

基于改进 SWAT 模型的灌溉—施肥—耕作对乌梁素海流域营养物负荷及作物产量的影响^{*}

王维刚, 史海滨^{**}, 李仙岳, 孙亚楠, 张文聪, 周 慧

(1: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2: 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010018)

摘 要: 不合理的灌溉、施肥和耕作是导致乌梁素海流域农业面源污染的主要根源, 乌梁素海作为我国北方地区重要的生态安全屏障, 多年来面临着湖泊水环境污染、水生态退化等问题, 科学开展湖泊水环境综合治理首先要解决流域内农业面源污染问题. 研究通过修改土壤水平衡、溶质平衡、地下水平衡和作物生长等模块对 SWAT 2012 原始版本进行改进, 并采用改进的 SWAT 模型构建了乌梁素海流域分布式水文模型, 利用实测径流、硝态氮与总磷排放量、地下水埋深以及作物产量校正和验证模型. 基于现状情景, 以玉米、葵花和小麦 3 种主要作物为研究对象, 设置了削减灌水量、施肥量及调整耕作方式 3 种农田管理情景. 基于改进 SWAT 模型不同情景的模拟结果, 计算分析各管理情景下的硝态氮与总磷负荷及对各作物产量的影响. 结果表明, 改进 SWAT 模型具有良好的模拟效果. 不同作物削减 5% 夏灌水量增产最多达 8.41%~10.32%, 削减 10% 秋浇水量均明显减少硝态氮和总磷负荷. 不同作物营养物负荷均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现逐渐降低的趋势, 但下降曲线逐渐趋于平缓; 各作物产量随氮磷施肥削减比例的增加呈先增加后减少的趋势, 其中玉米、小麦氮磷施肥削减比例达 20% 时产量开始下降, 葵花氮磷施肥削减比例达 25% 时产量开始下降. 不同作物营养物负荷与小麦产量均随耕作方式混合深度与混合效率参数的增大逐渐减小, 而玉米和葵花产量则随耕作参数增大逐渐增加. 综合分析, 削减 5% 夏灌水量+削减 20% 氮磷施肥比例+模板犁耕作组合玉米产量增幅最大达 36.5%; 削减 10% 秋浇水量+削减 25% 氮磷施肥比例+模板犁耕作组合葵花硝态氮负荷降幅最大达 42.1%; 削减 5% 夏灌水量+削减 20% 氮磷施肥比例+免耕组合小麦产量增幅最大达 29.1%; 而削减 5% 秋浇水量+削减 20% 氮磷施肥比例+常规春耕组合小麦硝态氮负荷减少最大达 27.2%, 总磷负荷减少最大达 18.5%. 本研究可为降低流域内面源污染、提高作物产量及减少乌梁素海营养物入湖负荷农业管理措施的实施提供理论依据.

关键词: 营养物负荷; 作物产量; 农业管理措施; 改进 SWAT 模型; 乌梁素海流域; 河套灌区; 面源污染

Effects of irrigation-fertilization-tillage on nutrient loading and crop yield in Ulansuhai watershed based on improved SWAT model^{*}

Wang Weigang, Shi Haibin^{**}, Li Xianye, Sun Yanan, Zhang Wencong & Zhou Hui

(1: College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P.R.China)

(2: High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil and Water Environment Effect in Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, P.R.China)

Abstract: Irrational irrigation, fertilization and farming are the main causes of agricultural non-point source pollution in Ulansuhai watershed. As an important ecological security barrier in northern China, Lake Ulansuhai has been facing problems, such as lake water environment pollution and water ecological degradation. To achieve the integrated management of lake water environment, agricultural non-point source pollution in the watershed must be controlled. The study improved the original version of SWAT 2012 by modifying the modules of soil water balance, solute balance, groundwater balance, and plant growth. A distributed hydrological

^{*} 2021-11-17 收稿; 2022-01-30 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (51539005, 51769024) 和内蒙古自治区水利科技重大专项 (213-03-99-303002-NSK2017-M1) 联合资助.

^{**} 通信作者; E-mail: shi_haibin@sohu.com.

model of Ulansuhai watershed was constructed with the improved SWAT model, which was calibrated and validated with measured runoff, nitrate nitrogen (NN), total phosphorus (TP) emissions, groundwater depth and crop yield. Three scenarios including reduced amount of irrigation, fertilization, and adjusted farming mode based on the current situation were applied on three main crops (corn, sunflower and wheat). NN and TP loadings and their effects on the crop yields under different management scenarios were simulated using the improved SWAT model. The results showed that the improved SWAT model has a good simulation fitting. For different crops, reducing the irrigation amount by 5% in summer can increase production by up to 8.41%–10.32%, and reducing 10% irrigation in autumn will significantly reduce the NN and TP loadings. The nutrient load of different crops showed a decreasing trend with an increasing reduction ratio of nitrogen and phosphorus fertilization (NPF), but the declining rate gradually became smaller. The yields of different crops increased first and then decreased with the ratio of NPF increase. When the ratio of NPF reduction reached 20%, the yield of corn and wheat began to decline, and when it reached 25% the yield of sunflower began to decline. The nutrient loads and wheat yield of different crops gradually decreased with an increase of the mixing depth and efficiency of the tillage mode, while the yield of corn and sunflower gradually increased with the tillage parameters. If combining cutting 5% of summer irrigation, reducing 20% NPF amount, and the template plowing combination, corn yield could increase by 36.5%. If cutting 10% of autumn watering, reducing 25% NPF, the template plowing combination, sunflower nitrate nitrogen load could reduce by 42.1%. If cutting 5% of summer irrigation, 20% reduction NPF, and no-tillage combination, wheat yield could increase by 29.1%. However, cutting 5% of autumn watering, 20% reduction NPF and conventional spring ploughing combination, NN loading of wheat farming could reduce by up to 27.2%, and TP loading could reduce by up to 18.5%. This research can provide a scientific basis for the implementation of agricultural management measures to reduce non-point source pollution, increase crop yields in Ulansuhai watershed and reduce the nutrients loads in Lake Ulansuhai.

Keywords: Nutrient load; crop yield; agricultural management measures; improved SWAT model; Ulansuhai watershed; Hetao Irrigation District; non-point source pollution

乌梁素海是黄河流域代表性湖泊,其对于黄河流域生态保护和高质量发展以及水利结构与生态环境有着至关重要的作用.处于乌梁素海流域腹地的内蒙古河套灌区作为我国重要的粮食产区,其在农业生产中为实现高产而大量施用化肥,且施肥量逐年增加^[1].已有统计数据显示,2019年乌梁素海流域化肥施用量达到127.07万t^[2].流域化肥利用率仅30%左右^[3],多数肥料随水通过各排干沟汇入总排干沟排出,排退水最后注入乌梁素海.乌梁素海长期接纳流域内各级排干沟的农田退排水,农业农村面源污染负荷已逐步成为乌梁素海的主要污染源.氮磷营养盐的增加,导致湖泊水体呈富营养化,湖泊水质下降^[4].加之受干旱区强烈的蒸发浓缩作用的影响,乌梁素海水质咸化,泥沙淤积严重,进而造成植被退化,严重威胁湖泊及周边地区的生态环境^[5].据资料显示,每年由总排干沟排入的水量占总补给水的85%,总排干沟的水质状况决定了乌梁素海水质的状态^[6].研究显示,2009—2017年期间,总排干沟非点源总氮污染负荷多年平均为1793.09t,占污染物(点源与非点源)总负荷量的36.82%,且逐年持续上升,其主要诱导因素是大量的农田排水^[7].在2006—2014年间乌梁素海总氮、总磷浓度均值分别达到2.66和0.20mg/L^[8].乌梁素海生态治理、修复是个长期而艰巨的过程,需要综合施策、科学治理.当地坚持“湖内的问题功夫下在湖外”的治理思路和途径,由单纯的“治湖泊”向系统的“治流域”转变,走以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展路子.近年来,通过在流域内开展控肥、控药、控水和控膜等措施,减少了农业面源污染,使得乌梁素海水体的富营养化程度逐渐减轻^[9].因此,研究减少流域内农田排退水量或改善排退水水质状况对减少乌梁素海营养物入湖负荷具有重要研究意义.

不合理的灌溉、施肥和耕作是导致乌梁素海流域农业面源污染的主要根源^[10].乌梁素海流域年均农业灌溉引水量在45亿m³左右^[11],同时流域内农田灌溉方式长期以地面灌溉(畦灌)为主.研究显示,流域小麦—玉米间作平畦灌溉平均水分利用效率仅为1.18kg/m³,水分利用效率低下^[12-13],增加了养分的淋洗效率.Yang等^[14]的研究指出,在砂质农田地区,减少氮肥和灌溉水的投入以减轻硝酸盐的积累和淋失具有很大的潜力.常菲等^[15]的研究表明,同一改良措施下氮挥发损失率滴灌比漫灌降低10.7%~31.0%.张忠学等^[16]的研究指出,氮素盈余量和表观损失量随灌水量的增加表现为先降低后增加.另外,适宜的减量施肥可从源头控制养分流失^[17],减少土壤养分盈余量^[18],避免因肥料过剩随水流失,从而改善农田水土环境.张忠学等^[16]的研究还表明,增加施氮量可以提高土壤无机氮残留量和氮素盈余,而作物氮素吸收量随着施氮量的

增加呈先增后减的趋势。此外,流域常年在秋收后秋浇前时期采用铧式犁翻耕土地的耕作方式,导致犁底层变硬,土壤保水保肥能力下降^[19]。有研究指出,不同的耕作方式对区域土壤水热盐及作物生长^[20]、作物产量^[21]和土壤养分的流失^[22]均会产生不同的影响。综上,乌梁素海流域同时存在灌水量、施肥量和耕作方式不合理的问题,导致大量养分在土壤积累并渗漏到地下水,最终排入乌梁素海,导致湖泊水质恶化。然而,当前农田管理的研究主要侧重于单个因素的田间试验^[13-15,22],多个农田管理因素交互作用的研究较少。另外,鲜有不同灌期削减灌水量因素对污染物负荷差异方面的研究。

作为对区域水文与营养物定量描述使用最多和最为有利的工具^[23-24],SWAT(soil and water assessment tool)分布式水文模型具有一定的物理基础,充分考虑地域空间异质性,是研究灌区水量平衡与养分流失及其转化关系行之有效的手段^[25-27]。大量学者根据灌区自身特性对 SWAT 模型进行了针对性的改进,并对灌区的水文及污染物负荷进行了模拟且得到了较好的模型性能^[25-26,28]。Xiong 等^[28-29]介绍了用于模拟干旱地下水浅埋灌区的改进 SWAT-AG 模型,提供了模拟土壤盐分运动和盐胁迫对作物生长影响的功能,但该改进模型仅验证了径流和盐分模拟,未对水质模拟进行测试评价,且模拟验证时段较短,缺少长时间序列的模拟。王维刚等^[30]利用遥感订正灌区作物种植结构数据,有效提高了 SWAT 模型在灌区的模拟精度。SWAT 模型通过设置灌水量、施肥量及耕作方式等能够模拟不同农田管理情景对区域营养物负荷和作物产量的影响^[22,31-32]。然而,以往学者多以农田尺度为研究对象^[13-15],研究中存在较多限制,如单一作物研究、设置处理偏少、研究时段较短。基于 SWAT 模型模拟综合考虑了多种作物类别及区域空间异质性因素。此外,利用 SWAT 模型能够定量计算出灌区内排水沟营养物的流入量,可从源头控制乌梁素海入湖污染物负荷量。

