

SWAT 模拟耕作方式与盐分对区域土壤氮运移及作物产量影响

王维刚, 史海滨*, 李仙岳, 孙亚楠, 郑倩,
张文聪, 王国帅, 周慧, 闫妍, 窦旭

(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: 耕作方式与土壤盐渍化是影响河套灌区氮素流失及作物产量的重要因素。明确不同耕作方式与盐渍化水平下硝态氮运移量及作物产量的变化, 可为制定合理的灌区耕作措施及盐渍化治理方案提供理论依据, 对于揭示灌区氮素流失控制及不同作物增产潜力具有重要意义。该研究基于验证后的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型, 以河套灌区 2 种主要土壤类型为研究对象, 设置不耕作 (指不添加耕作管理, CK)、免耕 (T1)、少耕 (T2)、常规春耕 (T3) 和模板犁 (T4) 5 种耕作处理, 非盐化土 (S1)、轻度 (S2)、中度 (S3)、重度 (S4) 4 种盐分水平, 研究耕作方式与土壤盐分对灌区产水量、作物吸氮量、硝态氮淋溶量及运移量、作物产量的影响。结果表明: 耕作方式与土壤盐分对区域总产水量、作物吸氮量、硝态氮淋溶量、硝态氮运移及作物产量均有显著影响 ($P < 0.05$)。其中, 区域产水量、硝态氮淋溶量、不同水文路径 (地表、侧向和地下径流) 硝态氮运移量及小麦产量均随耕作混合深度与混合效率的增加逐渐减少; 作物吸氮量、玉米与葵花产量均随耕作混合深度与混合效率的增加逐渐增加。与 CK 相比, 模板犁耕作作物吸氮量平均增加 11.78%, 硝态氮淋溶量平均减少 16.5%, 有效降低了土壤养分流失和地下水污染。增加土壤盐分通过降低土壤层有效持水量, 显著增加了区域总产水量、硝态氮淋溶量 (草甸盐土除外) 及硝态氮地下运移量, 减少了作物吸氮量和作物产量。与非盐化土相比, 重度盐化土处理小麦、玉米、葵花产量平均显著减少 19.15%、27.31%、26% ($P < 0.05$)。增加土壤盐分相比转变耕作方式更能影响区域产水量、土壤养分和作物产量。因此, 为更好解决灌区污染严重和作物产量下降等问题, 仍需将区域土壤盐渍化防控与治理放在首要位置。

关键词: 土壤; 盐分; 氮; SWAT 模型; 河套灌区; 耕作方式; 硝态氮运移; 作物产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.007

中图分类号: S274; S19

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-03-0055-11

王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. SWAT 模拟耕作方式与盐分对区域土壤氮运移及作物产量影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 55-65. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.007 <http://www.tcsae.org>

Wang Weigang, Shi Haibin, Li Xian Yue, et al. Effects of tillage modes and soil salinity on regional nitrate nitrogen transport and crop yields using a SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 55-65. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.007 <http://www.tcsae.org>

0 引言

内蒙古河套灌区是黄河中上游典型的盐渍化特大型灌区, 同时也是国家和自治区重要的商品粮、油生产基地, 土壤盐渍化一直困扰灌区农业生产的发展, 并引起了科研工作者的极大关注^[1-2]。此外, 灌区农业生产中为提高作物产量盲目过量施肥, 肥料利用效率低下, 导致肥料在土壤中积累并进一步渗透到地下水及排水沟中^[3], 对灌区农田环境造成严重面源污染^[4]。因此, 土壤盐渍化与面源污染问题已成为制约灌区粮食安全与环境安全的重要因素。

土壤盐分胁迫和养分大量流失是造成干旱地区作物

生产力下降和环境污染的主要原因^[5]。合理的耕作模式可为作物生长发育创造适宜的生长微环境^[6], 也可降低耕层土壤盐分含量, 一定程度上缓和土壤盐碱化状况^[7]。研究表明, 土壤中盐分浓度过高会抑制作物生长^[8-9], 由于盐分对作物生长的抑制作用, 作物对养分的吸收利用效率降低, 从而增加了养分的潜在淋失量^[10]。Adams^[11]研究指出, 盐分胁迫会造成作物养分缺失。周慧等^[12]研究表明, 盐渍化土壤条件下随着盐分的增加, 土壤氮挥发总量也增大, 会加重环境的污染。此外, 干旱地区耕作方式的转变也会对土壤养分的流失及作物对养分的吸收利用产生较大影响^[13-15]。Wang 等^[14]研究显示, 凿犁耕作和免耕相比于常规耕作分别显著 ($P < 0.05$) 增加了 0~100 cm 土层中总氮积累量 34.8 和 54.1 kg/(hm²·a) (以 N 计, 下同), 并使总氮损失平均减少了 7.4%和 22.4%。Zhang 等^[15]研究显示, 免耕和少耕的氮损失相比于常规耕作的氮损失分别少 19.03 和 6.33 kg/hm², 且保护性耕作比传统耕作显著减少了氮损失。同时, 耕作方式对盐渍化灌区土壤盐分也会产生一定影响。Qi 等^[16]研究表明, 全

收稿日期: 2021-08-21 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51769024); 内蒙古自治区水利科技重大专项 (213-03-99-303002-NSK2017-M1)

作者简介: 王维刚, 博士生, 研究方向为灌区污染物运移模拟。

Email: 937505954@qq.com

*通信作者: 史海滨, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为节水灌溉原理及应用。Email: shi_haibin@sohu.com

膜覆盖耕作相比于部分膜覆盖耕作可更有效地阻止土壤盐分向上运动。Ding 等^[17]研究发现,相比于免耕和未施用改良剂的土壤,深耕与蚯蚓粪结合使土壤盐分和碱度分别降低了 37%和 34%,可有效改良盐碱土壤。尽管针对耕作方式的转变对土壤盐分和土壤养分的流失影响方面已有大量研究,但耕作方式、土壤盐分和土壤养分流失三者间的交互关系还少有研究,合理的耕作方式对盐渍土地区增加作物产量和减小农田水土环境污染有着重要的作用,针对河套灌区典型盐渍化土壤条件下不同耕作方式对土壤营养物流失影响需进一步探究。另外,遥感技术以其宏观、动态、信息丰富等特点,已成为盐渍化灌区盐分反演的重要手段^[18-20]。

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型作为流域普遍应用的一种基于物理的半分布式水文模型,常用于预测土地管理措施对复杂、大型流域的水文、污染物和泥沙输移的长期影响^[21]。近些年,很多学者逐渐将 SWAT 模型应用到盐渍化灌区并进行了改进。Xiong 等^[22]介绍了用于模拟浅水位农业流域的改进的 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。SWAT 模型数据库中包含了数十种不同的耕作方式可供选择,是用于模拟耕作方式情景分析的有效管理工具^[23]。因此,利用 SWAT 模型模拟盐渍化灌区不同盐渍化土壤条件下耕作方式对养分流失的影响研究将对西北干旱-半干旱灌区污染物流失治理与防控提供一种方法。

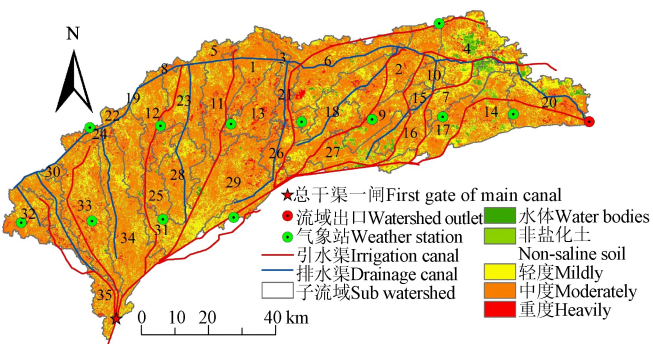
因此,本文以土壤盐分空间变异性复杂的河套灌区为研究区域,利用灌区多年实测数据校准和验证 SWAT 模型对径流、硝态氮和作物产量的模拟精度;并利用验证后的模型针对 2 种主要土壤类型在 4 种盐分水平下转变耕作方式进行模拟,探讨耕作方式与土壤盐渍化对灌区产水量、作物吸氮量、硝态氮淋溶量及运移量、作物产量的影响,以期为调节盐渍化土壤、促进粮食增产、减小环境污染及促进农业的可持续发展,并针对在灌区不同盐渍化土壤下合理耕作方式的实施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区位于内蒙古西部黄河流域中间地带,地理坐标为 40°15′~41°18′N、106°20′~109°19′E (图 1),平均海拔为 1 024 m,属于大陆性季风气候,年平均最低气温与最高气温分别为-10℃和 23℃;年降水量仅为 145~216 mm,其中 80%发生在 6—8 月,年内潜在蒸发量达 2 200~2 400 mm,是典型的干旱-半干旱地区。灌区东西长约 250 km,南北宽约 50 km。灌区总土地面积 1.19×10⁴ km²,现引黄灌溉面积 0.73×10⁴ km²。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。据巴彦淖尔市 2019 年统计年鉴,当年河套灌区化肥施用量达到 127.07 万 t^[24]。灌区土壤类型主要包括灌淤土和草甸盐土,两者分别占总土地面积的 53.44%和 43.71%,其中两种土壤类型 0~30 cm 土层基本物理性状见表 1。由于灌溉水利用效率不高,排水不畅,灌区内存在不同程度的土壤次生盐渍化问题^[25]。由 Landsat 8 OLI 遥感数

据反演得到的 2019 年灌区土壤盐渍化程度主要为中度和轻度水平。



注: 1~35 代表子流域序号。
Note: 1-35 are No. of sub watershed.

