

## 内蒙古河套灌区主要作物农田氮素平衡及潜在污染状况分析

赵巴音那木拉, 路战远, 李斐, 红梅, 杨海波, 德海山, 包明哲

### 引用本文:

赵巴音那木拉, 路战远, 李斐, 红梅, 杨海波, 德海山, 包明哲. 内蒙古河套灌区主要作物农田氮素平衡及潜在污染状况分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1347-1354.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1237>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 559-567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0840>

#### 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558-1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

#### 秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 刘庆平, 闫立龙

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2528-2536 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1022>

#### 沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响

孙芳芳, 江涛, 成剑波, 何腾兵, 秦松, 汪国英, 洪建明

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1327-1336 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1190>

#### 长江流域典型单季稻田间水文及氮素流失特征

耿芳, 刘连华, 欧阳威, 朱建强

农业环境科学学报. 2023, 42(1): 132-141 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0287>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵巴音那木拉, 路战远, 李斐, 等. 内蒙古河套灌区主要作物农田氮素平衡及潜在污染状况分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1347–1354.  
ZHAO B Y N M L, LU Z Y, LI F, et al. Analysis of nitrogen balance and potential pollution of main crops in the Hetao Irrigation area of Inner Mongolia[J].  
Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(6): 1347–1354.

# 内蒙古河套灌区主要作物农田氮素平衡及潜在污染状况分析

赵巴音那木拉<sup>1,2,3</sup>, 路战远<sup>4</sup>, 李斐<sup>1,2,3\*</sup>, 红梅<sup>1,2,3</sup>, 杨海波<sup>1,2,3</sup>, 德海山<sup>1,2,3</sup>, 包明哲<sup>1,2,3</sup>

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010018; 4. 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031)

**摘要:**为从氮素平衡的角度研究河套灌区氮素潜在污染风险, 本文以河套灌区主要种植作物玉米和向日葵为研究对象, 分析了传统种植模式下玉米和向日葵收获期农田土壤无机氮残留现状, 并从氮素平衡角度利用氮素盈余、氮素潜在损失对玉米和向日葵种植的环境污染风险进行了分析。结果表明: 河套灌区农田土壤残留无机氮随着施氮量的增加而增加, 玉米田和向日葵田0~90 cm土壤无机氮(以N计)平均残留量分别为66.11 kg·hm<sup>-2</sup>和45.53 kg·hm<sup>-2</sup>。灌区中部的五原县玉米田土壤无机氮残留量最高, 可达336.93 kg·hm<sup>-2</sup>, 向日葵田以东部乌拉特前旗最高, 残留量达273.66 kg·hm<sup>-2</sup>。玉米田和向日葵田平均氮素年输入总量分别为514.81 kg·hm<sup>-2</sup>和314.73 kg·hm<sup>-2</sup>, 以化肥氮为主, 占总氮素输入的85%以上。氮素输出主要是作物吸收带走, 玉米和向日葵平均氮素年输出总量为362.10 kg·hm<sup>-2</sup>和209.65 kg·hm<sup>-2</sup>。过高的氮素输入导致玉米和向日葵年平均氮素盈余分别高达235.71 kg·hm<sup>-2</sup>和168.08 kg·hm<sup>-2</sup>, 并伴随着每年169.60 kg·hm<sup>-2</sup>和122.55 kg·hm<sup>-2</sup>潜在损失的氮素。通过氮素平衡的综合分析得出, 内蒙古河套灌区保持现有产量水平的玉米氮肥推荐用量约为280 kg·hm<sup>-2</sup>, 向日葵为150 kg·hm<sup>-2</sup>, 与目前河套灌区玉米和向日葵氮肥投入相比, 分别节约198 kg·hm<sup>-2</sup>和128 kg·hm<sup>-2</sup>, 同时该施用量也可以显著降低潜在损失的氮, 降低环境压力。

**关键词:** 土壤氮残留; 氮素平衡; 污染风险; 河套灌区

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)06-1347-08 doi:10.11654/jaes.2022-1237

## Analysis of nitrogen balance and potential pollution of main crops in the Hetao Irrigation area of Inner Mongolia

ZHAO Bayinmulla<sup>1,2,3</sup>, LU Zhanyuan<sup>4</sup>, LI Fei<sup>1,2,3\*</sup>, HONG Mei<sup>1,2,3</sup>, YANG Haibo<sup>1,2,3</sup>, DE Haishan<sup>1,2,3</sup>, BAO Mingzhe<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Grassland and Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Hohhot 010018, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development in Inner Mongolia Autonomous Region Higher Education, Hohhot 010018, China; 4. Inner Mongolia Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010031, China)

**Abstract:** The potential nitrogen pollution risk in the Hetao Irrigation area was studied from the perspective of nitrogen balance to provide a scientific basis for farmland nitrogen management in this area. Soil nitrogen balance is an important parameter to evaluate nitrogen use efficiency and environmental risk in farmlands. In this paper, maize and sunflower were selected as the main crops in the Hetao Irrigation area. The status of soil inorganic nitrogen residues during harvest under the traditional planting mode was investigated. The environmental