基于以上问题,本文在 Xiong 等^[28-29]改进 SWAT 模型及王维刚等^[30]订正作物种植结构数据的基础上,以乌梁素海流域为研究区,利用红圪卜扬水站排水量、硝态氮和总磷排放实测值、地下水埋深及作物产量率定和验证改进的 SWAT 模型,并在模型验证后模拟分析不同农田管理情景(削减灌水量、施肥量、优化耕作方式及 3 者组合方案)对 3 种作物(玉米、葵花和小麦)种植下的硝态氮和总磷负荷及产量的影响,以期确定基于经济与环境角度的最优灌溉—施肥—耕作方案,从源头减少乌梁素海流域面源污染及提升乌梁素海水水质状况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌梁素海流域(40°15′~41°18′N,106°20′~109°19′E)位于内蒙古西部黄河流域中间地带(巴彦淖尔市境内)(图 1),平均海拔为 1024 m,属于大陆性季风气候,年平均最低温度与最高温度分别为-10 和 23℃;年降雨量平均仅为 145~216 mm,其中 80% 发生在 6—8 月,年内潜在蒸发量达 2200~2400 mm,是典型的干旱—半干旱地区。乌梁素海作为全球干旱地区极为少见的大型多功能草原湖泊,承担着重要的水文和生态功能。河套灌区处在乌梁素海流域腹地,灌区主要种植作物为玉米、葵花和小麦,插花种植结构在农田生态系统中普遍存在,作物分布较为破碎散乱。灌区主要灌水方式为畦灌,分春灌(4 月中旬)、夏灌(5—9 月)和秋浇(10 月中旬—11 月中旬)3 个灌水时期。不同作物施肥模式主要是播种期施入底肥(磷酸二铵),生育期追肥(尿素);主要耕作方式采用在秋收后秋浇前阶段利用铧式犁翻耕。研究区流域边界由 SWAT 模型根据排水渠系及数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据定义得出(表 1),主要包括解放闸灌域(西)、永济灌域(中)及义长灌域(东)3 个部分,流域内的农田退水总体经 1 至 7 排干沟汇集于总排干沟最终从研究区总出口红圪卜扬水站排入乌梁素海。流域近 20 年平均引水量和平均排水量分别为 45.49 亿和 3.44 亿 m³。“灌溉—入渗—排水”已成为导致乌梁素海流域农业面源污染及乌梁素海水环境恶化的主要驱动力。

1.2 SWAT 模型介绍及改进 SWAT 模型简述

SWAT 模型通过建模模拟流域内产水、产沙、营养物质循环等物理过程的发生。模型进行水文、水质模拟可划分为 2 个阶段:1)控制子流域水流、营养物等向主河道输入的陆地阶段;2)流域河网中水流、营养物等向出水口运移的水文、营养物质循环汇流阶段。本研究通过第 2 阶段利用流域出口水量水质排放实测值对 SWAT 模型进行校准和验证,通过第 1 阶段对 HRU 向主河道输入的营养物质进行了模拟。

改进 SWAT 模型是为加强干旱地下水浅埋灌区水文建模而开发,最早由 Xiong 等^[28-29]采用 SWAT 2012 原始版本,对土壤水平衡、溶质平衡、地下水平衡和植物生长等模块进行了修改。针对毛管上升水的模拟,在

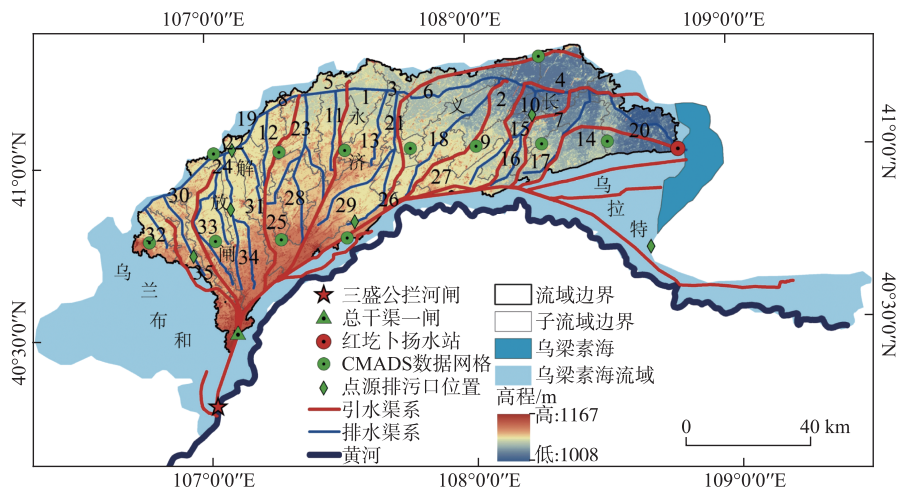


图1 研究区子流域划分(图内数字1~35为子流域编号)

Fig.1 Sub watershed diversion of study area

SWAT 源程序中新添加一个 subroutine capriw, 该子程序用于计算每一层土壤的毛管上升水量; 同时修改 subroutine swbl, 使得土壤水平衡模拟包含了毛管上升水部分. 针对地表覆盖影响, 修改 subroutine etact, 用于修正潜在土壤蒸发量. 针对土壤盐分平衡模拟, 在源程序中新添加一个 subroutine solsr, 该子程序用于计算每一层土壤的盐分储量. 针对盐分胁迫模拟, 在源程序中新添加一个 subroutine sstr, 该子程序用于估算作物盐分胁迫系数; 同时, 修改 subroutine grow, 使得作物的生长考虑了盐分胁迫. 针对地下水平衡模拟, 在源程序中新添加一个 subroutine gwbl, 包含用于计算地下水储量变化的各水平衡项; 同时, 在源程序中新添加一个 subroutine chanleag 和 subroutine draingw, 分别用于计算渠道向地下水的渗漏量和地下水向排水沟的排水量.

1) 基于 HRU 尺度的土壤水平衡模块增加了地下水向上毛管上升水, 使得土壤水平衡方程按如下公式计算:

$$SW_{j+1} = SW_j + (1 + P + CR_{iz} - D - L - ET - R) \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中, SW_j 为第 j 天的土壤储水量 (mm); I 为灌溉量 (mm/d); P 为降雨量 (mm/d); CR_{iz} 为来自非饱和带的毛管上升水; D 为深层渗漏量 (mm/d); L 为侧向流量 (mm/d); ET 为实际蒸散发量 (mm/d); R 为地表径流量 (mm/d); Δt 为时间步长 (d).

2) 增加了 2 种农艺措施包括耕地田埂和地表覆盖, 用于限制农田灌水进行地表径流和减少土壤蒸发.

3) 基于土壤水平衡, 增加了一个多层土壤盐平衡模块, 用于模拟土壤剖面中的盐分运动并计算土壤储盐量. 各土壤层的盐分平衡方程如下:

$$S_i^{j+1} = S_i^j + (I \cdot C_{IR} + CR_i \cdot C_{i+1} - D_i \cdot C_i - L_i \cdot C_i) \cdot \Delta t \quad (i = 1) \quad (2)$$

$$S_i^{j+1} = S_i^j + \left[D_{i-1} \cdot C_{i-1} + \left(\sum_{l=1}^i CR_l \right) \cdot C_{i+1} - \left(\sum_{l=1}^{i-1} CR_l \right) \cdot C_i - D_i \cdot C_i - L_i \cdot C_i \right] \cdot \Delta t \quad (2 \leq i \leq NL) \quad (3)$$

式中, 下标 i 表示第 i 层土壤, NL 为土壤层总数; S 为土壤盐分储量 (g/m^2); C_{IR} 为灌溉水盐分浓度 (g/L); C 为土壤层盐分浓度 ($i = NL$ 时, C_{i+1} 为过渡区盐分浓度) (g/L).

过渡区的盐分平衡公式如下:

$$TS^{j+1} = TS^j + (D_{NL} \cdot C_{NL} - D_{iz} \cdot C_{iz} + CR_g \cdot C_g - CR_{iz} \cdot C_{iz}) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中, TS 为过渡区的盐分储量 (g/m^2); D_{NL} 为过渡区的深层渗漏量 (mm/d); D_{iz} 为实际毛管上升水量 (mm/d); C_g 为地下水盐分浓度 (g/L).

4) 基于 HRU 尺度引入盐分胁迫因子 (K_s) 结合水分胁迫 ($strss_w$) 来限制作物蒸散量 (E_{is}).

$$E_{is} = E_t \cdot K_w \cdot K_s \quad (5)$$

式中, E_{is} 为实际植物蒸腾量 (mm/d); E_i 为潜在植物蒸腾量 (mm/d); K_w 为水分胁迫系数.

5) 针对相应子流域的浅层含水层, 增加了一个地下水平衡模块, 用于估算子流域尺度上的地下水储量变化, 并进一步计算出 HRU 尺度上每日地下水埋深, 用于计算地下水毛管上升水.

$$\Delta GW_k^j = (D_k^j + CS_k^j) \cdot (1 - e^{-1/\delta_{gw}}) + (D_k^{j-1} + CS_k^{j-1}) e^{-1/\delta_{gw}} - CR_{g,k}^{j-1} - Q_{g,k}^{j-1} - Q_{p,k}^{j-1} \quad (6)$$

$$\Delta GW_{sub}^j = \frac{\sum (\Delta GW_k^j \cdot A_k)}{\sum A_k} \quad (7)$$

$$GWD_k^{j+1} = GWD_k^j - \frac{\Delta GW_{sub}^j}{S_y} \quad (8)$$

式中, 下标 k 表示子流域中第 k 个 HRU; ΔGW 为 HRU 的地下水储量变化 (mm/d); CS 为渠系渗漏量 (mm/d); Q_g 为排水量 (mm/d); Q_p 为水井抽取的水量 (mm/d); δ_{gw} 为地下水补给延迟时间; ΔGW_{sub} 为子流域的地下水储量的变化 (mm/d); A_k 为 HRU 的面积 (m^2); GWD 为地下水埋深 (mm); S_y 为给水度 (-).

详细的模型改进方法的介绍见文献[28-29].