图 1 河套流域土壤盐分等级及渠系分布
Fig.1 Soil salinity grades and canal distribution in Hetao watershed

表 1 两种土壤类型 0~30 cm 土层基本物理性状
Table 1 Basic physical properties of 0-30 cm soil layer of two soil types

| 物理性状 Physical properties | 土壤类型 Soil types | |
|--|---------------------------|---------------------------|
| | 灌淤土 Cumulic anthrosols | 草甸盐土 Mollic solonchaks |
| 土壤湿密度 Soil wet density/(g·cm ⁻³) | 1.44 | 1.45 |
| 可利用有效水 Available water/(cm·cm ⁻¹) | 0.161 | 0.150 |
| 饱和水力传导系数 Saturated hydraulic conductivity/(mm·h ⁻¹) | 9.8 | 3.14 |
| 电导率 Electrical conductivity/(dS·m ⁻¹) | 1.47 | 0.94 |
| 砾石 Gravel/% | 10 | 7 |
| 有机碳质量分数 Organic carbon content/% | 1.12 | 0.49 |
| 颗粒组成 Particle composition/% | 黏粒 Clay | 21 |
| | 壤粒 Loam | 50 |
| | 砂粒 Sand | 29 |
| | | 32 |
| | | 44 |
| | | 24 |

1.2 数据来源

ASTER 30 m 分辨率 DEM (Digital Elevation Model) 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 2018 年 30 m 分辨率土地利用图来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 2018 年 30 m 分辨率耕地种植结构数据来源于 Land sat 8 OLI 遥感数据裁剪获得, 土壤栅格数据与中国区域世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO) 来源于寒旱区科学数据中心 (<http://bdc.casnw.net/yyzc/sj/>), 2008—2018 年 CMADS 大气数据集来源于中国气象同化数据集 (<http://www.cmads.org/>), 用于制作 SWAT 模型气象数据库。2009—2018 年灌区每月实测排水量、硝态氮排放数据来源于河套灌区水利发展中心供排水管理处, 用于验证 SWAT 模型水文水质模拟, 其计算方法依照前期成果^[26]。2010—2017 年灌区实测作物产量数据来源于巴彦淖尔市农牧业局及当地统计年鉴, 其中, 以 2010—2014 年数据对 SWAT 模型作物产量模拟进行率定, 2015—2017 年数据对模型进行验证。基于 DEM 数据与排水渠系, 划分得到 35 个子流域 (图 1)。并进一步根据研究区土地利用类型、土壤类型分布离散得到 638 个水文响

应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU)。利用 SPAW 6.02.70 软件计算土壤数据库各土壤类型参数, 其中初始土壤电导率 (Electrical Conductivity, EC) 参数 (土壤本底盐分数据) 由 2019 年 Landsat 8 OLI 遥感数据反演所得 (图 1) [18,27], 灌区 2 种主要土壤类型 (灌淤土与草甸盐土) 的土壤电导率平均值分别为 1.47 和 0.94 dS/m (表 1)。添加气象数据、灌水参数、施肥参数建立研究区的 SWAT 模型, 详细模型构建过程及参数的选取依照前期成果 [26]。

1.3 研究方法

1.3.1 硝酸盐及作物产量计算方法

SWAT 模型模拟结果可得到流域内各 HRU 上某一土壤类型或土地覆盖条件下总产水量、植物从土壤中吸收的氮量、硝酸盐从土壤剖面向地下淋溶量、排向主河道的硝酸盐运移量及各作物产量, 特定土壤类型某一作物指标多年平均含量按式 (1) 计算。

$$L_{cn} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \left(\frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^n (A_{ci} \cdot l_{ni})}{\sum_{i=1}^n A_{ci}} \right) \quad (1)$$

式中 L_{cn} 表示某一特定土地覆盖多年平均模拟变量值 (作物产量模拟年数为 7 a), mm 或 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, hm²; l_{ni} 表示模拟期内某年某月对应特定作物所在 HRU 的模拟变量值, mm 或 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。

1.3.2 耕作混合深度与混合效率计算方法

耕作混合深度指通过机械耕作对土壤进行切削、翻转、破碎、混合等一系列物理过程的土壤层深度。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)。本研究耕作方式的选用包括混合深度与混合效率参数的取值均从 SWAT 模型耕作数据库 (Tillage database) 获取, 其中模型耕作数据库中机械工具的混合深度数据来源于美国农业部 (United States Department of Agriculture, USDA) 经济研究中心的农业器械数据库, 而混合效率数据来源于国家保护区协会 (National Association of Conservation Districts, NACD) 保护科技信息中心提供的“残留物得分表”。

假设耕作器具混合深度为 100 mm, 将土壤剖面分为

2 层, 分别为 0~10 mm 和 >10~100 mm, 同时假设各土层均匀混合, 以土壤剖面硝酸盐为例。则耕作混合效率按下列公式计算, 综合式 (2)~(5) 得到式 (6)。

$$\text{NO}_{3,\text{final}} = \text{NO}_{3,\text{ly1,um}} + \text{NO}_{3,\text{ly1,res}} \quad (2)$$

$$\text{NO}_{3,\text{ly1,um}} = \text{NO}_{3,\text{ly1,in}} \cdot (1 - T_{\text{me}}) \quad (3)$$

$$\text{NO}_{3,\text{ly1,res}} = \text{NO}_{3,\text{tm}} \cdot \frac{D_{\text{ly1}}}{D_{\text{m}}} \quad (4)$$

$$\text{NO}_{3,\text{tm}} = (\text{NO}_{3,\text{ly1,in}} + \text{NO}_{3,\text{ly2,in}}) \cdot T_{\text{me}} \quad (5)$$

$$T_{\text{me}} = \frac{\text{NO}_{3,\text{final}} - \text{NO}_{3,\text{ly1,in}}}{\frac{D_{\text{ly1}}}{D_{\text{m}}} \cdot \text{NO}_{3,\text{ly2,in}} - \frac{D_{\text{ly2}}}{D_{\text{m}}} \cdot \text{NO}_{3,\text{ly1,in}}} \quad (6)$$

式中 T_{me} 表示耕作混合效率, mm; D_{ly1} 表示第 1 土层深度, mm; D_{ly2} 表示第 2 土层深度, mm; D_{m} 表示耕作混合深度, mm; $\text{NO}_{3,\text{final}}$ 表示混合深度范围内最终的硝酸盐含量, kg/hm²; $\text{NO}_{3,\text{ly1,um}}$ 表示第 1 土层未混合的硝酸盐含量, kg/hm²; $\text{NO}_{3,\text{ly1,res}}$ 表示第 1 土层混合硝酸盐的再分配量, kg/hm²; $\text{NO}_{3,\text{ly1,in}}$ 表示第 1 土层初始硝酸盐含量, kg/hm²; $\text{NO}_{3,\text{ly2,in}}$ 表示第 2 土层初始硝酸盐含量, kg/hm²; $\text{NO}_{3,\text{tm}}$ 表示混合深度范围内混合的硝酸盐总量, kg/hm²。

1.3.3 SWAT 模型校正及验证精度评价方法

将前期在河套灌区研究的 8 个径流和 7 个硝态氮参数及取值用于本研究模拟验证 [26], 没有再进行参数率定及敏感性分析, 并利用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI 2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2) 算法对径流及硝态氮变量进行精度评价 (验证参数可行性)。同时采用河套灌区已有研究选择了 6 个作物生长参数 [22] (表 2)。将验证后的径流及硝态氮参数代入 SWAT 模型中率定作物生长参数。由于在率定作物生长参数时需要分别调整 3 种作物对应的参数, 因此采用手动试错的率定方式。以 2008 年作为模型预热期, 利用研究区出口红圪卜扬水站 2009—2018 年径流和硝态氮监测数据对模拟过程进行验证。以 2010—2014 年 3 种作物实测产量数据对模型进行率定, 确定作物生长参数最优取值后, 利用 2015—2017 年数据对模型进行验证。因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, 因此作物实测数据采用这 3 个地方的加权平均值。选取相对误差 (Relative Error, RE)、决定系数 (R^2) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_{ns}) 来评估模拟效率 [28]。

