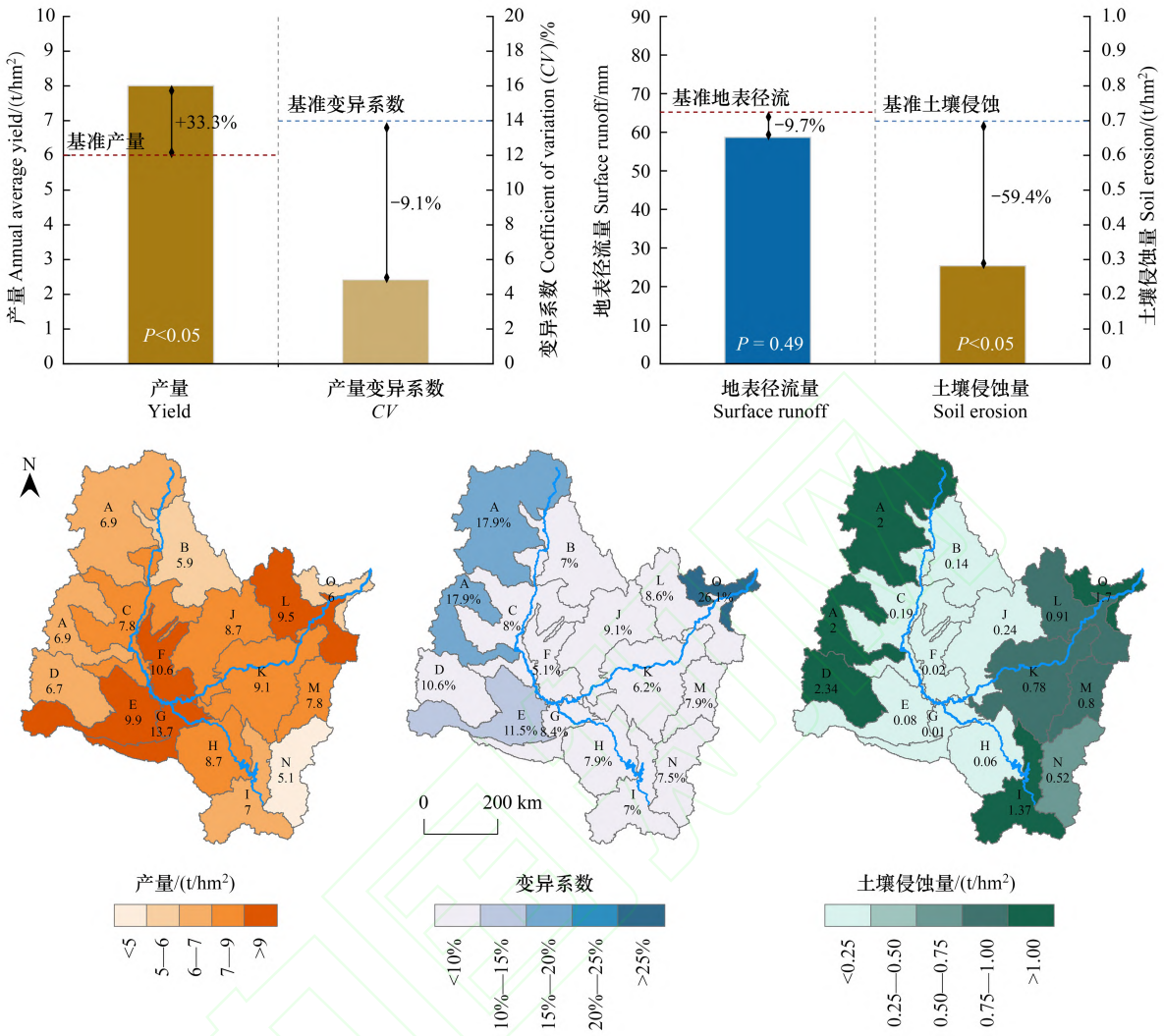

图 6　保护性耕作+灌溉技术对玉米产量、产量稳定性及水土流失环境效应的评估

Fig.6　Assessment of conservation tillage+irrigation technology on maize yield, yield stability, and environmental effects of soil and water losses