1.3 模型构建与校正及验证

1.3.1 研究区数据及模型构建 改进 SWAT 模型需要输入的数据包括空间数据库和属性数据库(表 1). 为获得流域真实水系及子流域划分, 研究采用结合 Burn-in 算法与预定义子流域的方法. 具体划分方法按以下 3 步进行: 1) 通过 Burn-in 功能添加由 Google earth 软件绘制好的矢量水系, 进行子流域划分; 2) 以划分后的子流域边界及数量为依据, 与流域实际灌排渠系进行对照, 以此预定义符合流域实际的子流域边界及位置; 3) 结合提取的河网属性赋予流域实际子流域属性信息. 研究区划分得到 35 个子流域(图 1). 采用 Landsat 8 OLI (30 m×30 m) 遥感数据对流域耕地部分作物进行分类提取, 并与无作物分类的原土地利用类型图融合得到具有作物分类的土地利用类型图, 订正了模型输入的作物种植结构数据^[30]. 根据研究区订正后土地利用分布图(图 2a)和土壤类型分布图(图 2b)离散化得到 638 个水文响应单元. 其中土壤属性数据利用 SPAW 6.02.70 软件计算得到; 研究区出口月实测排水数据、硝态氮和总磷排放数据、作物产量数据及月平均地下水埋深数据用于模型的率定和验证. 将畜禽养殖粪尿和农村生活污水产生的污染概化后转化为化肥以连续施肥的方式施用到相应子流域的耕地中进行模拟计算, 将城镇生活污水及工业排污产生的污染概化后以点源的形式输入 SWAT 模型中. 研究核算的点源污染排放共包括 7 个污水处理厂(图 1), 各排污口多年平均点源总磷排放量共 28839.5 kg, 占红圪卜扬水站总排放量的 4.3% (不包括乌拉特前旗排污口); 各排污口多年平均点源硝态氮排放量共 514481.9 kg, 占总排放量的 16.2%. 输入研究区气象数据、灌水参数、施肥参数建立 SWAT 模型, 其中农田管理措施中的灌水参数与施肥参数数据基于本研究前期成果^[30].

表 1 模型构建所需数据及数据来源
Tab.1 Data types and sources for model establishment

数据类型	数据精度	数据来源
数字高程模型	30 m×30 m	地理空间数据云
土壤栅格数据	1 : 1000000	寒旱区科学数据中心
土壤数据库	—	寒旱区科学数据中心
气象数据	(2008—2018 年) 每日	寒旱区科学数据中心
2018 年土地利用	30 m×30 m	资源环境数据云平台
2018 年耕地作物数据	30 m×30 m	Landsat 8 OLI 遥感数据裁剪
实测排水量、硝态氮和总磷排放数据	(2009—2018 年) 每月	河套灌区水利发展中心供排水管理处
实测地下水埋深数据	(2009—2017 年) 每月	河套灌区水利发展中心供排水管理处
实测灌区作物产量数据	2010—2017 年	巴彦淖尔市农牧业局及当地统计年鉴
畜禽养殖及农村生活污水	2009—2018 年	巴彦淖尔市统计年鉴
点源污染数据	(2010—2018 年) 每月	河套灌区水利发展中心供排水管理处
灌溉排水渠系	—	Google Earth

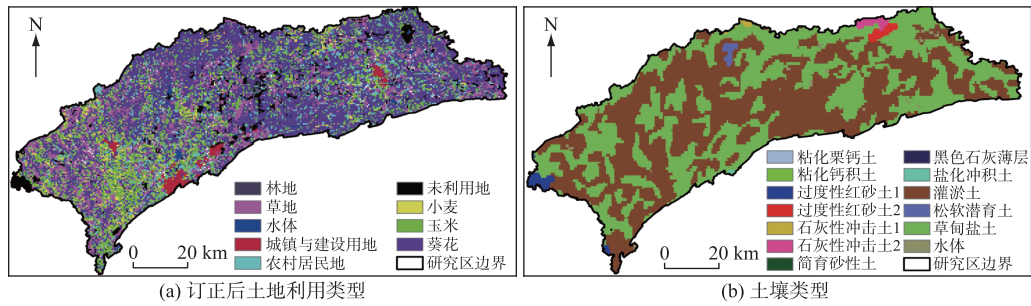


图 2 研究区土地利用类型及土壤类型空间分布
Fig.2 Spatial distributions of land use type and soil type of study area

1.3.2 模型校正及验证 模型构建后需要采用实测数据对其进行校正及验证. 本文采用流域出口红圪卜扬水站实测月排水、硝态氮和总磷排放数据、月平均地下水埋深数据及研究区作物产量数据对模型进行校正及验证. 采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI 2(Sequential Uncertainty Fitting version 2) 算法^[33] 及反复试错法对模型参数进行率定. 本研究依据前期研究成果^[30] 及乌梁素海流域已有研究^[29], 以 2008 年作为模型预热期, 利用研究区出口 2009—2014 年径流、硝态氮和总磷监测数据对敏感参数进行率定校正模拟过程, 经率定确定敏感参数取值后, 利用 2015—2018 年监测数据对模拟过程进行验证. 以 2009—2014 年研究区实测月平均地下水埋深数据对模型进行率定, 利用 2015—2017 年数据对模型进行验证. 以 2010—2014 年 3 种作物实测产量数据对模型进行率定, 确定作物生长参数取值后, 利用 2015—2017 年数据对模型进行验证. 模型在划分流域边界时主要包括杭锦后旗、临河区和五原县 3 个行政区, 因此每一种作物的产量实测数据采用这 3 个区域的产量和对应种植面积的加权平均值. 本文采用相对误差 (relative error, RE)、决定系数 (R^2) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_m) 来评估模拟效率^[34].

1.4 农田管理措施情景设计

1.4.1 灌溉管理措施情景 基于乌梁素海流域现有的灌溉模式和主要种植作物, 选择玉米、葵花和小麦 3 种作物. 流域主要灌水时期分为春灌期、夏灌期和秋浇期. 春灌期一般在 4 月中旬左右, 主要灌溉玉米和小麦, 而葵花在 4 月中旬一般不灌溉, 第 1 次灌水在 5 月 20 日左右. 流域现状灌水量主要通过当地农民常年灌水习惯实地调查综合分析得到, 调查年份为 2016 年 (平水年). 根据屈忠义等^[11] 在 2015 年对不同水平年降雨量的分析成果可知, 本研究连续模拟的 10 年中仅 2012 年为丰水年, 平水年分别为 2010、2014、2015、2016 和 2018 年, 枯水年分别为 2009、2011、2013 和 2017 年. 以乌梁素海流域推广农用节水并保证作物产量为目标, 通过削减不同灌期作物灌水量以减少营养物负荷. 研究对 3 种作物不同灌期分别减少作物年灌溉定额的 5%、10%, 折算到作物各个灌期设计灌水量处理中, 每种作物各 6 个情景 (I1~I6), 共 18 个灌水情景 (表 2).

表 2 灌溉管理措施中不同灌期玉米、葵花和小麦的灌溉水平

Tab.2 Irrigation levels of maize, sunflower and wheat in different irrigation periods in irrigation management measures

灌溉情景	玉米	葵花	小麦
春灌减 5%	I1[150(118.5)]	I1[150(129)]	I1[100(71)]
夏灌减 5%	I2[300(268.5)]	I2[120(99)]	I2[300(271)]
秋浇减 5%	I3[180(148.5)]	I3[150(129)]	I3[180(151)]
春灌减 10%	I4[150(87)]	I4[150(108)]	I4[100(42)]
夏灌减 10%	I5[300(237)]	I5[120(78)]	I5[300(242)]
秋浇减 10%	I6[180(117)]	I6[150(108)]	I6[180(122)]

[] 内数字表示作物对应灌期现状灌水量, mm; () 内数字表示作物对应灌期削减后灌水量, mm.

1.4.2 施肥管理措施情景 基于乌梁素海流域现有的施肥水平,以保证 3 种作物产量为目标,通过削减作物氮磷施肥量以减少营养物负荷,对 3 种作物分别设置 4 个施肥水平削减方案(分别较现状氮磷施肥量削减 10%、20%、25% 和 30%),每种作物各 4 个情景(F1~F4),共计 12 个施肥情景(表 3)。

表 3 施肥管理措施中玉米、葵花和小麦的氮、磷施肥水平*

Tab.3 Nitrogen and phosphorus fertilization levels of maize, sunflower and wheat in fertilization management measures

施肥情景	玉米	葵花	小麦
现状施肥水平	485:345	243:173	388:276
施肥量削减 10%	F1(437:317)	F1(219:156)	F1(349:248)
施肥量削减 20%	F2(388:276)	F2(194:138)	F2(310:221)
施肥量削减 25%	F3(364:259)	F3(182:130)	F3(291:207)
施肥量削减 30%	F4(340:242)	F4(170:121)	F4(272:193)

* 比号前后分别表示氮、磷施用量(均为折算后的纯施用量),kg/hm²。

1.4.3 耕作管理措施情景 基于乌梁素海流域常年耕作方式,采用免耕、少耕、常规春耕和模板犁 4 种耕作处理(T1~T4),研究其对 3 种作物营养物负荷及作物产量的影响。4 种耕作处理对于营养物再分配所需的混合深度与混合效率见表 4,均采用模型默认值,表现出模板犁>常规春耕>少耕>免耕,混合效率指由混合深度指定的整个土壤深度范围内,均匀混合的土壤表面营养物、秸秆等所占分数,剩余部分留在原处(土壤表面或土层)。

表 4 耕作管理措施中考虑的耕作
方案及其相关参数

Tab.4 Farming schemes and related parameters considered in farming management measures

编号	耕作措施	混合深度/mm	混合效率
T1	免耕	25	0.05
T2	少耕	100	0.25
T3	常规春耕	125	0.5
T4	模板犁	150	0.95

1.5 HRU 尺度营养物流失及作物产量分析和计算方法

使用验证后的改进 SWAT 模型对 2009—2018 年现状

情景及对每种作物设置的 6 个灌溉情景、4 个施肥情景与 4 个耕作情景进行了模拟。现状情景模拟指利用验证后的 SWAT 模型在流域现状农艺措施条件下对研究区进行的第 1 次模拟。针对研究设置的每个管理情景,模型在同一时期(2009—2018 年)运行,以计算该管理措施实施后的硝态氮、总磷及作物产量的模拟值。由于乌梁素海流域不同作物的灌溉、施肥存在差异,且流域的种植比例相差很大,仅仅计算不同作物营养物流失总量不足以说明问题,也不方便进行对比分析。因此,本文通过计算不同作物单位面积的营养物流失量来描述乌梁素海流域营养物流失情况,用流失强度 L 表示,单位为 kg/hm²。模拟结果可获得流域内各 HRU 尺度上某一土地覆盖条件下营养物由陆面向排水沟的迁移量(即 SWAT 模型的陆地阶段)或土地覆盖作物产量,特定作物多年平均营养物流失量及产量按式(9)计算。不同管理措施对营养物流失或作物产量的影响以相比于现状情景下各营养物多年平均流失量或作物产量的百分比变化表示,如式(10)所示。

$$L_{CN} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \left[\frac{\sum_{j=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ci} \cdot l_{mi})}{\sum_{i=1}^n A_{ci}}}{\sum_{i=1}^n A_{ci}} \right] \quad (9)$$

$$R = \frac{\text{preBMP} - \text{postBMP}}{\text{preBMP}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, L_{CN} 表示某一特定作物多年平均营养物流失量或作物产量,kg/hm²; A_{ci} 表示模拟期内某年某月对应特定作物所在 HRU 的面积,km²; l_{mi} 表示模拟期内某年某月对应特定作物所在 HRU 的营养物流失量或作物产量,kg/hm²; n 表示特定作物所在 HRU 的数量; j 表示年内模拟月; k 表示模拟年。 R 表示变化率(%),正值表示与初始条件相比减少了输出,负值表示与初始条件相比增加了输出。 preBMP 表示现状情景下年平均营养物流失量,kg/hm²; postBMP 表示实施农田管理措施后的年平均营养物流失量,kg/hm²。

1.6 HRU 尺度硝态氮与总磷模拟值计算方法

改进的 SWAT 模型经校准验证后需要根据设计好的农田管理措施情景对 HRU 尺度不同营养物的输出负荷进行模拟,而在 HRU 尺度上没有直接对应的硝态氮和总磷输出量,因此将模型输出的各路径硝态氮和各形态磷元素加和作为总负荷,其中模拟出的硝态氮负荷计算如下所示:

$$\text{NO}_3 = \text{NSURQ} + \text{NLATQ} + \text{NO}_{3\text{GW}} \quad (11)$$

式中, NO_3 为硝态氮总负荷, kg/hm^2 ; NSURQ 为地表硝态氮负荷, kg/hm^2 ; NLATQ 为侧向硝态氮负荷, kg/hm^2 ; $\text{NO}_{3\text{GW}}$ 为地下硝态氮负荷, kg/hm^2 .