收稿日期: 2022-12-01 录用日期: 2023-04-18

作者简介: 赵巴音那木拉(1986—), 男, 内蒙古兴安盟人, 硕士研究生, 从事农田面源污染研究。E-mail: namula88@163.com

\*通信作者: 李斐 E-mail: lifei@imau.edu.cn

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD009)

Project supported: Major Science and Technology Project of Inner Mongolia Autonomous Region(2019ZD009)

pollution risk in maize and sunflower fields was analyzed through the potential loss of surplus nitrogen from the perspective of nitrogen balance. The residual inorganic nitrogen in a farmland in the Hetao Irrigation area increased with increasing nitrogen application rate. The average residual inorganic nitrogen at a depth of 0~90 cm in maize and sunflower fields was  $66.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $45.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. The maize field, located in the central Wuyuan County, had a residual inorganic nitrogen amount of  $336.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , while the sunflower fields located in the east of Ulate south Banner, had the highest residual amount of  $273.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The annual input of nitrogen in maize and sunflower fields was  $514.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $314.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Fertilizer nitrogen was the main nitrogen input, accounting for more than 85% of total nitrogen input. Nitrogen output was mainly absorbed and assimilated by crops. The average annual nitrogen output of maize and sunflower fields were  $362.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $209.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. The annual nitrogen surplus values of  $235.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $168.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively, were accompanied by a substantial amount of potential nitrogen loss  $169.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $122.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. According to the comprehensive analysis of nitrogen balance, the recommended nitrogen fertilizer amount for maize and sunflower to maintain the current yield level in Hetao irrigation area of Inner Mongolia is about  $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Compared with the current nitrogen fertilizer input of maize and sunflower in Hetao irrigation area, this fertilizer application rate can save  $198 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $128 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. This also can significantly reduce the potential loss of nitrogen and reduce environmental pressure.

**Keywords:** soil nitrogen residues; nitrogen balance; pollution risk; Hetao Irrigation area

化肥作为作物的“粮食”,对作物产量的提高发挥了巨大作用<sup>[1]</sup>。氮肥是农田化肥的重要组成部分,我国农田化肥投入中氮肥占比较大,施用强度远高于世界平均水平<sup>[2]</sup>,然而氮肥利用率却仅有30%左右<sup>[3-4]</sup>。

黄河流域内的内蒙古河套灌区是我国的主要粮食生产区,主要种植向日葵和玉米,其播种面积占总播种面积的70%以上。近年来,河套灌区过量施用氮肥和粗放的灌溉方式已经引起了一系列的环境污染问题,因此,学者们在河套灌区主要作物农田氮素管理、损失规律与阻控措施等方面开展了大量的研究<sup>[5-7]</sup>,并取得了良好的经济效益和环境效益。李哲<sup>[8]</sup>对河套灌区玉米的研究表明,在传统灌溉基础上减少20%灌水量和施氮肥 $216 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,能最大限度提高玉米氮素吸收、降低土壤中硝态氮残留、减少环境中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。氮肥用量介于 $216 \sim 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间时对玉米各生长指标的促进作用效果最佳,超过 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米氮素积累增加效果不明显甚至产生抑制作用,并且氮素损失增加;戴嘉璐等<sup>[9]</sup>的研究也表明,在当地传统灌水量 $3\,375 \text{ m}^3$ 和施氮量 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的基础上,灌水量减少20%和氮肥用量减少50%后玉米产量没有显著变化,但是土壤中的硝态氮累计量减少23.2%,从而提高了肥料利用率,降低了淋失污染风险。郭富强<sup>[10]</sup>对河套灌区向日葵的研究表明,在当地常规灌水与施氮的基础上节水节氮20%,向日葵产量可提高16%,氮肥利用率提高36%,而且明显减少了氮素淋失量。因此,过多的投入和粗放的灌溉方式不仅浪费资源,还会加大环境压力。

但是,目前河套灌区农户作物种植过程氮肥施用

量远超作物最佳施用量<sup>[10-11]</sup>,生长期未被利用的大量氮肥,一部分损失到环境中,加剧了环境污染,另一部分残留在土壤中,增加了污染风险。特别是河套灌区多年存在的“秋浇”习惯,大量的灌溉不仅将盐分淋洗到更深土层,而且还将残留在土壤中的硝酸盐淋洗到根层以下,甚至浅层地下水。已有研究表明,在当前的耕作制度及秋浇定额下,河套灌区每年损失的氮约 $2.6 \times 10^7 \text{ kg}$ <sup>[12]</sup>,这不仅降低了氮肥的利用率,还提高了环境污染风险。目前的研究大部分只是小区域尺度上的研究,并且农作物单一,而从不同作物生长环境氮素平衡的角度和区域尺度分析氮素盈余及环境污染风险的研究鲜见报道。