0.24)。相比之下,保护性耕作+灌溉的年均地表径流为 58.7 mm,较基准情景下降了 9.7%(P=0.49),年均土壤侵蚀量为 0.23 t/hm^2,相较于基准情景显著减少了 59.4%(P<0.05)。空间分析进一步表明,合理密植+灌溉技术的土壤侵蚀量呈现出明显空间异质性,并在局部存在潜在的环境风险。土壤侵蚀的变化幅度从下降 30.9%(N 区)到增加 26.2%(E 区),其中,在 E、G 和 J 这三个分区,土壤侵蚀相较于基准情景有所增加。这表明在特定区域,密植增加的冠层覆盖可能不足以抵消因灌溉增加的径流。相比之下,保护性耕作+灌溉技术则表现出普适且稳定的水土流失阻控效果,松花江流域内所有分区土壤侵蚀量均下降,降幅介于 34.8%(E 区)至 72.3%(B 区)之间。

2.4　合理密植+保护性耕作+灌溉技术集成情景对玉米单产和水土流失的影响

在松花江流域,集成合理密植、保护性耕作与灌溉三种技术后,玉米单产得到显著提升(P<0.05),2001—2018 年多年平均单产达到了 8.5 t/hm^2,相较于基准情景的 6.00 t/hm^{2}带来了 41.4%的显著产量增长(图 7),表明综合性的农田管理措施能有效提升松花江流域的产量水平。在产量稳定性方面,集成措施不仅提升了平均产量,也显著增强了稳定性,能够有效缓冲气候波动带来的影响。空间上,各分区的单产增幅介于 11.3%(I 区)到 112.0%(E 区)之间,表明三项技术的协同作用具有普适性的增产优势,能有效克服多数局地限制。此

外,在水土流失阻控方面,集成措施也表现出显著效益,多年平均地表径流为 41.0 mm,较基准值显著减少了 37.0%(P<0.05),多年平均土壤侵蚀为 0.18 t/hm^2,较基准降幅达 74.0%,且差异显著(P<0.05)。空间上,土壤侵蚀相对降幅范围从 53.3%(E 区)到 84.7%(N 区),这表明,尽管灌溉增加了系统总水量,但保护性耕作和种植密度改善所带来的入渗增加与蒸散发增强,仍在绝大多数区域实现了有效的侵蚀阻控。