磷元素包括有机磷、地表与地下可溶性磷总量,模拟出的总磷负荷计算如式(12)所示:

$$\text{P} = \text{ORGP} + \text{SOLP} + \text{P}_{\text{GW}} \quad (12)$$

式中, P 为总磷负荷, kg/hm^2 ; ORGP 为有机磷负荷, kg/hm^2 ; SOLP 为地表可溶性磷负荷, kg/hm^2 ; P_{GW} 为地下可溶性磷负荷, kg/hm^2 .

2 结果与分析

2.1 模型敏感参数及取值

如表 5 所示,研究选取的与径流及地下水相关的敏感参数参照了乌梁素海流域已有研究^[29]及本研究前期成果^[30],其敏感参数取值与 Xiong 等^[29]的研究结果有所不同,可能是由于本文用于参数率定的实测数据时间序列较长的缘故.另外,为限制研究区耕地地表径流,研究将耕地部分的地表径流曲线数 CN 值设置为 0.5.硝态氮敏感参数依照前期研究成果选取后进行率定,研究发现,本研究中的硝态氮敏感参数排序与前期研究成果相同,仅在取值上与前期研究稍有变动,说明乌梁素海流域硝态氮敏感参数相对较稳定.研究最终选取了 7 个总磷敏感参数,敏感性排名前 3 的分别是磷渗流系数、磷土壤分配系数和磷可利用率指数,这表明了乌梁素海流域磷的迁移转化主要是在土壤(陆地区域)进行的,而在河道内各形态磷的循环转化活性相对较差.研究中关于作物生长的参数选取及取值参照了 Xiong 等^[28-29]的研究结果,共选取 6 个作物生长敏感参数.模型中需要输入的其他参数及取值均依照文献[29].

2.2 SWAT 模型模拟结果及效率评价

应用改进的 SWAT 模型经过反复率定确定了各参数的最优取值后,最终计算得到长时间序列的径流、硝态氮、总磷、月平均地下水埋深和作物产量的模拟评价指标(表 6).由表 6 可以看到,各变量在率定期和验证期的决定系数 $R^2 \geq 0.6$,效率系数 $E_{\text{ns}} \geq 0.5$,相对误差 RE 的绝对值均低于 20%,满足 SWAT 模型校准评价标准.由此可知,通过合理地参数率定,改进后的 SWAT 模型具有良好的模拟效果,能够较好地反映乌梁素海流域排沟流量、硝态氮与总磷排放量、地下水埋深动态及作物产量.本研究显示,改进 SWAT 模型能够较好地模拟硝态氮和总磷流失量,这是因为施肥是导致氮素和磷素流失的重要因素,灌水是氮磷流失的必要条件.因此,成功地模拟灌区水循环为较好地模拟氮磷流失创造了有利条件^[35].

如图 3 所示,模型模拟的研究区出口月径流过程、月硝态氮与月总磷排放过程和月平均地下水埋深同实测结果具有较好的一致性,但径流模拟的峰值总体上要略高于实测的峰值,说明模型的地表产流调蓄模拟方面要高于实际情况.本研究基于 HRU 尺度模拟结果获取了地下水埋深空间分布(图 4),以 2016 年为例,改进 SWAT 模型模拟的地下水埋深空间分布与实测地下水埋深空间 Kriging 插值图总体上具有较好的一致性,能够较好地反映灌区地下水埋深的空间特征.如图 5 所示,研究区 8 年作物产量模拟值与实测值基本分布在 1:1 线附近,作物产量较其他指标具有更好的模拟性能,这是由于研究中利用遥感技术精准的提取灌区作物种植结构数据,从而优化了作物参数的模拟.模拟过程中发现,除硝态氮外,其余变量的验证期精度均略高于率定期,由于乌梁素海流域水文水质及作物指标模拟受灌水量、施肥量及作物种植结构数据等因素影响很大,考虑到 3 方面因素使得验证期精度高于率定期精度.一方面,验证期的灌水量、施肥量参数及作物种植结构数据模型输入值较率定期更接近于灌区的实际数据,从而模拟精度更高;另一方面,验证期模拟时段长度小于率定期,用于率定期的数据量多于验证期的数据量,在一定程度上降低了率定期模拟精度;最后,因所选土地利用(包括种植结构数据)为 2018 年,与验证期更为接近,在一定程度上提高了验证期模拟精度.总的来说,改进 SWAT 模型能够有效地模拟乌梁素海流域的径流、氮磷营养物负荷、地下水埋深动

态及作物产量.

表 5 径流、地下水埋深、硝态氮、总磷及作物生长敏感参数及取值*
Tab.5 Sensitive parameters and values of runoff, groundwater depth, nitrate nitrogen,
total phosphorus and crop growth

参数类别	排序	参数	率定方式	最小值	最大值	最终值		
径流及地下水参数	1	地下水延迟系数	v	—	—	1		
	2	土壤蒸发补偿系数	v	0.83	0.86	0.84		
	3	植物蒸腾补偿系数	v	0.79	0.84	0.82		
	4	给水度	v	0.04	0.11	0.09		
	5	第一层土层有效含水率	v	0.06	0.17	0.161	0.15	
	6	SCS 径流曲线数	v	0.5	62	(灌淤土)	62	(草甸盐土)
硝态氮参数	1	降雨中氮浓度	v	10.87	14.92	14.37		
	2	硝酸盐渗流系数	v	0.72	0.88	0.76		
	3	反硝化指数速率系数	v	1.19	1.89	1.52		
	4	河段有机氮沉降速率	v	0.01	0.05	0.05		
	5	河段中从 NO ₂ 向 NO ₃ 的生物氧化速率常数	v	0.31	1.49	1.31		
	6	河段底栖生物提供氨氮的速率	v	0.47	0.66	0.56		
	7	泥沙运移中有机氮的富集比	v	2.67	3.73	3.12		
总磷参数	1	磷渗流系数	v	10.53	13.24	12.87		
	2	磷土壤分配系数	v	135.07	153.23	149.52		
	3	磷可利用率指数	v	0.52	0.91	0.64		
	4	河段有机磷的沉降速率	v	0.031	0.057	0.049		
	5	河段有机磷向可溶性磷的矿化速率常数	v	0.23	0.39	0.36		
	6	河段底栖生物提供可溶性磷的速率	v	0.036	0.054	0.048		
	7	藻体磷占藻类生物量的分数	v	0.013	0.016	0.015		
作物参数						玉米	葵花	小麦
	1	潜在叶面积指数	v	0	12	4.5	3.7	6.8
	2	叶面积开始减少时植物生长时间占生长季的分	v	0	1	0.68	0.69	0.56
	3	植物生长的基温	v	—	—	8	6	0
	4	单位土壤饱和和浸提液电导率值造成的衰减	v	—	—	6	6	4.5
	5	发生盐胁迫时土壤饱和和浸提液电导率	v	—	—	6	10.5	4
	6	盐度胁迫的影响因子	v	—	—	1.25	0.95	1.05

* v 指模型参数默认值被率定值取代.

表 6 径流、地下水埋深、硝态氮、总磷和作物产量模拟校验效率评价
Tab.6 Evaluation of the efficiency of runoff, groundwater depth, nitrate nitrogen,
total phosphorus and crop yield simulation verification

评价 指标	径流		硝态氮		总磷		地下水埋深		作物产量	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
R^2	0.77	0.82	0.71	0.64	0.63	0.66	0.75	0.76	0.94	0.94
E_{ns}	0.71	0.80	0.57	0.55	0.55	0.61	0.67	0.70	0.93	0.94
$RE/\%$	3.90	-0.50	10.78	0.49	9.32	-8.21	4.20	2.90	3.22	2.41

2.3 削减灌水量对不同作物营养物负荷及产量的影响

利用验证后的改进 SWAT 模型对不同种植作物现状灌溉情景及设置的 6 种灌溉削减情景进行模拟并计

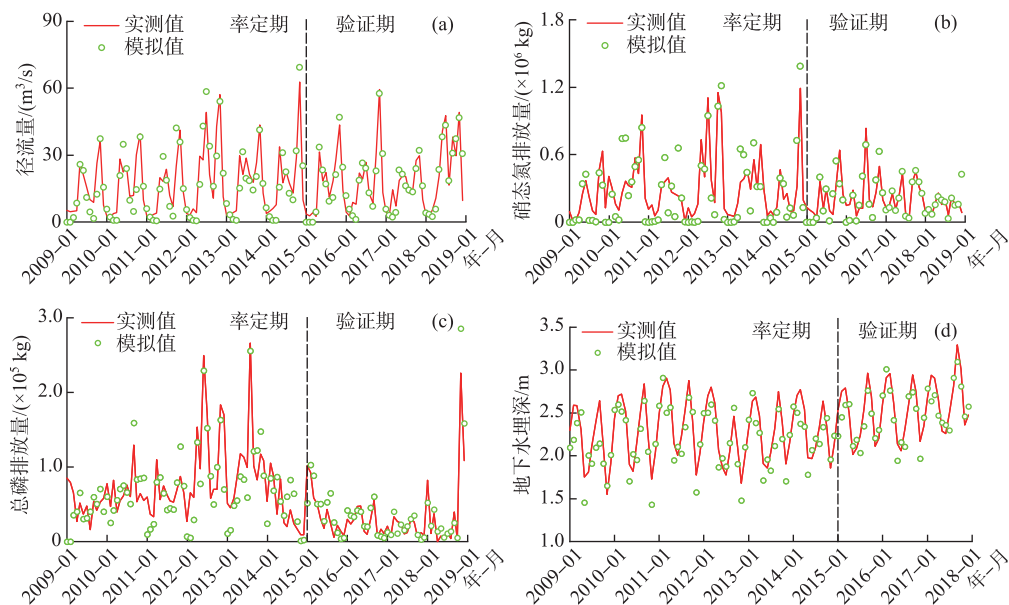


图3 研究区出口径流量(a)、硝态氮排放量(b)和总磷排放量(c)及地下水埋深(d)模拟值与实测值的月际动态

Fig.3 The monthly dynamics of the simulated and measured values of the outlet runoff (a), nitrate nitrogen emissions (b) and total phosphorus emissions (c) and groundwater depth (d) in the study area