表 2 作物参数率定范围与取值
Table 2 Calibration range and value of crop parameters

| 序号 No. | 参数 Parameters | 默认值 Default value | | | 最小值 Minimum value | 最大值 Maximum value | 最终值 Final value | | |
|-----------|---|----------------------|------|-----|----------------------|----------------------|--------------------|------|------|
| | | 玉米 | 葵花 | 小麦 | | | 玉米 | 葵花 | 小麦 |
| 1 | 潜在叶面积指数 | 6 | 3 | 4 | 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 | 0.7 | 0.62 | 0.6 | 0 | 1 | 0.68 | 0.69 | 0.56 |
| 3 | 植物生长的基温/℃ | — | — | — | — | — | 8 | 6 | 0 |
| 4 | 单位土壤饱和和浸提液电导率值造成的衰减百分比/(%·dS ⁻¹ ·m ⁻¹) | — | — | — | — | — | 6 | 6 | 4.5 |
| 5 | 在盐胁迫发生时的土壤饱和和浸提液的电导率值/(dS·m ⁻¹) | — | — | — | — | — | 5.5 | 10.5 | 4 |
| 6 | 盐度胁迫的降低因子 | — | — | — | — | — | 1.25 | 0.95 | 1.05 |

1.3.4 耕作方式与土壤盐渍化处理情景设计

研究应用 SWAT 模型共进行了 10 a 的模拟。根据河套灌区长期耕作模式选用不耕作（对照组，CK）、免耕（T1）、少耕（T2）、常规春耕（T3）和模板犁耕作（T4）5 种耕作处理。不同耕作处理间差异在于对土壤中养分再分配所需的混合深度与混合效率（表 3）。其中，不耕作是指在管理措施中不添加耕作处理，作为研究的对照组（CK），其混合深度与混合效率的值均为 0，这也是与免耕的区别所在。研究在 2 种土壤类型（灌淤土与草甸盐土）条件下分别设置 4 种盐分水平，按照非盐化土、轻度盐化土、中度盐化土和重度盐化土等级划分，分别取值为 0.46、0.98、1.55、1.97 dS/m^[29]，依次记为 S1、S2、S3、S4，土壤盐渍化程度划分标准参照文献[30]。由于灌区土壤水肥运移及作物养分吸收主要发生在土壤表层，因此本研究仅调整 0~30 cm 土层土壤电导率参数，>30~100 cm 土层不做变动。在设置土壤盐分水平的同时，重新计算 SWAT 土壤数据库各项参数，发现土壤电导率是通过影响土壤凋萎系数而影响土壤层有效持水量（SOL_AWC）参数，而土壤层有效持水量直接影响了 SWAT 模型对水肥运移的模拟，且不同土壤质地 SOL_AWC 随 EC 值变化特性不同，王瑾杰等^[31]的研究很好地表明该论点，2 种土壤类型的 SOL_AWC 参数随 4 种盐分水平变化取值见表 4。模型经过验证后，将 5 种耕作处理与 4 种盐分水平分别输入模型，重复进行模拟即可得出不同土壤类型下耕作方式与土壤盐渍化对总产水量、硝态氮运移量、作物吸氮量、硝酸盐渗滤量和作物产量的交互效应。区域总产水量指在模拟计算时段内（按日计）离开水文响应单元 HRU 并进入主河道（排水沟）的总水量（mm）。它包括地表径流、侧向径流和地下水径流（基流）对主河道流量的贡献 3 部分。不同水文路径硝态氮运移量指的是通过地表径流、侧向径流和地下水径流向主河道中输移的硝态氮量（kg/hm²）。研究共计 40 个处理，每个处理各 10 a 模拟按照 10 个重复进行分析计算。

表 3 不同处理相关参数取值

| Table 3 Values of relevant parameters for different treatments | | |
|--|----------------------|------------------------|
| 耕作处理 Tillage treatment | 混合深度 Mixing depth/mm | 混合效率 Mixing efficiency |
| 模板犁 Template plow (T4) | 150 | 0.95 |
| 常规春耕 Conventional spring ploughing (T3) | 125 | 0.5 |
| 少耕 Less tillage (T2) | 100 | 0.25 |
| 免耕 No tillage (T1) | 25 | 0.05 |
| 对照组 Control group (CK) | 0 | 0 |

表 4 不同盐分水平对应的土壤有效持水量参数取值

| Table 4 The effective water holding capacity parameter value of the soil corresponding to different salinity levels | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|
| 土壤类型 Soil types | 电导率 Electrical conductivity/(dS m ⁻¹) | | | |
| | 0.46 | 0.98 | 1.55 | 1.97 |
| 灌淤土 Cumulic anthrosols | 0.164 | 0.163 | 0.161 | 0.160 |
| 草甸盐土 Mollic solonchaks | 0.151 | 0.150 | 0.149 | 0.148 |

1.3.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 进行数据处理，使用 Origin 2018 进行绘图。处理间差异显著性采用方差分析（Analysis of Variance, ANOVA）——多因素方差分析。采用最小显著差异法（Least Significance Difference, LSD）进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型模拟结果及效率评价

将已有研究的径流和硝态氮参数取值直接用于本研究模型验证，计算得到径流、硝态氮和作物产量的模拟评价指标（图 2）。可以看出，径流和硝态氮 10 a 模拟的决定系数 R^2 均不低于 0.69，效率系数 E_{ns} 均不低于 0.58，相对误差（实测值平均值与模拟值平均值的差与实测值平均值的比值，RE）均低于 10%，满足 SWAT 模型校准评价标准。由此可知，使用已有研究中率定好的参数，研究区出口径流量、硝态氮排放量模拟结果与实测值吻合度均较好。由径流和硝态氮动态图可以看出（图 2），径流与硝态氮模拟值与实测值在年内 1—4 月期间吻合度较差，一方面由于灌区每年在 4 月中旬开始进行灌溉，到 11 月份秋浇截止，模型所选参数在灌溉期内更为敏感。另一方面，1—4 月在北方属冰冻期，模型对于该时期径流识别度较差，而实际总排干仍有较小的径流。由图 2c 和图 2d 可知，研究区 8 a 作物产量模拟值与实测值基本分布在 1:1 线附近，率定期和验证期的决定系数 R^2 均为 0.94，效率系数 E_{ns} 均不低于 0.93，RE 均低于 4%，模拟效果很好。这表明经验证的 SWAT 模型具有良好的模拟效果且可用于模拟灌区产水量、硝态氮及作物产量。

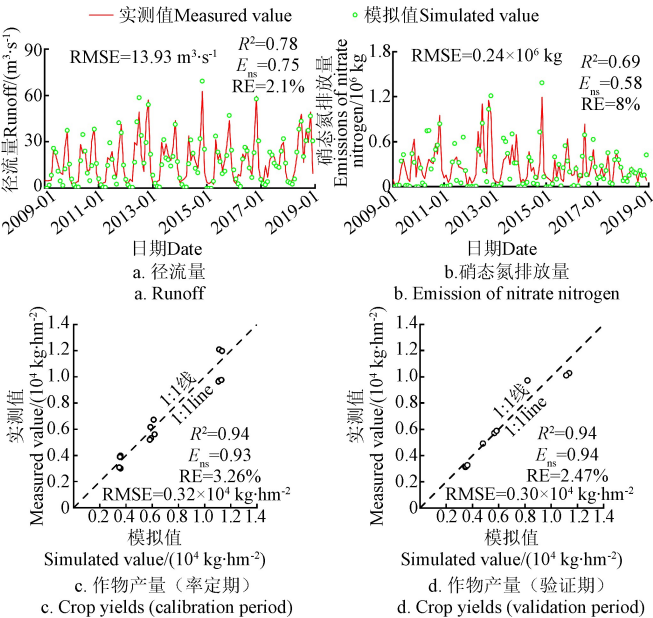


图 2 研究区出口径流、硝态氮和作物产量模拟值与实测值对比
Fig.2 Comparisons of simulated and measured values of outlet runoff, nitrate nitrogen and crop yields in the study area