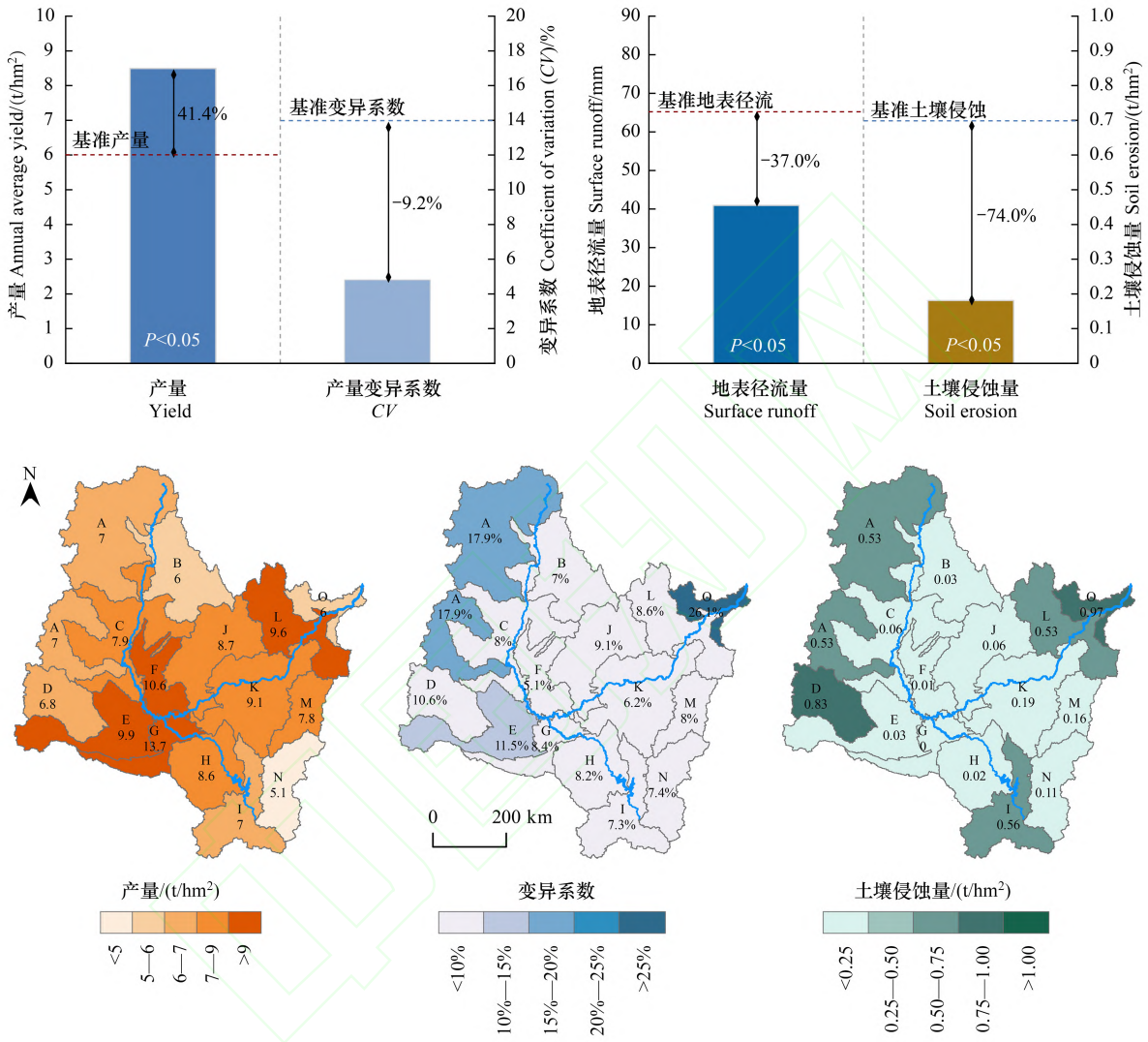

图 7 合理密植+保护性耕作+灌溉技术对玉米产量、产量稳定性及水土流失环境效应的评估

Fig.7 Assessment of high-density planting+conservation tillage+irrigation technology on maize yield, yield stability, and environmental effects of soil and water losses

3 讨论

本研究通过长期模拟,系统评估了不同农业管理技术组合情景在松花江流域对玉米产量与水土保持的协同效应。基准情景下,松花江流域玉米年均单产为 6.00 t/hm^2,与其他国家类似区域相比[42],具备较大提升潜力,同时要充分考虑气候波动与水土流失的双重压力。在此背景下,不同农业管理措施在协同实现玉米稳产增产与水土流失阻控方面呈现出明显差异。

以合理密植+灌溉为代表的高产技术组合情景虽能实现高达 40.9%的产量增幅,但其水土流失阻控效果在空间上存在显著异质性,甚至在部分区域加剧了侵蚀风险。这反映出单纯追求产量最大化的技术路径往往