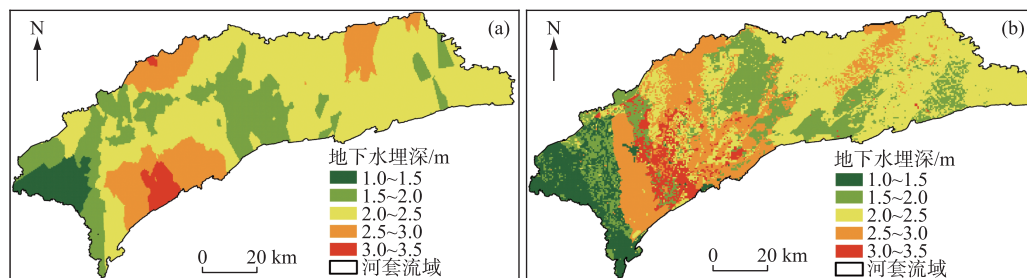


图4 研究区 2016 年地下水埋深空间 Kriging 插值(a)与模型模拟(b)的空间分布

Fig.4 Spatial Kriging interpolation (a) and model simulation (b) spatial distribution of groundwater depth in the study area in 2016

算分析,得到了不同灌期灌水量削减情景下的硝态氮、总磷和作物产量结果(图6)。总体上看,不同作物各营养物负荷指标和产量对削减灌水量管理的响应规律存在差异。玉米种植条件下(图6a),削减不同灌期灌水量可显著(除了I1处理不显著)降低硝态氮负荷量8.2%~17.4% ($P<0.05$),其中削减10%秋浇水量(I6)降低幅度最大。削减不同灌期灌水量可降低玉米地总磷负荷量4.7%~9.3%,但差异并不显著($P=0.295$)。削减不同灌期灌水量对玉米产量的影响存在差异,其中削减5%夏灌水量(I2)可显著增加玉米产量10.32% ($P<0.05$),而削减10%夏灌水量(I5)则显著降低玉米产量15.16% ($P<0.05$),其余处理不显著($P>0.05$)。

葵花种植条件下(图6b),削减不同灌期灌水量可显著(除了I1、I4处理不显著)降低硝态氮负荷量8.8%~20.8% ($P<0.05$),其中I6处理降低幅度最大。削减不同灌期灌水量仅I5和I6处理显著降低总磷负荷量13.2%和14.1% ($P<0.05$),其余处理不显著。削减5%夏灌水量(I2处理)可使葵花产量增加最多达4.3%,而I5处理则使葵花产量减少最多达8.2%,但差异均不显著($P>0.05$)。

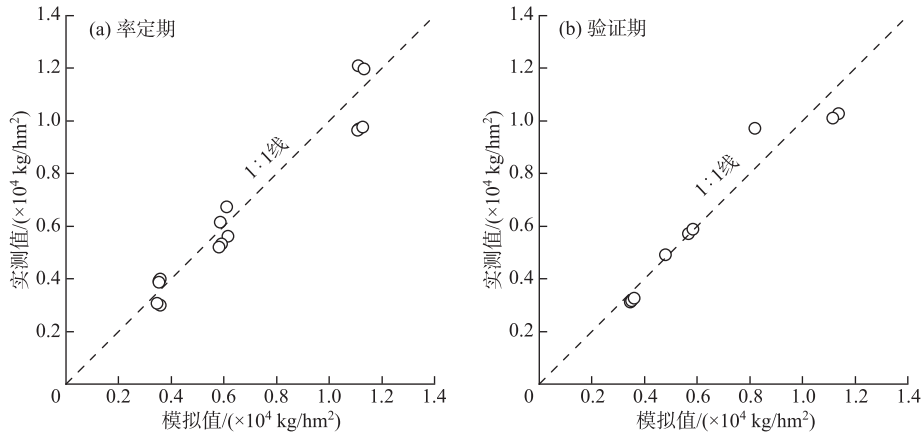


图 5 研究区内作物产量模拟值与实测值对比

Fig.5 Comparison of simulated and measured crop yields in the study area

小麦种植条件下(图 6c),削减不同灌期灌水量可显著(除了 I2 处理不显著)降低硝态氮负荷量 8.1%~11.2%,其中 I6 处理降低幅度最大. 削减不同灌期灌水量可降低小麦地总磷负荷量 5.4%~10.1%,但差异并不显著($P=0.202$). 削减不同灌期灌水量对小麦产量的影响存在差异,其中 I2 处理可显著增加小麦产量 8.41%($P<0.05$),I5 处理可显著降低小麦产量 16.85%($P<0.05$),其余处理不显著($P>0.05$). 综上可知,不同作物削减 10% 秋浇水量(I6 处理)均最大幅度降低硝态氮、总磷负荷量,表明了秋浇作为年内短时间灌水量最大的一次灌水,其对农业面源污染的影响也是最严重的^[6,36]. 此外,对比作物灌水量削减比例(5% 和 10%)可以发现,适当地减少作物灌水量可以提高作物产量.

2.4 削减施肥比例对作物营养物负荷及产量的影响

削减不同氮磷施肥比例对玉米、葵花和小麦营养物流失量及产量动态变化如图 7 所示. 整体来看,不同作物氮磷营养物负荷指标和作物产量对削减不同比例施肥量的响应规律相似. 各作物营养物负荷量均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现逐渐降低的趋势,且下降曲线具体表现为由陡变缓. 各作物产量均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现先增后减的趋势. 玉米种植条件下,削减 20%~30% 氮磷施肥比例可显著降低硝态氮负荷量 11.3%~15.2%($P<0.05$),削减不同比例施肥量可降低总磷负荷量 4.3%~9.2%,但差异并不显著($P=0.114$). 削减 20% 氮磷施肥量(F2)可显著增加 8% 玉米产量,削减 30% 氮磷施肥比例(F4)显著减少了 10.46% 玉米产量($P<0.05$).

葵花种植条件下,削减不同氮磷施肥比例对硝态氮和总磷负荷量均无显著性影响($P>0.05$). 削减 25% 氮磷施肥比例(F3)可显著增加 10.26% 葵花产量,当施肥比例削减达 30% 时,葵花产量减少了 6.19%,但差异不显著($P>0.05$). 小麦种植条件下,削减 20%~30% 氮磷施肥比例可显著降低硝态氮负荷量 10.3%~14.4%($P<0.05$),削减不同比例施肥量可降低总磷负荷量 3.8%~8.1%,但均无显著性差异($P=0.198$). 削减 20% 氮磷施肥比例最多可增加 7.35% 小麦产量,但差异不显著($P>0.05$),随后产量开始下降,当氮磷施肥比例削减达 30% 时,小麦产量减少最多达 12.13%,且呈显著性差异($P<0.05$). 综上可知,各作物削减不同施肥比例对总磷负荷量均无显著影响. 对于硝态氮负荷与作物产量方面,玉米和小麦表现出相似的规律(增产节点均为 F2),而葵花的增产节点为 F3.

2.5 改变耕作方式对营养物负荷及作物产量的影响

改变耕作方式对玉米、葵花和小麦营养物流失量及产量动态变化如图 8 所示. 整体来看,不同耕作方式对各作物营养物负荷和产量的影响存在规律性差异. 免耕(T1)和少耕(T2)增加了各作物硝态氮和总磷负荷量,并减少了玉米和葵花产量;常规春耕(T3)和模板犁耕作(T4)可以降低各作物硝态氮和总磷负荷,并可增加玉米和葵花产量,对于小麦产量则表现出受耕作方式影响同玉米和葵花相反的规律. 玉米种植条件下,T1 显著增加了 14.8% 的硝态氮负荷量和 13.4% 的总磷负荷量,同时显著降低了 12.7% 的产量($P<0.05$).

T4 显著降低了 16.7% 的硝态氮负荷量和 11.9% 的总磷负荷量, 同时显著增加了 13.5% 的产量 ($P < 0.05$).

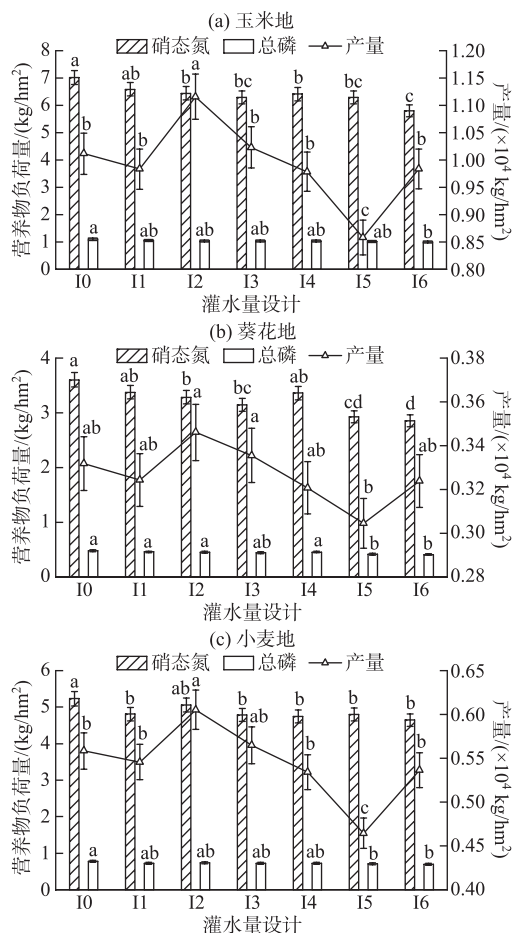


图 6 削减灌水量下不同作物营养物流失量及产量动态变化(不同小写字母表示处理间差异显著,误差线为标准误差,下同)

Fig.6 Nutrient loss and yield dynamic changes of different crops under reduced irrigation

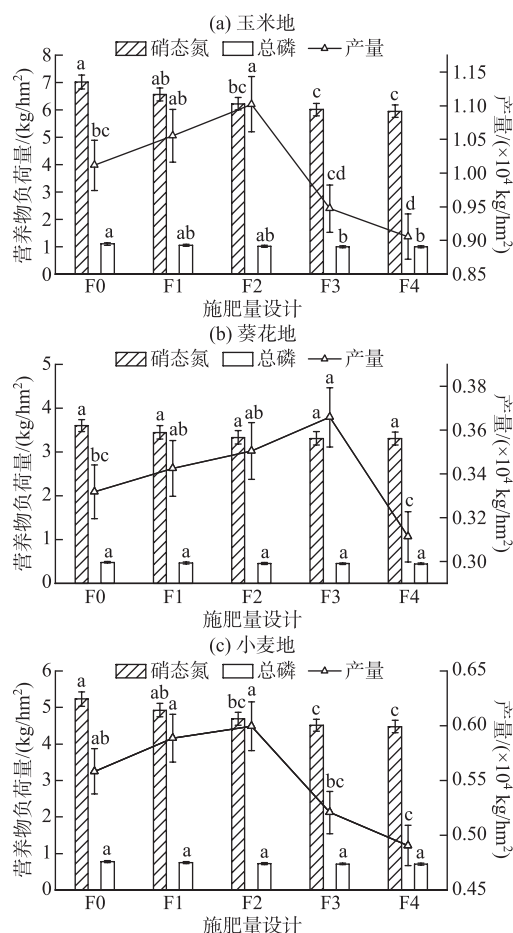


图 7 削减施肥量下不同作物营养物流失量及产量动态变化

Fig.7 Nutrient loss and yield dynamic changes of different crops under reduced fertilization

葵花地营养物流失与产量受耕作方式的影响规律与玉米相似, T1 显著增加了 16.9% 的硝态氮负荷和 15.2% 的总磷负荷, 同时显著降低了 9.3% 的葵花产量 ($P < 0.05$). T4 显著降低了 20.4% 的硝态氮负荷和 13.6% 的总磷负荷, 同时显著增加了 10.4% 的葵花产量 ($P < 0.05$). 小麦种植条件下, T1 显著增加了 18.8% 的硝态氮负荷和 16.1% 的总磷负荷, 同时显著增加了 10.9% 的产量 ($P < 0.05$). T4 显著降低了 15.2% 的硝态氮负荷和 10.1% 的总磷负荷, 同时显著降低了 11.8% 的产量 ($P < 0.05$). 综上可知, 玉米和葵花的营养物负荷随耕作混合深度与混合效率参数的增大逐渐减小, 而二者产量则随之逐渐增大. 对于小麦, 无论是营养物负荷还是产量均随着耕作混合深度与混合效率参数的增大呈减小趋势.