2.2 改变耕作方式对不同盐渍土壤硝态氮运移及作物产量的影响

2.2.1 耕作方式与土壤盐渍化对区域总产水量的影响
多因素方差分析结果显示（表 5），土壤类型、耕作

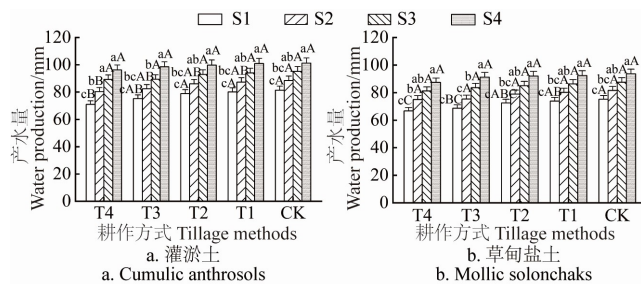
方式与土壤盐渍化对区域总产水量均产生极显著影响 ($P<0.01$)，但任两者或三者之间无显著交互作用 ($P>0.05$)。不同耕作方式和盐渍化水平下，灌淤土、草甸盐土区域总产水量动态变化如图 3 所示。从整体上看，灌淤土组的区域总产水量高于草甸盐土。在相同土壤类型、同种耕作方式下，区域总产水量随土壤盐渍化水平的提高呈增加趋势，且 S4 与 S1、S2 处理差异显著 ($P<0.05$)。灌淤土组中，与 S4 处理相比，S1、S2 处理总产水量平均分别减少了 22.2%、14.5%；草甸盐土组中，S1、S2 处理总产水量较 S4 处理平均分别减少了 21.9%、14.4%。同一盐渍化水平下，耕作方式对同种土壤类型总

产水量的影响存在差异。从整体上看，同一盐分水平下，相同土壤类型总产水量按照 T4、T3、T2、T1、CK 的顺序（即随耕作混合深度与混合效率参数的减小）呈现增加的趋势。灌淤土组中，仅 S1、S2 盐分处理的 T4 总产水量较 CK 分别显著减少了 12.8%、9.2%，其余处理均不显著 ($P>0.05$)；草甸盐土组中，仅 S1 盐分处理的 T4、T3 总产水量较 CK 分别显著减少了 11.2%、8.7%，其余盐分处理的耕作方式之间均不显著 ($P>0.05$)。综上，当土壤盐分处在较高水平时，耕作方式对区域产水量的影响较小。另外，土壤盐分增加较改变耕作方式对区域总产水量影响更显著。

表 5 土壤类型、耕作方式、盐分含量对产水量、硝态氮各指标和作物产量的影响的多因素方差分析 F 值

| 因素 Factor | 产水量 Water production | 作物吸氮量 Crop nitrogen uptake | 硝态氮淋溶量 Nitrate nitrogen leaching | 硝态氮运移量 Nitrate nitrogen transport | | | 作物产量 Crop yield | | |
|--------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| | | | | 地表 Surface | 侧向 Sideways | 地下 Underground | 小麦 Wheat | 玉米 Maize | 葵花 Sunflower |
| ST | 98.69** | 52.65** | 1 948.94** | 22 113.56** | 10 062.33** | 2 687.99** | 0.12 | 12.75** | 3.06 |
| TM | 13.53** | 23.19** | 53.63** | 37.30** | 50.60** | 57.79** | 44.55** | 56.68** | 7.24** |
| SS | 162.07** | 259.05** | 14.04** | 86.50** | 9.86** | 151.39** | 118.84** | 261.80** | 236.19** |
| ST×TM | 0.05 | 0 | 4.04** | 23.39** | 10.72** | 2.84* | 0.02 | 1.95 | 0.02 |
| ST×SS | 0.40 | 0 | 203.79** | 65.42** | 0.32 | 16.56** | 0.62 | 2.56 | 0.37 |
| TM×SS | 0.31 | 0.01 | 0.25 | 0.09 | 0.02 | 0.16 | 0.12 | 0.22 | 0.06 |
| ST×TM×SS | 0.08 | 0 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.28 | 0.05 |

注 (Note)：*, $P<0.05$; **, $P<0.01$ 。



注：不同小写字母表示同一土壤类型和同一耕作方式下不同盐分水平间差异显著 ($P<0.05$)；不同大写字母表示同一土壤类型和同一盐分水平下不同耕作方式间差异显著 ($P<0.05$)。S1~S4 分别代表非盐化土、轻度、中度和重度盐化土。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different salt levels under the same tillage method at the same soil type ($P<0.05$). Different capital letters indicate significant difference between different tillage methods under the same salt level at the same soil type ($P<0.05$). S1-S4 represent non-saline soil, mildly, moderately and heavily saline soil, respectively; The same is below.

图 3 2 种土壤类型下不同耕作方式与盐渍土水平总产水量动态
Fig.3 Dynamics of total water production under two soil types with different tillage methods and saline soil levels

2.2.2 耕作方式与土壤盐渍化对区域作物吸氮量的影响
由表 5 可知，土壤类型、耕作方式与土壤盐渍化对区域作物吸氮量均产生极显著影响 ($P<0.01$)，但任两者或三者之间无显著交互作用 ($P>0.05$)。不同耕作方式和盐渍化水平下，灌淤土、草甸盐土区域作物吸氮量动态变化如图 4 所示。从整体上看，灌淤土组的区域作物吸氮量高于草甸盐土。在相同土壤类型、同种耕作方式下，区域作物吸氮量随土壤盐分水平的提高呈显著降低趋势 ($P<0.05$)。灌淤土组中，与 S1 相比，S2、S3 和 S4 处理

作物吸氮量平均分别减少了 8.8%、17.5%、26.5%；草甸盐土组中，S2、S3 和 S4 处理作物吸氮量比 S1 平均分别降低了 9.2%、18.4%、27.8%。可见，各土壤类型作物吸氮量随盐分水平的提高降低幅度呈增加趋势，而且各盐分水平间绝对降低量也逐渐增加。在相同土壤类型，同一盐分水平下，耕作方式对区域作物吸氮量的影响存在差异。同一盐分水平下，相同土壤类型作物吸氮量按照 CK、T1、T2、T3、T4 的顺序呈现增加的趋势。灌淤土组中，S1、S2 盐分处理下，T4 与 CK 处理差异显著；S3、S4 盐分处理下，T4 与 T1、CK 处理差异显著。除 S1 处理外，草甸盐土组的其余各盐分处理的 T4 与 T1、CK 呈显著性差异。与 CK 处理相比，T4 处理作物吸氮量平均显著（2 种土壤）增加了 11.78%。各土壤类型作物吸氮量按 T1 至 T4 顺序增加幅度逐渐加大，但各耕作处理间绝对增加量呈先增加后降低趋势。

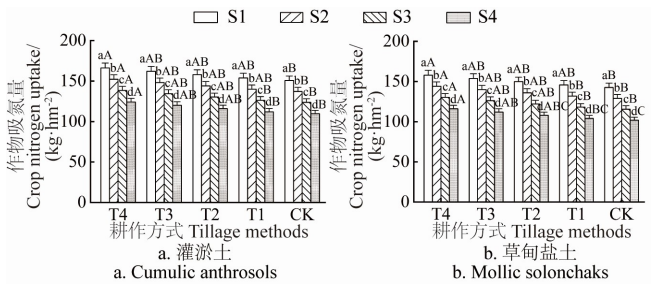


图 4 2 种土壤类型下不同耕作方式与盐渍土水平作物
吸氮量动态
Fig.4 Dynamics of nitrogen uptake by crops with different tillage methods and saline soil levels under two soil types

由此可见,与 CK 处理相比,混合深度与混合效率越大的耕作方式对作物吸氮量的影响效果更加明显。另外,根据均值分析结果可知,土壤盐分增加较改变耕作方式更能影响区域作物吸氮量。

2.2.3 耕作方式与土壤盐渍化对区域土壤硝态氮淋溶的影响

由表 5 可知,土壤类型、耕作方式与土壤盐渍化均显著影响区域土壤硝态氮淋溶量,其中土壤类型与耕作方式、土壤类型与土壤盐渍化分别对区域土壤硝态氮淋溶量产生极显著交互作用 ($P<0.01$)。不同耕作方式和盐渍化水平下,灌淤土、草甸盐土区域土壤硝态氮淋溶量动态变化如图 5 所示。

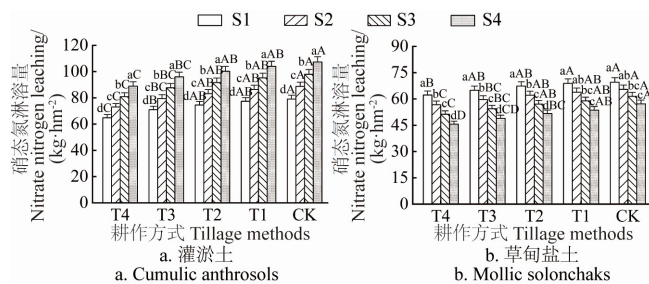


图 5 2 种土壤类型下不同耕作方式与盐渍土水平土壤硝态氮淋溶量动态

Fig.5 Dynamics of soil nitrate-nitrogen leaching amount under two soil types with different tillage methods and saline soil levels