伴随着较高的环境不确定性。灌溉作为应对干旱、保障生产的关键策略,其显著的增产稳产效应已得到广泛验证[43—44],但额外的人为水分输入会改变农田产流机制,可能引发水土流失风险[45]。合理密植作为另一项高产措施,能通过增加冠层覆盖减少土壤无效蒸发[46],但在水分胁迫下可能加剧植株间水分竞争[47],而当其与灌溉结合时将能够缓解此限制、充分释放增产潜力[48]。其他研究同样发现,密植+灌溉这一组合技术相比单纯密植可使产量增加 10%—15%[49]。然而,这一组合技术在松花江流域仍然无法完全抵消灌溉带来的水土流失风险,在部分地区甚至加剧水土流失。这些分区位于松嫩平原中南部,玉米种植较为集中,并处于西流松花江与嫩江汇流到松花江干流的关键水文节点。在该地形背景下,当发生高强度降雨时,叠加自动灌溉带来的额外水分输入,土壤会迅速达到饱和,进而更易触发超渗产流或增强坡面径流冲刷。密植增加的冠层覆盖可能不足以抵消新增径流对坡面侵蚀的促进作用,因此表现为土壤侵蚀量较基准情景略有增加。相比之下,以保护性耕作+灌溉为代表的技术路径展现了更优的协同性。保护性耕作通过最小化土壤扰动、维持地表覆盖,不仅能改善土壤保水能力[50],有效控制水土流失,还能随着实施年限增加而提升增产效果[51],从而为灌溉的稳产增效作用提供了可持续的土壤条件。进一步的技术集成结果证明,将合理密植、保护性耕作与灌溉三项技术有机结合,能够最大程度地释放协同潜力。该集成模式不仅实现了产量 41.4%的大幅提升,并使产量变化更为稳定,更同步取得了最为显著且稳健的水土流失阻控效益,使土壤侵蚀量降低达 74.0%。这与其他研究的结论相契合,即保护性措施与高产技术相结合是实现可持续农业的关键,减流和减蚀效果分别能达到 28.0%和 40.3%以上[52—53]。这清晰表明,灌溉是提升农业系统产量与气候韧性的关键赋能因素,保护性耕作是实现黑土地水土保持与长期可持续性的核心调控措施,而合理密植在二者创造的良好水土条件下得以充分发挥其增产潜力。

需要注意的是,本研究旨在通过对比不同管理技术组合之间的相对差异来识别不同技术组合对粮食增产、稳产和水土流失阻控的协同效应。但受限于 SWAT 模型本身的结构及观测数据的获取难度,在模型的模拟精度方面仍然存在一定的局限。首先,由于保护性耕作对农田系统的影响是多维度的,而本研究主要聚焦于调整模型关键水文与侵蚀参数来实现保护性耕作的情景假设。这种参数设置方案由于未考虑保护性耕作对土壤微生物活性、孔隙连通性及养分循环等的长期影响,可能导致对产量和泥沙运移过程的估算产生偏差。其次,部分站点的输沙量率定结果虽然达到了可接受标准,但仍有进一步提升空间,同样可能对后续量化结果带来不确定性。此外,本研究采用了模型自动灌溉和自动施肥功能构建了一种近乎理想的水肥保障管理环境,但可能在一定程度上放大各情景相对于基准情景的差异。未来将收集更多长时序的田间定位试验数据,优化保护性耕作和密植相关参数,以提高模型对不同管理技术的模拟精度。同时,将进一步设计不同梯度的灌溉与施肥情景,以更真实地评价多种管理技术在复杂资源限制条件下的普适性与稳定性。

综合来看,实现松花江流域农业的可持续发展,需转变对单一技术增产效应的过度关注,转而重视技术集成在稳产性、气候韧性与环境效应上的综合表现。未来农业技术推广与政策设计应转向区域化精准施策:在以产量为首要目标的区域,可重点推广包含灌溉的高产技术组合,但必须配套长期的水土监测与适应性管理措施,以控制其潜在的环境风险;而在以单产-地力协同为目标的区域,则应优先倡导以保护性耕作为核心的稳健型高产技术组合,从而在保障粮食生产的同时,守护好黑土地这一珍贵的农业资源。

4　结论

本研究基于充分率定验证的 SWAT 模型模拟了松花江流域长期的玉米产量和水土流失的基准情况,并在此基础上系统评估了应用多种农业管理技术组合后对协同增产、稳产与水土流失阻控的效果,主要结论如下:

(1)基准情景模拟表明,松花江流域年平均玉米单产为 6.00 t/hm^2。但 18 年间产量变异系数为 14.0%,这主要是由气候条件驱动,例如 2007 年极端干旱导致玉米单产下降 21.8%。此外,流域内坡度较陡的区域水土流失风险较高,土壤侵蚀量最高达到了 3.12 t/hm^2。

(2)在组合技术情景下,合理密植+灌溉组合虽可实现 40.9%的产量增幅,但其水土流失阻控效果存在显

著的空间变异,在部分区域加剧了土壤侵蚀风险,揭示了以最大化产量为目标的技术可能伴随更高的环境代价。相比之下,保护性耕作+灌溉组合展现了更好的平衡性,能在显著抑制土壤侵蚀的同时,维持较高的产量与稳定性。

(3)集成合理密植、保护性耕作与灌溉三项技术在松花江流域实现了产量的大幅提升(产量增加 41.4%)和产量稳定性的改善(产量变异系数降低 9.2%),同时提供了最稳健的水土流失阻控效果(土壤侵蚀下降 74.0%),代表了一种环境友好型的高产可持续农业模式。结果进一步证明,灌溉技术是提升黑土区产量稳定性、增强农业系统韧性的关键因素,而保护性耕作则是协调产量目标与水土流失阻控、实现黑土地长期可持续发展的核心措施。

参考文献(References):

[1] 李保国, 刘忠, 黄峰, 杨晓光, 刘志娟, 万炜, 汪景宽, 徐英德, 李子忠, 任图生. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193.

[2] 张佳宝, 孙波, 朱教君, 汪景宽, 潘喜才, 高添. 黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1155-1164.

[3] 姜明, 文亚, 孙命, 王竑晟, 曾艳, 韩永滨, 李秀军, 武海涛, 李禄军, 徐尚起. 用好养好黑土地的科技战略思考与实施路径——中国科学院"黑土粮仓"战略性先导科技专项的总体思路与实施方案. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1146-1154.

[4] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 沈波, 顾治家, 丁迎盈. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界. 科学通报, 2021, 66(1): 96-106.

[5] 王嘉麒. 松花江流域土壤侵蚀驱动机制及侵蚀强度的概率评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2024.

[6] Li R, Hu W Y, Jia Z J, Liu H Q, Zhang C, Huang B, Yang S H, Zhao Y G, Zhao Y C, Shukla M K, Taboada M A. Soil degradation: a global threat to sustainable use of black soils. Pedosphere, 2025, 35(1): 264-279.

[7] Zhao Z W, Leng P, Han X J, Shang G F. Global maize yield responses to essential climate variables: Assessment using atmospheric reanalysis and future climate scenarios. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110140.

[8] 黄世哲. 东北黑土区土壤侵蚀防治与水土保持策略. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 137-139.

[9] 吴铁华, 杨伟伟, 凌祖国, 高峰. 东北黑土区土壤侵蚀演替规律研究. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3924-3925, 4000.

[10] 刘华征, 贾燕锋, 范昊明, 王佳楠, 韩文宁. 东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2292-2305.

[11] Bruinsma J. By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050 Rome: FAO, 2009.

[12] 王旖旎, 吴玲. 全球视域下国际形势、粮食安全与中国方案. 农业经济与管理, 2024(2): 13-24.

[13] 张宁宁, 李雪, 吕新业, 袁龙江. 百年变局、世纪疫情背景下世界及中国粮食安全面临的风险挑战及应对策略. 农业经济问题, 2022(12): 136-141.

[14] Iizumi T, Sakai T. The global dataset of historical yields for major crops 1981-2016. Scientific Data, 2020, 7: 97.

[15] Xu Y B, Skinner D J, Wu H X, Palacios-Rojas N, Araus J L, Yan J B, Gao S B, Warburton M L, Crouch J H. Advances in maize genomics and their value for enhancing genetic gains from breeding. International Journal of Plant Genomics, 2009, 2009: 957602.