2.6 灌溉-施肥-耕作综合管理措施优选

尽管削减不同时期灌水量、减少施肥量或改变耕作方式均会对营养物流失及作物产量产生影响, 但单一管理措施改变在实际生产过程中很难达到经济与环境效益双赢的目标. 因此, 本研究中, 针对灌溉-施肥

一耕作选择出最优综合管理措施,优选原则为将每一种作物各因素管理措施中以保证增产减污双达标进行选择,以差异显著性分析为判别手段,最终优选出综合管理措施(表 7)。不同作物初选灌溉-施肥-耕作综合管理措施模拟的营养物负荷和产量动态变化如图 9 所示。玉米种植条件下,I2F2T4 与 I6F2T4 组合措施较现状组合措施均显著减少了硝态氮和总磷负荷($P<0.05$)。但在产量增幅方面二者有所差异,其中 I2F2T4 组合玉米产量较现状组合显著高 36.5%,I6F2T4 组合玉米产量较现状组合显著高 20.3%。因此,综合考虑经济与环境效益,最终选择 I2F2T4 组合对玉米种植效益最好。葵花种植条件下,I2F3T4、I3F3T4 与 I6F3T4 组合较现状组合均显著减少了硝态氮和总磷负荷($P<0.05$),且三者产量均显著高出现状组合。需要注意的是,三者之间在总磷负荷和产量方面无显著差异,而 I6F3T4 组合较 I2F3T4 组合硝态氮负荷显著减少了 13.2%。因此,综合考虑经济与环境效益,最终选择 I6F3T4 组合对葵花种植效益最好。小麦种植条件下,I2F2T3 和 I3F2T3 组合较现状组合均显著减少了硝态氮和总磷负荷($P<0.05$),但对产量无显著性影响。I2F2T1 和 I3F2T1 组合较现状组合均显著增加了小麦产量($P<0.05$),但对硝态氮和总磷负荷均无显著性影响。模型模拟得到 2009—2018 年流域 HRU 对排水沟总产水量为 88.19 mm,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—

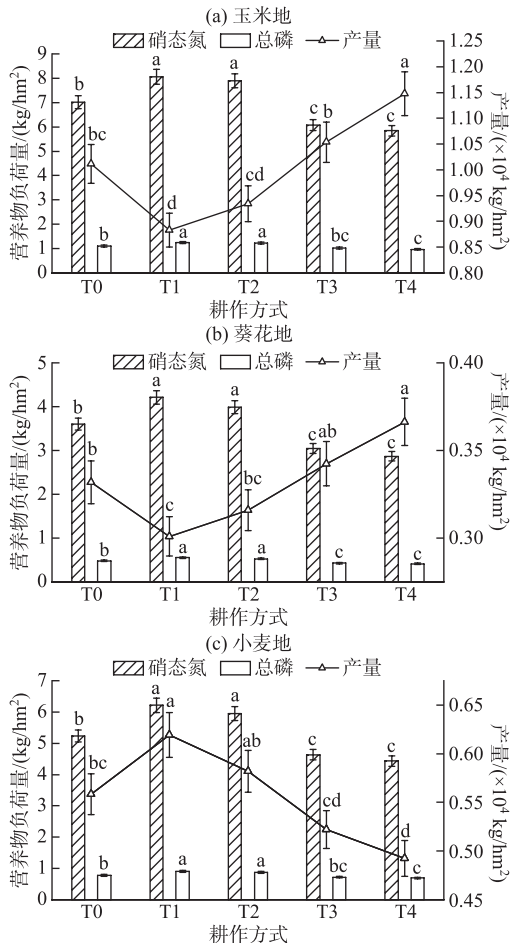


图 8 改变耕作方式下不同作物营养物流失量及产量动态变化

Fig.8 Nutrient loss and yield dynamic changes of different crops under changed farming methods

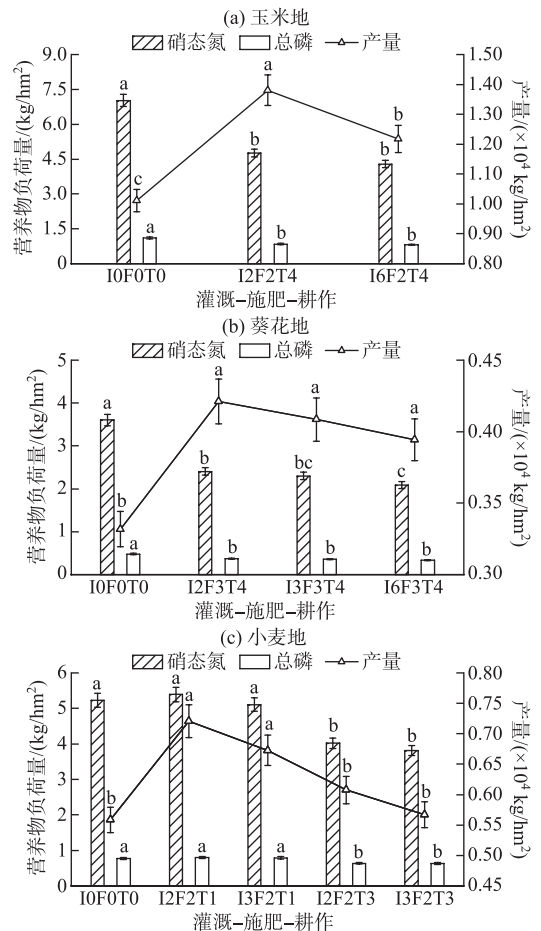


图 9 综合管理措施下不同作物营养物流失量及产量动态变化

Fig.9 Nutrient loss and yield dynamic changes of different crops under comprehensive management measures

2002)限制,第Ⅴ类水的硝态氮浓度应不大于 2.0 mg/L,总磷浓度应不大于 0.4 mg/L. 为达到此标准,硝态氮负荷量应该小于 1.7638 kg/hm²,总磷负荷量应该小于 0.3528 kg/hm². 因此,各综合措施实施后营养物负荷均未达到限制标准,但总体上,I2F2T1 组合小麦产量增幅最多显著增加了 29.1%,I3F2T3 组合减污幅度最大显著减少了 27.2%的硝态氮负荷和 18.5%的总磷负荷.

3 讨论

3.1 改进 SWAT 模型对乌梁素海流域水文水质模拟的不确定性分析

尽管改进的 SWAT 模型基于地下水浅埋灌区自身因素,从模型机理出发,在一定程度上提高了乌梁素海流域模型模拟精度,但仍存在不足之处,在今后的研究中有待加以改进. 首先,研究中改进 SWAT 模型考虑了渠道渗漏,但由于乌梁素海流域干支斗农毛渠系分布错乱复杂,完整地计算出各级渠系渗漏量难以实现. 因此,本研究在计算地下水平衡方程中的渠系渗漏参数时仅考虑了总干渠和各干渠渠系渗漏量,这会对地下水埋深的计算产生偏差(偏大),而地下水埋深是计算毛管上升水的关键参数,最终对流域水量模拟精度产生不确定性影响. 其次,乌梁素海流域排水沟分布同样错综复杂,因此,本研究在地下水平衡方程中的排水量仅考虑了各大排干沟的地下水排出量,这在一定程度上减小了地下水埋深的模拟值,从而对流域水量模拟精度产生不确定性影响. 但考虑到乌梁素海流域在灌溉期内多数小型排水沟几乎没有排水量,这在一定程度上减少了模拟精度的不确定性影响. 此外,乌梁素海流域为井渠结合流域,经野外调研得知,在解放闸灌域的东北部(8 号子流域)、西北部(24 号和 30 号子流域)、中南部(34 号子流域)、东部(28 号子流域)和永济灌域南部(29 号子流域南侧)及义长灌域西北部(6 号子流域)分布着一定数量的机井灌溉,这决定着地下水埋深计算的准确性,尽管获取了机井抽水量的统计数据,但能够准确地定位到具体的 HRU 上仍有些难度,这也会对流域水量模拟精度产生不确定性影响. 今后可以应用 SWAT-MODFLOW 耦合模型,SWAT 代码中的地下水模块被 MODFLOW 取代,有效地解决了 SWAT 模型对地下水模拟的不足. Bailey 等^[37]利用 SWAT 模型在进行水文响应单元 HRU 划分的时候将每一块农田设计成一个独立的 HRU,成功地耦合了 MODFLOW 模型. 此外,Aliyari 等^[38]已经开发了改进的 SWAT-MODFLOW 模型,联合了地下水和地表水灌溉程序,改进后的 SWAT-MODFLOW 模型适用于半干旱地区的大型农业城市河流流域.

表 7 灌溉—施肥—耕作综合管理措施优选

Tab.7 Optimal selection of comprehensive management measures for irrigation-fertilization-tillage

管理措施	玉米	葵花	小麦
灌溉	I2、I6	I2、I3、I6	I2、I3
施肥	F2	F3	F2
耕作	T4	T4	T1、T3
管理措施组合	I2F2T4、I6F2T4	I2F3T4、I3F3T4、I6F3T4	I2F2T1、I3F2T1、I2F2T3、I3F2T3

3.2 削减灌水量对作物营养物负荷及产量的影响

根据乌梁素海流域近年的引黄水量政策的实施,计划引黄水量将由现状减少到 40 亿 m³,并进一步减少到 36.4 亿 m³^[39]. 本文研究表明,不同作物削减 10% 秋浇水量均明显地减少硝态氮和总磷负荷量,这与曾阿妍等^[6]、杜军等^[36]的研究结果一致. 这是因为秋浇单次灌水量大且没有作物吸收利用,能够快速携带大量土壤剩余营养盐渗漏到地下水中,而作物生育期对水肥的吸收利用效率高,且单次灌水量较少,因此对营养物流失的影响较小^[6,36]. 本研究显示,削减 5% 夏灌灌水量可明显增加作物产量,而削减 10% 夏灌灌水量则明显降低作物产量. 这是因为在供水较差的条件下,水分会限制养分的发挥而造成减产,而在供水过剩的条件下会加速养分流失使得作物供养减少^[40]. 这表明了适当削减作物生育期灌溉水量可显著增加作物产量,体现了生育期灌水量对作物生长是极其重要的. 戴嘉璐等^[41]研究发现,玉米生育期高水(2700 m³/hm²)处理较中水与低水显著增加产量,这与本研究结果相似. 需要注意的是,削减不同时期不同比例灌水量对葵花产量均无显著影响,说明当灌水量在一定范围变化时,葵花的产量指标对灌水量因子并不敏感.