从整体上看,灌淤土组的区域土壤硝态氮淋溶量高于草甸盐土。同种耕作方式下,不同土壤类型土壤硝态氮淋溶量受土壤盐分影响存在差异。灌淤土组中,各耕作处理土壤硝态氮淋溶量随土壤盐分水平的提高呈显著增加趋势 ($P<0.05$)。与 S1 相比, S2、S3 和 S4 处理土

壤硝态氮淋溶量平均分别增加了 12%、23.6%、35.4%。草甸盐土组中,同种耕作处理 (T1 与 CK 除外) 土壤硝态氮淋溶量随土壤盐分水平的提高呈显著降低趋势 ($P<0.05$)。与 S1 相比, S2、S3 和 S4 处理土壤硝态氮淋溶量平均分别减少了 5.8%、11.6%、17.8%。

相同土壤类型,同一盐渍化水平下,耕作方式对土壤硝态氮淋溶量的影响存在差异。从整体上看,同一盐分水平下,相同土壤类型硝态氮淋溶量按照 T4、T3、T2、T1、CK 的顺序呈现增加的趋势。耕作方式对硝态氮淋溶的影响机理同 2.3.1 节对总产水量的影响机理相似,此处不再赘述。灌淤土组中,与 CK 处理相比, T3 和 T4 处理的硝态氮淋溶量平均分别显著减少了 10.47%、17.58% ($P<0.05$)。可见,灌淤土组的硝态氮淋溶减少量随耕作混合深度的增加逐渐增加,且绝对减少量也逐渐增加。草甸盐土组中, T3 和 T4 较 CK 处理平均分别减少了 14.47%、20.16%。与 CK 处理相比, T4 处理硝态氮淋溶量平均 (2 种土壤) 显著减少了 16.5% ($P<0.05$)。可以看出,草甸盐土组的硝态氮淋溶减少量随耕作混合深度的增加逐渐增加,但绝对减少量呈先增加后减少再增加的趋势。

2.2.4 耕作方式与土壤盐渍化对硝态氮运移量的影响

由表 5 可知,土壤类型、耕作方式与土壤盐渍化对不同水文路径硝态氮运移量的影响存在差异。三者均对地表与地下硝态氮运移量产生极显著影响 ($P<0.01$),且土壤类型与耕作方式、土壤类型与盐分处理产生显著交互作用,但耕作方式与盐分处理及三者之间无显著交互作用。三因素均对侧向硝态氮运移量产生显著影响,但仅土壤类型与耕作方式两者产生显著交互作用。不同耕作方式和盐分水平下,灌淤土、草甸盐土各水文路径硝态氮运移量如表 6 所示。

表 6 2 种土壤类型下不同耕作方式与盐渍土水平各水文路径硝态氮运移量

Table 6 Nitrate nitrogen transport in different hydrological paths with different tillage methods and saline soil levels under two soil types $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

| 土壤盐分 Soil salinity | 耕作方式 Tillage methods | 灌淤土 Cumulic anthrosols | | | 草甸盐土 Mollic solonchaks | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------|------------------------|---------------|----------------|
| | | 地表 Surface | 侧向 Sideways | 地下 Underground | 地表 Surface | 侧向 Sideways | 地下 Underground |
| S1 | CK | 0.11±0.004cA | 0.45±0.02aA | 4.91±0.18dA | 0.91±0.03cA | 0.17±0.01aA | 3.23±0.12cA |
| | T1 | 0.11±0.004cA | 0.45±0.02aA | 4.88±0.18dA | 0.90±0.03cA | 0.17±0.01aA | 3.21±0.12cA |
| | T2 | 0.11±0.004cAB | 0.43±0.02aAB | 4.69±0.17dAB | 0.87±0.03cAB | 0.17±0.01aAB | 3.08±0.12cAB |
| | T3 | 0.10±0.004cBC | 0.41±0.02aBC | 4.46±0.17dBC | 0.82±0.03cBC | 0.16±0.01aBC | 2.94±0.11cBC |
| | T4 | 0.09±0.003cC | 0.38±0.01aC | 4.10±0.15dC | 0.76±0.03cC | 0.15±0.01aC | 2.70±0.1cC |
| S2 | CK | 0.12±0.004bcA | 0.45±0.02aA | 5.42±0.20cA | 0.99±0.04bcA | 0.17±0.01abA | 3.49±0.13bcA |
| | T1 | 0.12±0.004bcA | 0.44±0.02aA | 5.39±0.20cA | 0.98±0.04bcA | 0.17±0.01abA | 3.47±0.13bcA |
| | T2 | 0.11±0.004bcAB | 0.43±0.02aAB | 5.18±0.19cAB | 0.95±0.04bcAB | 0.16±0.01abAB | 3.34±0.12bcAB |
| | T3 | 0.11±0.004bcBC | 0.41±0.02aBC | 4.93±0.18cBC | 0.90±0.03bcBC | 0.15±0.01abB | 3.17±0.12bcBC |
| | T4 | 0.10±0.004bcC | 0.37±0.01aC | 4.53±0.17cC | 0.83±0.03bcC | 0.14±0.01abC | 2.91±0.11bcC |
| S3 | CK | 0.12±0.005abA | 0.44±0.02aA | 5.92±0.22bA | 1.07±0.04abA | 0.16±0.01abA | 3.74±0.14abA |
| | T1 | 0.12±0.005abA | 0.44±0.02aA | 5.89±0.22bA | 1.06±0.04abA | 0.16±0.01abA | 3.72±0.14abA |
| | T2 | 0.12±0.004abAB | 0.42±0.02aAB | 5.66±0.21bAB | 1.02±0.04abAB | 0.16±0.01abAB | 3.57±0.13abAB |
| | T3 | 0.11±0.004abBC | 0.40±0.02aBC | 5.38±0.2bBC | 0.97±0.04abBC | 0.15±0.01abBC | 3.40±0.13abBC |
| | T4 | 0.10±0.004abC | 0.37±0.01aC | 4.94±0.18bC | 0.89±0.03abC | 0.14±0.01abC | 3.12±0.12abC |
| S4 | CK | 0.13±0.005aA | 0.43±0.02aA | 6.42±0.24aA | 1.15±0.04aA | 0.16±0.01bA | 3.99±0.15aA |
| | T1 | 0.13±0.005aA | 0.43±0.02aA | 6.38±0.24aA | 1.15±0.04aA | 0.16±0.01bA | 3.96±0.15aA |
| | T2 | 0.12±0.005aAB | 0.41±0.02aAB | 6.14±0.23aAB | 1.10±0.04aAB | 0.15±0.01bAB | 3.81±0.14aAB |
| | T3 | 0.12±0.004aBC | 0.39±0.02aBC | 5.84±0.22aBC | 1.05±0.04aBC | 0.14±0.01bBC | 3.63±0.14aBC |
| | T4 | 0.11±0.004aC | 0.36±0.01aC | 5.36±0.20aC | 0.96±0.04aC | 0.13±0.01bC | 3.33±0.12aC |

整体来看(表 6), 灌淤土组的硝态氮运移总量高于草甸盐土。与灌淤土相比, 草甸盐土的硝态氮地表运移量平均高 0.855 kg/hm^2 。对于侧向运移而言, 灌淤土比草甸盐土平均高 0.26 kg/hm^2 (167.7%)。对于地下运移而言, 灌淤土比草甸盐土平均高 1.931 kg/hm^2 (57%)。灌淤土组中, 硝态氮地表运移量低于侧向运移量, 而草甸盐土反之, 且 2 种土壤类型均是地下运移占主导地位。灌淤土组中, 同一耕作方式, S1、S2 盐分处理的硝态氮地表运移量较 S4 处理平均显著减少了 13.3%和 8.3% ($P<0.05$); 侧向运移量各盐分水平无显著差异 ($P>0.05$); 地下运移量 S2、S3、S4 比 S1 分别平均增加了 10.5%、20.62%、30.82%, 且差异显著 ($P<0.05$)。草甸盐土组中, 同一耕作方式, S1、S2 盐分处理的硝态氮地表运移量较 S4 处理平均显著减少了 21.4%和 14.1% ($P<0.05$); 侧向运移量 S1 较 S4 处理平均显著增加了 11%; 地下运移量 S1、S2 较 S4 处理平均显著减少了 19.1%和 12.5% ($P<0.05$)。可以看出, 硝态氮地表与地下运移量随盐分增加呈上升趋势, 而硝态氮侧向运移量随盐渍化水平的提高逐渐减少。这是因为随盐分的增加土壤层有效持水量逐渐减少, 导致土壤剖面内的硝态氮绝对含量减少, 因而硝态氮侧向运移量逐渐减少。