[16] Iizumi T, Sakai T, Masaki Y, Oyoshi K, Takimoto T, Shiogama H, Imada Y, Makowski D. Assessing the capacity of agricultural research and development to increase the stability of global crop yields under climate change. PNAS Nexus, 2025, 4(4): pgaf099.

[17] Qi P, Wang H Q, Wang Y B, Li X Y, Liu S R, Zhang S G, Jiang M, Zhang G X. Risk of sustainable agricultural water supply and security strategy in the Black Soil Region of Northeast China. Science Bulletin, 2025, 70(16): 2541-2543.

[18] Knapp S, van der Heijden M G A. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. Nature Communications, 2018, 9: 3632.

[19] Rippey B R. The U.S. drought of 2012. Weather and Climate Extremes, 2015, 10: 57-64.

[20] Li Y, Guan K Y, Schnitkey G D, DeLucia E, Peng B. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. Global Change Biology, 2019, 25(7): 2325-2337.

[21] 张元红, 王瑞, 徐宗贵, 李军. 不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种的响应. 农业工程学报, 2021, 37(22): 136-144.

[22] Li T, Zhang X P, Liu Q, Yan P, Liu J, Chen Y Q, Sui P. Yield and yield stability of single cropping maize under different sowing dates and the corresponding changing trends of climatic variables. Field Crops Research, 2022, 285: 108589.

[23] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203-1215.

[24] 李峰平. 变化环境下松花江流域水文与水资源响应研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.

[25] 冯颖, 郭英, 陈晓璐, 刘孟竹, 沈彦俊. 基于 MODIS 的松花江流域主要作物分布提取. 中国生态农业学报: 中英文, 2023, 31(10): 1602-1612.

[26] 刘驰, 刘希瑶, 刘澎. 松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析. 地质与资源, 2020, 29(6): 550-555.

[27] Ding B B, Li Y Q, Marek G W, Ge J N, Han Y W, Hu K L, Yan T Z, Ale S, Zhang G L, Srinivasan R, Chen Y. Impacts of land use changes on

water conservation in the Songhuajiang River basin in Northeast China using the SWAT model. Agricultural Water Management, 2024, 306: 109185.

[28] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute, 2011.

[29] Amisi E O, Li Y N, He R Y, Ding Q S, Xu G M, Areru D P. A hybrid variable flux irrigation model for mitigating agroecological impacts of straw incorporation and furrow ridge system in rice-wheat rotations. Agricultural Water Management, 2024, 304: 109067.

[30] Chen R, Li H, Wang J, Song Z Y. Critical factors influencing soil runoff and erosion in sprinkler irrigation: Water application rate and droplet kinetic energy. Agricultural Water Management, 2023, 283: 108299.

[31] 刘晓洁, 辛良杰, 麻吉亮, 王宇先, 张帆. 黑土地保护性利用技术模式的区域适宜性评估与推广机制研究. 中国科学院院刊, 2025, 40(11): 2049-2060.

[32] 侯佳敏, 罗宁, 王溯, 孟庆锋, 王璞. 增密对我国玉米产量-叶面积指数-光合速率的影响. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2538-2546.

[33] Fan P P, Li Y Y, Evers J B, Ming B, Wang C X, Li S K, Xie R Z. A new empirical equation to describe the vertical leaf distribution profile of maize. The Journal of Agricultural Science, 2020, 158(8/9): 676-686.

[34] 李栋浩, 姜雪连, 佟玲. 种植密度对制种玉米根冠生长及耗水量的影响. 排灌机械工程学报, 2014, 32(12): 1091-1097.

[35] 迟海航, 朱凤博, 梁源, 吴雪冰, 刘俊辉, 段佳慧, 邵慧. 增密种植条件下基于主动冠层传感器 GreenSeeker 的春玉米氮营养无损诊断研究. 东北农业大学学报, 2024, 55(6): 25-38.

[36] 刘海鹏. 退化黑土区保护性耕作的综合效应及其评价分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2023.

[37] Uniyal B, Jha M K, Verma A K, Anebagilu P K. Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140737.