3.3 削减施肥比例对作物营养物负荷及产量的影响

本文研究表明,不同作物营养物负荷量均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现逐渐降低的趋势,且下降曲线具体表现为由陡变缓(随着施肥量削减比例的增加,营养物负荷量会趋于稳定)。这是由于作物在生长发育过程中需要吸收利用养分,期间则会抑制营养盐的流失,当施肥量达到某个定值后,再继续削减施肥量,实际上是在削减保证作物正常生长发育所需的肥料,此时就会造成作物养分亏缺。郭富强等^[42]利用 HYDRUS-1D 模型模拟不同施氮量下作物种植土壤中通过下边界 200 cm 处的硝态氮通量研究发现,当施氮量小于 180 kg/hm²时,下边界 200 cm 处的氮素较小,而施氮量大于 180 kg/hm²时,下边界 200 cm 处通过的氮素随施氮量的增加而显著增大,这与本研究结果规律一致。本研究还表明,不同作物产量随着施肥量的减少呈先增加后减少的趋势。这是因为适宜的施肥量会提高水分利用率,而过量施肥则会造成作物徒长,不利于作物产量^[40]。张忠学等^[16]的研究也表明,作物氮素吸收量随着施氮量的增加呈先增后减的趋势。郭富强等^[42]的研究还表明,河套灌区在当地常规灌水施肥基础上节水节氮各 20% 后可提高小麦和葵花产量,这与本研究结果相似。根据图 7b 可以看出,削减施肥量对葵花营养物负荷无显著影响,但可显著增加其产量。这说明葵花在施肥这一环节对区域营养物负荷的贡献很小,肥料进入土壤经形态转化后一部分被作物吸收利用,其余部分存于土壤内部,影响着作物的生长发育。

3.4 改变耕作方式对作物营养物负荷及产量的影响

研究表明,合理的耕作方式,有利于改善土壤结构、增加耕层厚度、促进土壤养分积累,是减少区域营养物流失的重要措施^[43]。本研究显示,不同作物营养物负荷均随着耕作方式混合深度与混合效率参数的增大呈降低趋势。这可能是由于通过耕作扰乱了土壤结构,破坏了土壤原有的毛细管分布^[44]。此外,混合深度与混合效率越大的耕作方式土壤毛细管破坏效果也越明显,而不作任何耕作处理则会保持较好的毛细管分布,为土壤养分的流失提供有利条件。刘棋等^[45]研究表明,深翻、深松措施显著提高山地耕层厚度、耕层土壤有效养分总库容量,有效减少了土壤养分流失,这与本研究结果一致。但是,耕作措施对不同作物产量变化规律影响差异显著。本研究中,玉米、葵花产量随耕作混合深度与混合效率的增大而增加,小麦产量规律则与之相反。这可能是由于小麦在播种时土壤仍处于冻融状态,温度偏低,耕作处理会使得小麦生长的土壤温度更低,恶化小麦的生长环境。玉米和葵花喜爱土层深厚、疏松通气的土壤环境,通过耕作处理可以改善土壤结构,有利于增产。根据前人研究可知,耕作方式对小麦产量的影响因区域的生态条件、耕作处理的时长等不同而得到不一致的结论。有研究表明^[46],与传统耕作方式相比,采用少免耕耕作技术可使小麦亩产量增加 10.27%。李福建等^[47]研究也表明,针对小麦两年度田间试验均以免耕产量最高,比耕翻分别增产 25.4% 和 15.2%,这与本研究结果相似。但闫秋艳等^[48]的研究表明,深松和深翻比免耕均能提高小麦产量。徐永刚等^[49]的研究表明,深耕措施能显著提高玉米籽实和秸秆产量。胡树平等^[50]的研究表明,向日葵产量按照浅旋 15 cm、深松 30 cm、深松 45 cm 的顺序呈现递增的趋势,这与本研究结果相似。由于本研究各耕作处理采用同种耕作方式连续 10 年模拟,通常田间耕作试验周期较短,致使模型模拟出的结果可能会与实际监测试验结果有所差别。秦红灵等^[51]的研究表明,2 年免耕后进行深松处理可平均增产 18.29%,这表明常年使用同种耕作方式不利于作物生长。因此,在今后的研究中,需对模型模拟的每一年结果进行具体对比分析,同时可对转变耕作方式对养分与作物的影响进一步深入研究。

3.5 实施农业管理措施对乌梁素海污染物负荷影响的机制分析

本文研究中,通过对乌梁素海流域农田实施削减灌水量、减少施肥量和优化耕作方式,有效减少了排水沟内农田排退水的硝态氮和总磷负荷量,一定程度降低了营养物向乌梁素海的入湖负荷量。本研究通过改进了乌梁素海流域 SWAT 模型土壤水平衡和地下水平衡模块,将流域内的农田土壤—地下水—排水沟—乌梁素海形成一个整体。施入农田中的肥料随灌入农田土壤中的水量经土壤剖面渗滤到浅层地下水中,随着地下水位的上升,高出各级排水沟最低点的地下水量流入排水沟,溶于浅层地下水中的营养盐也随之流入排水沟,导致灌区农业面源污染的加剧^[1]。SWAT 模型对流入排水沟中的营养物质进行模拟并演算通过排水沟流入乌梁素海的营养物总负荷。乌梁素海水体富营养化的产生,反过来对调节区域气候、水热平衡及支撑区域经济发展产生严重的制约^[52]。因此,为维持并推动乌梁素海的水质状况向良性发展,在流域内实施一系列有效的农业管理措施具有重要意义。

4 结论

1) 本文利用改进的 SWAT 模型构建乌梁素海流域分布式水文模型, 并利用流域总出水口实测径流、硝态氮和总磷排放量、地下水埋深及作物产量校正及验证模型, 结果显示, 改进 SWAT 模型能够有效模拟流域排水量、硝态氮和总磷负负荷量、地下水埋深动态以及作物产量, 可用于营养物负荷与作物产量的模拟。

2) 探究了削减作物不同灌期 5% 和 10% 灌水量对营养物负荷和作物产量的影响。不同作物削减 10% 秋浇水量均能够最大程度显著降低硝态氮、总磷负负荷量, 且对产量无显著影响。不同作物削减 5% 夏灌水量可最大程度增加作物产量, 而削减 10% 夏灌水量则对作物产量影响较大, 减产 8.2% ~ 16.85%。

3) 探究了削减作物不同施肥比例对营养物负荷和作物产量的影响。不同作物营养物负负荷量均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现逐渐降低的趋势, 且下降曲线逐渐趋于平缓。各作物产量均随着氮磷施肥削减比例的增大呈现先增后减的趋势。其中, 玉米和小麦减产的施肥削减比例节点为 20%, 葵花减产的施肥削减比例节点为 25%。

4) 改变作物耕作方式对营养物负荷和作物产量的影响显示, 不同作物营养物负负荷均随着耕作方式混合深度与混合效率参数的增大逐渐减小。玉米、葵花产量随耕作混合深度与混合效率参数的增大而增加, 小麦产量随耕作参数的增大而减小。

5) 探究了经济与环境效益双赢的最优管理措施组合。削减 5% 夏灌水量+削减 20% 氮磷施肥比例+模板犁耕作组合对玉米种植效益最好。削减 10% 秋浇水量+削减 25% 氮磷施肥比例+模板犁耕作组合对葵花种植效益最好。削减 5% 夏灌水量+削减 20% 氮磷施肥比例+免耕组合小麦产量增幅最大达 29.1%; 削减 5% 秋浇水量+削减 20% 氮磷施肥比例+常规春耕组合小麦减污幅度最大显著减少了 27.2% 的硝态氮负负荷和 18.5% 的总磷负负荷。

5 参考文献

- [1] Du J, Yang PL, Li YK *et al.* Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(16): 4549-4559. [杜军, 杨培岭, 李云开等. 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析. 生态学报, 2011, **31**(16): 4549-4559.]
- [2] Fu TG, Jiang GY, Liu P *et al.* Farmer's participation consciousness and the influencing factors in the reclamation of saline-alkali land in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(4): 625-632. [付同刚, 蒋莞艳, 刘鹏等. 内蒙古河套灌区盐碱地治理中农户参与意识及其影响因素. 中国生态农业学报, 2021, **29**(4): 625-632.]
- [3] Feng ZZ, Wang XK, Feng ZW *et al.* Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao irrigation district, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(10): 2027-2032. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2003.10.010. [冯兆忠, 王效科, 冯宗炜等. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响. 生态学报, 2003, **23**(10): 2027-2032.]
- [4] Li WP, Xu J, Yu LH *et al.* Distribution characteristics of nutrients and phytoplankton in Wuliangsu Lake during the icebound season. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(6): 1007-1013. [李卫平, 徐静, 于玲红等. 乌梁素海冰封期营养盐及浮游植物的分布特征. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 1007-1013.]
- [5] Hou QQ, Dong SG, Gao DH *et al.* Hydrogeochemical evolution and water and salt migration in the Wuliangsu watershed. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(1): 108-114. [侯庆秋, 董少刚, 高东辉等. 乌梁素海流域水文地球化学演化及水盐运移. 环境科学与技术, 2021, **44**(1): 108-114.]
- [6] Zeng AY, Hao FH, Zhang JX *et al.* Nitrogen & phosphorus losses caused by the summer & fall irrigation runoff in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(5): 838-844. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2008.05.028. [曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋等. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化. 环境科学学报, 2008, **28**(5): 838-844.]
- [7] Tian ZQ, Huo YZ, Han CL *et al.* Division and estimation of nitrogen pollution load in the general main drain of Hetao irrigation area. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2019, **40**(3): 75-79. [田志强, 霍铁珍, 韩翠莲等. 河套灌区总排干沟氮污染负荷分割与估算. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2019, **40**