相同土壤类型, 同一盐渍化水平下, 耕作方式对各水文路径硝态氮运移量的影响存在差异。从整体上看, 同一盐分水平下, 相同土壤类型硝态氮运移量按照 T4、T3、T2、T1、CK 的顺序呈现增加的趋势。与 CK 处理相比, 同种土壤类型下, T3 与 T4 处理可以显著减少各盐分水平土壤下硝态氮地表、侧向和地下运移量。其中, T4 较 CK 处理硝态氮地表、侧向和地下运移量平均 (2 种土壤) 分别显著减少了 16.4%、16.5%和 16.5% ($P<0.05$)。

2.2.5 耕作方式与土壤盐渍化对作物产量的影响

由表 5 可知, 对于小麦和葵花产量, 仅耕作方式与土壤盐渍化 2 个因素对其产生极显著影响; 对于玉米产量, 土壤类型、耕作方式与土壤盐渍化均对其产生极显著影响 ($P<0.01$), 但任两者或三者之间对 3 种作物均无显著交互作用 ($P>0.05$)。不同耕作方式和盐分水平下, 灌淤土、草甸盐土小麦、玉米、葵花产量如表 7 所示。整体来看, 灌淤土组的小麦、玉米、葵花产量均高于草甸盐土。相同土壤类型, 同种耕作方式下, 玉米和葵花作物产量随土壤盐分水平的提高呈显著下降趋势 ($P<0.05$)。与 S1 处理相比, 2 种土壤类型在 S2、S3、S4 处理下的玉米产量平均减少了 9.1%、18.19%、27.31%, 葵花产量平均减少了 8.59%、17.3%、26%; 小麦产量在 S3、S4 处理平均减少了 12.76%、19.15%, 且差异显著 ($P<0.05$)。与 S1 处理相比, S4 处理小麦、玉米、葵花产量平均 (2 种土壤) 显著减少了 19.15%、27.31%、26%。整体来看, 相同土壤类型, 同一盐渍化水平下, 小麦产量随耕作方式混合深度的增加逐渐减小, 玉米、葵花产量随耕作方式混合深度的增加呈上升趋势。与 CK 处理相比, 2 种土壤类型在 T3 和 T4 处理下的小麦产量平均减少了 9.12%、14.67%, 且差异显著 ($P<0.05$)。同一盐渍化水平, 不同土壤类型下, 耕作方式对玉米产量的影响存在差异。灌淤土组中, 与 CK 处理相比, T3、T4 处理玉米产量平均显著增加了 12.4%和 22%; 草甸盐土组中, 除 S1 处理不显著外, T4 较 CK 处理玉米产量平均显著增加了 18.5%。同一盐渍化水平下, 不同耕作方式对葵花作物产量的影响无显著性差异 ($P>0.05$)。综上所述可以看出, 土壤盐分增加较改变耕作方式对作物产量影响更显著。

表 7 2 种土壤类型下不同耕作方式与盐渍土水平小麦、玉米、葵花产量

Table 7 Yield of wheat, maize and sunflower under two soil types with different tillage methods and saline soil levels $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

| 土壤盐分 Soil salinity | 耕作方式 Tillage methods | 灌淤土 Cumulic anthrosols | | | 草甸盐土 Mollic solonchaks | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|
| | | 小麦 Wheat | 玉米 Maize | 葵花 Sunflower | 小麦 Wheat | 玉米 Maize | 葵花 Sunflower |
| S1 | CK | 5 702±199aA | 10 420±352aC | 3 436±117aA | 5 300±197aA | 9 347±347aA | 3 129±116aA |
| | T1 | 5 576±194aAB | 10 620±359aC | 3 454±118aA | 5 172±192aAB | 9 445±351aA | 3 155±117aA |
| | T2 | 5 397±188aAB | 11 040±373aBC | 3 476±119aA | 4 994±185aAB | 9 644±358aA | 3 203±119aA |
| | T3 | 5 193±181aBC | 11 607±392aAB | 3 540±121aA | 4 769±177aBC | 9 869±366aA | 3 268±121aA |
| | T4 | 4 893±170aC | 12 406±419aA | 3 612±123aA | 4 480±166aC | 10 120±376aA | 3 372±125aA |
| S2 | CK | 5 315±185abA | 9 363±316bC | 3 124±107bA | 4 972±185abA | 8 427±313bB | 2 883±107bA |
| | T1 | 5 202±181abAB | 9 539±322bC | 3 140±107bA | 4 860±180abAB | 8 557±318bB | 2 908±108bA |
| | T2 | 5 036±175abAB | 9 936±336bBC | 3 160±108bA | 4 697±174abAB | 8 786±326bAB | 2 941±109bA |
| | T3 | 4 842±169abBC | 10 488±354bAB | 3 212±110bA | 4 495±167abBC | 9 083±337bAB | 2 992±111bA |
| | T4 | 4 554±159abC | 11 320±382bA | 3 305±113bA | 4 220±157abC | 9 509±353bA | 3 091±115bA |
| S3 | CK | 4 929±172bcA | 8 307±281cC | 2 812±96cA | 4 646±172bcA | 7 509±279cC | 2 637±98cA |
| | T1 | 4 829±168bcAB | 8 460±286cC | 2 826±96cA | 4 547±169bcAB | 7 669±285cBC | 2 650±98cA |
| | T2 | 4 675±163bcAB | 8 834±298cBC | 2 844±97cA | 4 399±163bcAB | 7 929±294cBC | 2 669±99cA |
| | T3 | 4 492±157bcBC | 9 371±317cB | 2 885±98cA | 4 222±157bcBC | 8 298±308cAB | 2 705±100cA |
| | T4 | 4 215±147bcC | 10 236±346cA | 2 998±102cA | 3 960±147bcC | 8 898±330cA | 2 800±104cA |
| S4 | CK | 4 541±158cA | 7 248±245dC | 2 499±85dA | 4 317±160cA | 6 588±245dC | 2 391±89dA |
| | T1 | 4 454±155cAB | 7 378±249dC | 2 511±86dA | 4 233±157cAB | 6 779±252dC | 2 393±89dA |
| | T2 | 4 313±150cAB | 7 728±261dBC | 2 528±86dA | 4 100±152cAB | 7 070±262dBC | 2 399±89dA |
| | T3 | 4 140±144cBC | 8 251±279dB | 2 557±87dA | 3 947±146cBC | 7 510±279dB | 2 420±90dA |
| | T4 | 3 875±135cC | 9 148±309dA | 2 690±92dA | 3 699±137cC | 8 283±307dA | 2 510±93dA |

3 讨论

3.1 土壤盐分对氮素运移及作物产量的影响

土壤层有效持水量 (SOL_AWC) 是土壤中能被作物吸收利用的水量, 即田间持水量与凋萎系数之间的土壤含水量。研究表明, 土壤盐分含量通过影响土壤凋萎系数进而影响土壤层有效持水量大小^[31], 而土壤层有效持水量直接影响着区域水和养分的迁移转化。区域产水量是进入灌区内的水量经土壤入渗最终通过排水渠系流出区外的总水量, 也是土壤溶质运移的重要载体^[32]。本研究中, 在相同土壤类型、同种耕作方式下, 随着土壤盐分水平的提高区域总产水量呈增加趋势, 这是因为随着土壤盐分的增加, 土壤层有效持水量呈下降趋势, 土壤层有效持水量的减少势必会导致区域总排水量的增加^[31]。但张健等^[33]研究表明, 土壤水分垂直入渗量随盐分增加呈减小趋势, 这与本研究结果不一致, 可能是由于该试验采用室内土柱模拟入渗研究, 与区域非均质土壤模拟产生较大差别。除此之外, 随着土壤盐渍化程度的加重, 在区域总产水量逐渐增加的同时, 硝态氮地下运移量及灌淤土组硝态氮淋溶量也呈递增趋势, 这表明土壤盐分增加促进了土壤水分的下渗, 加剧了土壤养分的快速流失, 对地下水环境污染造成潜在的风险。值得注意的是, 随着土壤盐分的增加, 草甸盐土组硝态氮淋溶量逐渐减小, 原因可能是草甸盐土的饱和水力传导系数相对较小且黏土比例较高 (表 1), 土壤盐分的增加可能会使养分吸附在土壤颗粒表面, 从而抑制养分的流失, 同时也致使了土壤溶液中的硝态氮浓度变高。Katerji 等^[10]研究表示, 盐分会对作物生长产生抑制作用, 导致作物对养分的吸收利用效率降低, 从而增加了养分的潜在淋失量。本研究表示, 随着土壤盐分的增加, 作物吸氮量和作物产量呈递减趋势。这是因为根系土壤盐分过高导致土壤或者营养液渗透势减小, 从而抑制作物对氮的吸收能力^[34]; 此外, 土壤层有效持水量的减少使得作物对土壤中的可利用养分减少, 随水排出的养分增多, 最终导致作物吸氮量的减少。周慧等^[12]研究表示土壤盐分水平由轻度上升为中度后, 各处理植株氮素吸收总量与作物产量显著降低, 这与本研究结果相同。