[38] Tuppad P, Kannan N, Srinivasan R, Rossi C G, Arnold J G. Simulation of agricultural management alternatives for watershed protection. Water Resources Management, 2010, 24(12): 3115-3144.

[39] Ma Y X, Wen M L, Liu P F, Jiang Y X, Zhang X H. Speciation characteristics and risk assessment of heavy metals in cultivated soil in pingshui village, Zhaoping County, Hezhou City, Guangxi. Applied Sciences, 2024, 14(23): 11361.

[40] Feng Y, Guo Y, Shen Y J, Zhang G X, Wang Y F, Chen X L. Change of crop structure intensified water supply-demand imbalance in China's Black Soil Granary. Agricultural Water Management, 2024, 306: 109199.

[41] 钟科元, 郑粉莉. 1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究. 自然资源学报, 2017, 32(2): 278-291.

[42] Zhao H D, Tack J B, Kluitenberg G J, Kirkham M B, Sassenrath G F, Zhang L N, Wan N H, Liu Z J, Zhao J, Ashworth A, Gowda P H, Lin X M. Concurrent improvements in maize yield and drought resistance through breeding advances in the U.S.Corn Belt. Nature Communications, 2025, 16: 9389.

[43] 李想, 韩智博, 张宝庆, 高超, 贺缠生. 黑河中游主要农作物灌溉制度优化. 生态学报, 2021, 41(8): 3067-3077.

[44] Wang Q F, Qi J Y, Qiu H, Li J, Cole J, Waldhoff S, Zhang X S. Pronounced increases in future soil erosion and sediment deposition as influenced by freeze-thaw cycles in the upper Mississippi River Basin. Environmental Science & Technology, 2021, 55(14): 9905-9915.

[45] Batista P V G, da S Baptista V B, Wilken F, Seufferheld K, Quinton J N, Fiener P. First evidence of widespread, severe soil erosion underneath centre-pivot irrigation systems. Science of the Total Environment, 2023, 888: 164119.

[46] Vadez V, Pilloni R, Grondin A, Hajjarpoor A, Belhouchette H, Brouziyne Y, Chehbouni G, Kharrou M H, Zitouna-Chebbi R, Mekki I, Molénat J, Jacob F, Bossuet J. Water use efficiency across scales: from genes to landscapes. Journal of Experimental Botany, 2023, 74(16): 4770-4788.

[47] Luo N, Wang X Y, Hou J M, Wang Y Y, Wang P, Meng Q F. Agronomic optimal plant density for yield improvement in the major maize regions of China. Crop Science, 2020, 60(3): 1580-1590.

[48] Guo Q, Huang G M, Guo Y L, Zhang M C, Zhou Y Y, Duan L S. Optimizing irrigation and planting density of spring maize under mulch drip irrigation system in the arid region of Northwest China. Field Crops Research, 2021, 266: 108141.

[49] Zhou M W, Wang Y C, Gu J, Ma N N, Hou W J, Sun J Q, Fan X B, Yin G H. Effects of increasing maize planting density on yield, water productivity and irrigation water productivity in China: a comprehensive meta-analysis incorporating soil and climatic factors. Agricultural Water Management, 2025, 317: 109671.

[50] 王世豪, 徐新良, 黄麟, 师华定, 谷庆宝, 刘寒冰. 东北黑土区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2024, 44(21): 9504-9519.

[51] Liu H J, Wan W, Zheng M D, Li J W, Liu S W, Lv W, Zhou Y X, Liu Z. Study on climate suitability for maize and technical implementation strategies under conservation tillage in Northeast China. Soil and Tillage Research, 2025, 249: 106473.

[52] Pittelkow C M, Liang X Q, Linquist B A, van Groenigen K J, Lee J, Lundy M E, van Gestel N, Six J, Venterea R T, van Kessel C. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. Nature, 2015, 517(7534): 365-368.

[53] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 王志强. 秸秆还田阻控黑土侵蚀机理及效应. 土壤与作物, 2022, 11(2): 115-128.