- (3): 75-79.]
- [8] Quan D, Shi XH, Zhao SN *et al.* Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006–2017 and its main impact factors. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1259-1267. DOI: 10.18307/2019.0503.[全栋, 史小红, 赵胜男等. 2006—2017 年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1259-1267.]
- [9] Quan D, Zhang S, Shi XH *et al.* Impact of water environment factors on eutrophication status of Lake Ulansuhai based on monitoring data in 2013–2018. *J Lake Sci*, 2020, **32**(6): 1610-1619. DOI: 10.18307/2020.0604.[全栋, 张生, 史小红等. 环境因子对乌梁素海水体营养状态的影响: 基于 2013—2018 年监测数据的分析. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1610-1619.]
- [10] Sun QQ, Zhang CP, Yu XX *et al.* Best management practices of agricultural non-point source pollution in China: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(3): 772-778. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0100.[孙棋棋, 张春平, 于兴修等. 中国农业面源污染最佳管理措施研究进展. 生态学杂志, 2013, **32**(3): 772-778.]
- [11] Qu ZY, Yang X, Huang YJ. Analysis and assessment of water-saving project of Hetao irrigation district in Inner Mongolia. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(4): 70-76, 112.[屈忠义, 杨晓, 黄永江. 内蒙古河套灌区节水工程改造效果分析与评估. 农业机械学报, 2015, **46**(4): 70-76, 112.]
- [12] Zou YF, Cai HJ, Zhang TB *et al.* Water use characteristics and profit analysis of spring maize production with different irrigation methods in Hetao irrigation district. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51**(9): 237-248.[邹宇锋, 蔡焕杰, 张体彬等. 河套灌区不同灌溉方式春玉米耗水特性与经济效益分析. 农业机械学报, 2020, **51**(9): 237-248.]
- [13] Miao QF, Shi HB, Li RP *et al.* Irrigation performance and water use efficiency in border-furrow combined irrigation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, **29**(10): 135-139.[苗庆丰, 史海滨, 李瑞平等. 河套灌区畦-沟分灌水分利用效率及节水效果试验研究. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(10): 135-139.]
- [14] Yang R, Wang XF. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **11**: 726-732. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.113.
- [15] Chang F, Hong M, Wu Y *et al.* Effects of irrigation methods and improvement measures on ammonia volatilization of saline soil in Hetao Irrigation Area. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019, (2): 38-45. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.18201.[常菲, 红梅, 武岩等. 灌溉方式和改良措施对河套灌区盐渍土氨挥发的影响. 中国土壤与肥料, 2019, (2): 38-45.]
- [16] Zhang ZX, Liu M, Qi ZJ. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in maize field. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51**(2): 284-291.[张忠学, 刘明, 齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响. 农业机械学报, 2020, **51**(2): 284-291.]
- [17] Zhang YT, Liu HB, Wang HY *et al.* A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6664-6676. DOI: 10.5846/stxb201504140764.[张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响. 生态学报, 2016, **36**(20): 6664-6676.]
- [18] Xue F, Yan TM, Qiao J *et al.* Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu area. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(4): 26-31, 51.[薛峰, 颜廷梅, 乔俊等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(4): 26-31, 51.]
- [19] Yu XF, Zhao XY, Hu SP *et al.* Tillage method suitable for farmlands with different maize yield levels in Hetao Plain, Inner Mongolia. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(3): 392-401.[于晓芳, 赵晓宇, 胡树平等. 内蒙古河套平原灌区玉米适宜耕作方式研究. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(3): 392-401.]
- [20] Yu QF, Miao QF, Shi HB *et al.* Effects of tillage methods on soil water, heat and salt of field maize in the period of spring sowing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(3): 265-268.[于庆峰, 苗庆丰, 史海滨等. 耕作方式对秸秆覆盖玉米田春播期土壤水热盐状况的影响. 水土保持研究, 2019, **26**(3): 265-268.]
- [21] Zhao XY, Yu XF, Gao JL *et al.* Effects of different tillage methods and straw returning on photosynthetic material production and yield of maize in Hetao plain irrigation area. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2018, **46**(3): 26-31.[赵晓宇, 于晓芳, 高聚林等. 河套灌区耕作方式与秸秆还田对玉米光合物质生产及产量的影响. 北方农业学报, 2018, **46**(3): 26-31.]
- [22] Himanshu SK, Pandey A, Yadav B *et al.* Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control u-

- sing SWAT model. *Soil and Tillage Research*, 2019, **192**: 42-58. DOI: 10.1016/j.still.2019.04.016.
- [23] Wang ZG, Liu CM, Huang YB. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, **22**(1): 79-86.[王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, **22**(1): 79-86.]
- [24] Krysanova V, Arnold JG. Advances in ecohydrological modelling with SWAT—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, **53**(5): 939-947. DOI: 10.1623/hysj.53.5.939.
- [25] Dai JF, Cui YL. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT I. Principle and method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(2): 145-152. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.02.003.[代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型——I. 模型构建的原理与方法. 水利学报, 2009, **40**(2): 145-152.]
- [26] Zheng J, Li GY, Han ZZ *et al.* Application of modified SWAT model in plain irrigation district. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(1): 88-97.[郑捷, 李光永, 韩振中等. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用. 水利学报, 2011, **42**(1): 88-97.]
- [27] Hu WH, Li GY, Meng GX *et al.* Evaluation of non-point source pollution load in Fenhe Irrigation District based on SWAT model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(11): 1309-1316.[胡文慧, 李光永, 孟国霞等. 基于 SWAT 模型的汾河灌区非点源污染负荷评估. 水利学报, 2013, **44**(11): 1309-1316.]
- [28] Xiong LY, Xu X, Ren DY *et al.* Enhancing the capability of hydrological models to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow groundwater: Based on the SWAT framework. *Journal of Hydrology*, 2019, **572**: 1-16. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.043.
- [29] Xiong LY, Xu X, Engel B *et al.* Modeling and quantifying regional hydrological processes in large-scale agricultural watershed of arid upper Yellow River basin. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 127014.
- [30] Wang WG, Shi HB, Li XY *et al.* Effects of correcting crop planting structure data to improve simulation accuracy of SWAT model in irrigation district based on remote sensing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(17): 158-166.[王维刚, 史海滨, 李仙岳等. 遥感订正作物种植结构数据对提高灌区 SWAT 模型精度的影响. 农业工程学报, 2020, **36**(17): 158-166.]
- [31] Ding Y, Dong F, Zhao JY *et al.* Non-point source pollution simulation and best management practices analysis based on control units in Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(3): 868. DOI: 10.3390/ijerph17030868.
- [32] Bossa AY, Diekkrüger B, Giertz S *et al.* Modeling the effects of crop patterns and management scenarios on N and P loads to surface water and groundwater in a semi-humid catchment (West Africa). *Agricultural Water Management*, 2012, **115**: 20-37. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.08.011.
- [33] Morris MD. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 1991, **33**(2): 161-174. DOI: 10.1080/00401706.1991.10484804.
- [34] Moriasi DN, Arnold JG, Liew MWV *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153.
- [35] Zhang YM, Zhang JB, Hu CS *et al.* Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(3): 532-539. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.00532.[张玉铭, 张佳宝, 胡春胜等. 水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响. 中国生态农业学报, 2011, **19**(3): 532-539.]
- [36] Du J, Yang PL, Li YK *et al.* Effect of different irrigation seasons on the transport of N in different types farmlands and the agricultural no-point pollution production. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(1): 66-74.[杜军, 杨培岭, 李云开等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 66-74.]
- [37] Bailey RT, Wible TC, Arabi M *et al.* Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 4420-4433. DOI: 10.1002/hyp.10933.
- [38] Aliyari F, Bailey RT, Tasdighi A *et al.* Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling & Software*, 2019, **115**: 200-210. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.014.
- [39] Cheng XY, Mao W, Zhu Y *et al.* Dynamics analysis of groundwater under water-saving policy in Hetao irrigation district

- based on saltmod. *Water Saving Irrigation*, 2020, (2): 73-79. DOI: 1007-4929(2020)02-0073-07.[成萧尧, 毛威, 朱焱等. 基于 Saltmod 的河套灌区节水条件下地下水动态变化分析. 节水灌溉, 2020, (2): 73-79.]
- [40] Lv LH, Dong ZQ, Zhang JT *et al.* Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(19): 3839-3849.[吕丽华, 董志强, 张经廷等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究. 中国农业科学, 2014, **47**(19): 3839-3849.]
- [41] Dai JL, Li RP, Li CC *et al.* Effects of water saving and fertilizer reducing on water and nutrients of maize at different growth stages in the Hetao irrigated area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(1): 271-277.[戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪等. 河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响. 水土保持学报, 2021, **35**(1): 271-277.]
- [42] Guo FQ, Shi HB, Yang SQ *et al.* Analysis of nitrogen loss and determination of optimum rates of nitrogen application in Hetao irrigation area. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(6): 1477-1482.[郭富强, 史海滨, 杨树青等. 河套灌区氮素流失分析及最佳施氮量的确定. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1477-1482.]
- [43] Hu JM, Chen SN, Wei XH *et al.* Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(2): 95-103. DOI: 10.13254/j.jare.2017.0242.[胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(2): 95-103.]
- [44] Yan L, La YP, Dong TH *et al.* Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in Northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(1): 125-132.[闫雷, 喇乐鹏, 董天浩等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响. 农业工程学报, 2021, **37**(1): 125-132.]
- [45] Liu Q, Wang H, Zhang LC *et al.* Effects of different tillage methods on soil nutrient storage capacity, spatial distribution of water and nitrogen and root morphology of flue-cured tobacco in mountainous tobacco fields. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021, (6): 104-111. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.20433.[刘棋, 王皓, 张留臣等. 耕作方式对山地烟田耕层养分库容和烤烟根系、土壤水氮空间分布特征的影响. 中国土壤与肥料, 2021, (6): 104-111.]
- [46] Du JL, Hou HP, Lu DQ *et al.* Effects of minimum tillage and no tillage methods on soil physical and chemical properties and wheat yield. *China Agricultural Technology Extension*, 2020, **36**(10): 69-71.[杜佳林, 侯海鹏, 卢东琪等. 少免耕耕作方式对土壤理化性状及小麦产量的影响. 中国农技推广, 2020, **36**(10): 69-71.]
- [47] Li FJ, Xu DY, Wu P *et al.* Effects of mechanical tillage and sowing methods on photosynthetic production and yield of wheat in rice stubble. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(5): 41-49.[李福建, 徐东忆, 吴鹏等. 机械耕作和播种方式对稻茬小麦光合生产和产量的影响. 农业工程学报, 2021, **37**(5): 41-49.]
- [48] Yan QY, Dong F, Jia YQ *et al.* Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(1): 222-228.[闫秋艳, 董飞, 贾亚琴等. 耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响. 水土保持学报, 2021, **35**(1): 222-228.]
- [49] Xu YG, Ma Q, Zhou H *et al.* Effects of straw returning and deep loosening on soil physical and chemical properties and maize yields. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(2): 428-432.[徐永刚, 马强, 周桦等. 秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响. 土壤通报, 2015, **46**(2): 428-432.]
- [50] Hu SP, Bao HZ, Meng TT *et al.* Effect of sub-soiling on soil characteristics and yield characters of oil sunflower. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2020, **41**(3): 4-9.[胡树平, 包海柱, 孟天天等. 深松对土壤物理性质及油用向日葵产量性状的影响. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2020, **41**(3): 4-9.]
- [51] Qin HL, Gao WS, Ma YC *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(1): 78-85.[秦红灵, 高旺盛, 马月存等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 78-85.]
- [52] Tong TL, Li RL, Wu SJ *et al.* The distribution of sediment bacterial community in mangroves across China was governed by geographic location and eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **140**: 198-203. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.01.046.