3.2 耕作方式对氮素运移及作物产量的影响

研究表明, 转变耕作方式可以改变区域产水量的大小^[35]。本研究显示, 同一盐分水平下, 相同土壤类型总产水量随着耕作方式混合深度与混合效率的增大呈现递减的趋势。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。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更加明显, 而不进行任何耕作处理则会保持较好的毛细管分布, 为土壤排水提供有利条件。秦红灵等^[36]研究表明, 深松相比免耕降低表层土壤容重, 增加蓄水能力, 增强作物对水分的利用效率, 这与本研究结果相似。吕美蓉等^[37]也表示, 相对于常规耕作, 深松耕能提高土壤水分充足期的土壤含水率, 增加冬小麦产量。与受到盐分影响结果相似, 耕作使区域产水量减小的同时, 硝态氮淋溶量和各

水文路径的硝态氮运移量也在减小, 总的作物吸氮量呈增加趋势。这是因为土壤经过耕作处理后, 使得土壤中养分重新分布, 并将渗滤在深层土壤中的养分与浅层土壤混合, 增加了根系养分吸收利用量。此外, 魏燕华等^[38]研究表明, 耕作能够影响耕作范围内土壤容重, 保证了作物吸收养分所需的水肥气热的条件。但是耕作措施对不同作物产量变化趋势影响差异显著。本研究中, 小麦产量表现出不耕作要优于耕作, 而玉米、葵花产量则随耕作混合深度与混合效率的增大而增加。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。有研究表明, 与传统耕作方式相比, 采用少免耕耕作技术可使小麦产量增加 10.27%^[39]。李福建等^[40]研究也表明, 针对小麦两年田间试验均以免耕产量最高, 比耕翻分别增产 25.4% 和 15.2%。但闫秋艳等^[41]研究表示, 深松和深翻比免耕均能提高小麦产量。徐永刚等^[42]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^[43]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 a 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试验结果有所差别。秦红灵等^[36]研究表示, 2 a 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, 需对模型模拟的每年结果进行具体对比分析, 同时对转变耕作方式对养分与作物的影响可进一步深入研究。

河套灌区地势平坦, 具有坡度小、地下水浅埋等特点, 明确耕作方式与土壤盐渍化对区域养分流失和作物生长的影响具有重要意义。利用 SWAT 模型设置耕作情景及盐分变化虽然可以针对不同土地利用、土壤类型条件下养分流失进行模拟, 且相比大田试验具有操作方便、模拟时段长等优势。但模型中的耕作模块仅有混合深度与混合效率 2 个条件, 对秸秆覆盖条件没有具体说明, 且模型中的混合深度与混合效率数值同灌区实际耕作标准存在一定差别, 这会对模型模拟效果产生一定的影响。此外, 模型中盐分变化仅直接影响了土壤层有效持水量参数, 但实际上可能还会影响土壤中其他的参数, 如饱和水力传导系数、有机碳含量等。因此, 在今后的研究中, 需结合灌区自身因素进一步改进 SWAT 模型, 使得该模型的模拟过程与灌区实际更加贴近。

4 结论

1) 利用已校准参数的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型对河套灌区径流、硝态氮直接进行验证得到决定系数 R^2 均不低于 0.69, 效率系数均不低于 0.58, 相对误差均低于 10%; 作物产量模拟值与实测值基本分布在 1:1 线附近, 率定期和验证期决定系数 R^2 均为 0.94, 效率系数均不低于 0.93, 相对误差均低于 4%。表明了经验证的 SWAT 模型具有良好的模拟效果且可用于

模拟灌区产水量、硝态氮及作物产量。

2) 耕作方式与土壤盐分对区域总产水量、作物吸氮量、硝态氮淋溶量、硝态氮运移及作物产量均有显著影响。其中, 区域产水量、硝态氮淋溶量、不同水文路径(地表、侧向和地下径流)硝态氮运移量及小麦产量随耕作混合深度与混合效率的增加逐渐减少, 作物吸氮量、玉米与葵花产量随混合深度与混合效率的增加逐渐增加。与不添加耕作管理相比, 模板犁耕作作物吸氮量平均(2种土壤)显著增加了11.78%, 硝态氮淋溶量平均显著减少了16.5%, 有效降低了土壤养分流失和地下水污染。另外, 模板犁耕作使小麦产量显著降低了14.67%。

3) 土壤盐分增加通过降低土壤层有效持水量, 显著增加了区域总产水量、硝态氮淋溶量(草甸盐土除外)及硝态氮地下运移量, 减少了作物吸氮量和作物产量。与非盐化土壤相比, 重度盐化土壤处理小麦、玉米、葵花产量平均(2种土壤)显著减少了19.15%、27.31%、26%。

土壤盐分增加较改变耕作方式对区域产水量、土壤养分和作物产量影响更显著。因此, 为更好治理灌区污染严重和作物产量下降等问题, 需将重点放在区域土壤盐渍化防控与治理上。

[参 考 文 献]

- [1] 王伦平, 陈亚新, 曾国芳. 内蒙古河套灌区灌溉排水与盐渍化防治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993.
- [2] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17.
Shi Haibin, Yang Shuqing, Li Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: Current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌溉情景下氮素迁移的模拟[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 853-858.
Hao Fanghua, Sun Wen, Zeng Ayan, et al. Simulation of N transfer under different irrigation and fertilization scenarios in the Hetao irrigation area using HYDRUS-1D model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(5): 853-858. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陶园, 徐静, 任贺靖, 等. 黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 257-264.
Tao Yuan, Xu Jing, Ren Hejing, et al. Spatiotemporal evolution of agricultural non-point source pollution and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 257-264. (in Chinese with English abstract)
- [5] Ashraf M, Waheed A. Responses of some genetically diverse lines of chick pea (*Cicer arietinum* L.) to salt[J]. Plant and Soil, 1993, 154(2): 257-266.
- [6] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 117-124.
Zhang Wanfeng, Yang Shuqing, Lou Shuai, et al. Effects of tillage methods and straw mulching on the root distribution and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [7] 何林海, 楼玲, 粟贵俊, 等. 耕作方式对大棚青菜生长和产量与土壤盐分的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(5): 913-915.
He Linhai, Lou Ling, Su Guijun, et al. Effect of different tillage methods on vegetable yield and soil salt content in greenhouse[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(5): 913-915. (in Chinese with English abstract)
- [8] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-688.
- [9] Ceccoli G, Senn M E, Bustos D, et al. Genetic variability for responses to short- and long-term salt stress in vegetative sunflower plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(6): 882-890.
- [10] Katerji N, Mastrorilli M, Lahmer F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 1-9.
- [11] Adams P. Effect of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield quality and composition of tomato grown in rockwool[J]. Journal of Horticultural Sciences, 1991, 66(2): 201-207.
- [12] 周慧, 史海滨, 徐昭, 等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氮挥发及玉米产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1649-1656.
Zhou Hui, Shi Haibin, Xu Zhao, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(7): 1649-1656. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙哲, 毕军, 夏光利, 等. 2种耕作方式下玉米还田秸秆养分释放特征研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(9): 133-136.
Sun Zhe, Bi Jun, Xia Guangli, et al. Study of characteristic of nutrient releasing of maize straw with two tillage methods[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(9): 133-136. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang W Y, Yuan J C, Gao S M, et al. Conservation tillage enhances crop productivity and decreases soil nitrogen losses in a rainfed agroecosystem of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122854.
- [15] Zhang Y, Xie D T, Ni J P, et al. Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area: No-till is better than mulch-till[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 300: 107003.
- [16] Qi Z J, Feng H, Zhao Y, et al. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 219-231.
- [17] Ding Z L, Kheir A, Ali O, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111388.
- [18] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于多源数据融合的盐分遥感反演与季节差异性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 169-180.
Sun Yanan, Li Xianye, Shi Haibin, et al. Remote sensing inversion of soil salinity and seasonal different analysis based on multi-source data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 169-180. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 102-109.
Huang Quanzhong, Xu Xu, Lü Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2018, 34(1): 102-109. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈俊英, 姚志华, 张智韬, 等. 大田葵花土壤含盐量无人机遥感反演研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 178-191. Chen Junying, Yao Zhihua, Zhang Zhitao, et al. UAV remote sensing inversion of soil salinity in field of sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 178-191. (in Chinese with English abstract)
- [21] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(6): 1553-1566.
- [22] Xiong L Y, Xu X, Ren D Y, 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[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 1-16.
- [23] Xie H, Chen L, Shen Z Y. Assessment of agricultural best management practices using models: Current issues and future perspectives[J]. Water, 2015, 7(12): 1088-1108.
- [24] 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[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(4): 625-632.
- Fu Tonggang, Jiang Wanyan, Liu Peng, et al. Farmer's participation consciousness and the influencing factors in the reclamation of saline-alkali land in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 625-632. (in Chinese with English abstract)
- [25] 内蒙古水利水电勘测设计院. 黄河内蒙古续建配套与节水改造规划报告[M]. 呼和浩特: 内蒙古水利厅水利水电出版社, 1999.
- [26] 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[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 158-166.
- Wang Weigang, Shi Haibin, Li Xian Yue, et al. Effect of correcting crop planting structure data to improve simulation accuracy of SWAT model in irrigation district based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17): 158-166. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于多源数据的中原黄泛区土壤盐分空间变异分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 115-120.
- Wu Yakun, Liu Guangming, Yang Jinsong, et al. Spatial variability of soil salinity based on multi-source data for typical zone of flood area of the Yellow River in central China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 115-120. (in Chinese with English abstract)
- [28] Moriasi D N, Arnold J G, van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [29] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 盐分与有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 295-304.
- Zhou Hui, Shi Haibin, Guo Jiawei, et al. Effect of salt and organic-inorganic fertilizer proportion on soil nitrogen mineralization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 295-304. (in Chinese with English abstract)
- [30] 史海滨. 盐渍化土壤水热盐迁移与节水灌溉理论研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [31] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆, 等. 基于多源遥感数据的艾比湖流域盐土 SWAT 模型参数修正[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 139-144.
- Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. SWAT model parameters correction based on multi-source remote sensing data in saline soil in Ebinur Lake Watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 139-144. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 12-13.
- [33] 张健, 魏占民, 韩冬, 等. 聚丙烯酰胺对盐渍化土壤水分垂直入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 256-261.
- Zhang Jian, Wei Zhanmin, Han Dong, et al. The influence of polyacrylamide on vertical infiltration characteristics of saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 256-261. (in Chinese with English abstract)
- [34] Hoorn J W V, Katerji N, Hamdy A, et al. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil[J]. Agricultural Water Management, 2001, 51(2): 87-98.
- [35] 汪可欣, 付强, 张中昊, 等. 秸秆覆盖与表土耕作对东北黑土根区土壤环境的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 131-137.
- Wang Kexin, Fu Qiang, Zhang Zhonghao, et al. Effects of straw mulching mode and tillage methods on soil environment of root zone in northeast black soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 131-137. (in Chinese with English abstract)
- [36] 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[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
- Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [37] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 41-46.
- Lü Meirong, Li Zengjia, Zhang Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and stover returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [38] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 87-95.
- Wei Yanhua, Zhao Xin, Zhai Yunlong, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 87-95. (in Chinese with English abstract)
- [39] 杜桂林, 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[J]. 中国农技推广, 2020, 36(10): 69-71.
- Du Jialin, Hou Haipeng, Lu Dongqi, et al. Effects of minimum tillage and no tillage methods on soil physical and chemical properties and wheat yield[J]. China Agricultural Technology Extension, 2020, 36(10): 69-71. (in Chinese with English abstract)
- [40] 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[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 41-49.
- Li Fujian, Xu Dongyi, Wu Peng, et al. Effects of mechanical tillage and sowing methods on photosynthetic production and yield of wheat in rice stubble[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [41] 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[J]. 水土保持学报, 2021,

- 35(1): 222-228.
 Yan Qiuyan, Dong fei, Jia Yaqin, et al. Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 222-228. (in Chinese with English abstract)
- [42] 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[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 428-432.
 Xu Yonggang, Ma Qiang, Zhou Hua, et al. Effects of straw returning and deep loosening on soil physical and chemical properties and maize yields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 428-432. (in Chinese with English abstract)
- [43] 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[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2020, 41(3): 4-9.
 Hu Shuping, Bao Haizhu, Meng Tiantian, et al. Effect of sub-soiling on soil characteristics and yield characters of oil sunflower[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2020, 41(3): 4-9. (in Chinese with English abstract)

Effects of tillage modes and soil salinity on regional nitrate nitrogen transport and crop yields using a SWAT model

Wang Weigang, Shi Haibin^{*}, Li Xian Yue, Sun Yanan, Zheng Qian, Zhang Wencong,
 Wang Guoshuai, Zhou Hui, Yan Yan, Dou Xu

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

Abstract: A Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was selected to simulate the dynamic changes of water and fertilizer migration, and crop yields under different tillage modes and soil salinization levels. The Hetao Irrigation District with the complex spatial variability of soil salinity were taken as the research object, where three areas were divided: Jiefangzha, Yongji, and Yichang irrigation area. Some parameters were utilized for the simulation and verification of the model, including eight runoff and seven nitrate-nitrogen variables. At the same time, five parameters of crop growth were selected using the existing research. Finally, the specific values of each variable were measured at the outlets of irrigation areas. The soil types were also the cumelic anthrosols and mollic solonchaks in the study area. Four salinity levels were set under the two soil types, according to the grades of non-salinized soil (S1), lightly salinized soil (S2), moderately salinized soil (S3), and heavily salinized soil (S4). At the same time, five farming treatments were selected in the long-term farming mode: no-tillage management (CK), no tillage (T1), less tillage (T2), conventional spring tillage (T3), and template plowing (T4). A systematic investigation was then made on the effects of tillage modes and soil salinization on water production, crop nitrogen uptake, nitrate-nitrogen leaching and transportation, as well as the crop yields in the irrigation areas. As such, the salinized soil was be adjusted to reduce environmental pollution, while promoting the grain production, and the sustainable development of agriculture. The results show that the SWAT model with the calibrated parameters performed better than before to directly verify the runoff and nitrate nitrogen, where the determination coefficient R^2 , and the efficiency coefficient were not less than 0.69 and 0.58, respectively, while the absolute value of the Relative Error (RE) was less than 10%. The simulated and measured crop yields were basically distributed near the 1:1 line, where the efficiency coefficient and R^2 values in the calibration and validation period were not less than 0.93 and 0.94, respectively, and the RE absolute value was less than 4%. The validated SWAT model presented an excellent performance to simulate the water production, nitrate-nitrogen transport, and crop yield in the irrigation areas. There were some significant effects of tillage modes and soil salinity on the total regional water production, crop nitrogen uptake, nitrate-nitrogen leaching, nitrate-nitrogen transport, and crop yield ($P < 0.05$). Among them, the regional water production, nitrate-nitrogen leaching, nitrate-nitrogen transport run in different hydrological paths, whereas, the wheat yield gradually decreased, with the increase of tillage mixing depth and efficiency. The amount of nitrogen uptake by crops and the yield of corn and sunflower gradually increased, with the increase of mixing depth and efficiency. The nitrogen uptake of template plowing crops increased by 11.78% on average, and the nitrate-nitrogen leached volume was reduced by 16.5% on average, indicating an effective reduction in the soil nutrient loss and groundwater pollution. In addition, the output of maize and sunflower increased but the output of wheat decreased, compared with no-tillage treatment. The increase in the soil salinity significantly increased the total regional water production, and nitrate-nitrogen leaching (except for the Mollic Solonchaks). The effective water holding capacity of the soil layer greatly contributed to reducing the underground nitrate nitrogen transport, as well as the amount of crop nitrogen uptake and crop yield. The yields of wheat, maize, and sunflower in the treatment of heavily saline soil were significantly reduced by 19.15%, 27.31%, and 26% on average ($P < 0.05$), compared with non-salinized soil. There was a more significant impact of soil salinity on the regional water production, soil nutrients, and crop yields, compared with the tillage modes. Therefore, a strong recommendation can be addressed to focus on the prevention, control, and treatment of regional soil salinization, in order to better manage the serious pollution in the irrigation areas and crop yields. This finding can also provide a theoretical basis for the sustainable development of agriculture in the Hetao Irrigation District.

Keywords: soils; salt; nitrogen; SWAT model; Hetao Irrigation District; tillage method; nitrate nitrogen transport; crop yield