因此,本研究通过大量问卷调查、实地采样及对试验数据及相关研究结果进行综合分析,明确内蒙古河套灌区主要农作物——玉米和向日葵当季土壤氮素残留特性及地区差异性,并采用氮素平衡定量分析该地区的氮素污染风险,以期为该地区的农田氮素管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区主要分布在巴彦淖尔市内,位于 $40^\circ 19' \sim 41^\circ 18' \text{N}$ ,  $106^\circ 20' \sim 109^\circ 19' \text{E}$ ,海拔 $990 \sim 1\,060 \text{ m}$ 之间,现有灌溉面积 $55.83 \text{ 万 hm}^2$ ,是中国设计灌溉面积最大的灌区。该地区属于温带大陆性气候,年均气温 $7^\circ \text{C}$ ,年降水量 $139 \sim 222 \text{ mm}$ ,年蒸发量 $2\,200 \sim 2\,400 \text{ mm}$ ,全年封冻期 $5 \sim 6$ 个月,无霜期 $135 \sim 150 \text{ d}$ 。耕地土壤长期受人为活动的影响,形成了灌淤土和盐

土为主的土壤类型。研究区主要作物为向日葵和玉米,其占总播种面积的72%(2020年),耕作方式为单种和套种。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 研究方法

试验于2020年3月作物播种前和9月作物收获后进行(秋浇前),在内蒙古河套灌区选择农作物播种面积较大的乌拉特前旗、五原县、杭锦后旗3个旗县,以旗(县)域内主要种植作物玉米和向日葵为研究对象,采用分区、GPS定点、随机抽样调查的方法,对玉米和向日葵种植户进行入户调查及实地土样采集。调查内容包括种植户基本信息、播种量、前茬作物、播种日期、化肥用量、施肥方式、化肥种类、灌溉时期、灌溉方式、灌溉量、作物种植面积及产量。

### 1.2.2 样品采集与测定

调查田块采用蛇形采样方法取10个点的混合土壤样品,重复3次,取样深度为0~30、30~60、60~90 cm 3个土层,每个旗县选择5个田块以30 cm为分段取0~210 cm深度的土壤样品。玉米共选取41个田块,向日葵共选取42个田块。将每个田块所取的每层土壤样品分别混匀,带回实验室过2 mm筛,用天平称10 g新鲜土样,放入塑料瓶中,加入50 mL 2 mol·L<sup>-1</sup>的氯化钾溶液,振荡30 min,过滤,用连续流动分析仪(AA3)测定土壤中铵态氮和硝态氮含量。

### 1.3 计算方法

输入氮(kg·hm<sup>-2</sup>):

化肥氮输入=化肥氮施用量×肥料含氮量。

灌溉水输入氮=灌溉水中全氮含量(mg·L<sup>-1</sup>)×年灌溉用水量(m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)×10<sup>-3</sup>,根据调查数据和已有的文献报道,河套灌区作物生育期灌溉水量约为3 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,含氮量为2.42 mg·L<sup>-1</sup>[13-15],计算灌溉水输入氮为7.26 kg·hm<sup>-2</sup>。

种子输入氮=播种量(kg)×干质量与鲜质量比例系数(0.88)×作物干质量含氮量,根据笔者试验测定玉米和向日葵籽粒平均含氮量分别为1.45%、4.48%,计算出种子输入氮分别为0.29、0.12 kg·hm<sup>-2</sup>。

干湿沉降输入氮,根据以往的研究报道估算[16],内蒙古地区每年干湿沉降氮平均为14.7 kg·hm<sup>-2</sup>。

非共生固氮,由于河套灌区该指标研究较少,参考已有研究[17],估算为15 kg·hm<sup>-2</sup>。

输出氮(kg·hm<sup>-2</sup>):

收获带走氮=产量/100×2.03(4.19),根据大量的文献资料报道,玉米和向日葵每生产100 kg需要纯氮

2.03、4.19 kg。河套灌区玉米和向日葵产量为12 000~15 000 kg·hm<sup>-2</sup>和3 300~3 600 kg·hm<sup>-2</sup>,以13 750 kg·hm<sup>-2</sup>和3 500 kg·hm<sup>-2</sup>来计算收获带走的氮量。经前期调查数据显示,农户秸秆还田比例较低,暂不考虑秸秆输入土壤中的氮含量[18-22]。

土壤残留氮=作物收获前后土壤无机氮增量(mg·kg<sup>-1</sup>)×面积(hm<sup>2</sup>)×土层深度(cm)×容重(g·cm<sup>-3</sup>)/10,0~30、30~60、60~90 cm土层容重分别按1.44、1.38、1.36 g·cm<sup>-3</sup>计算[23]。

氮素损失,根据笔者近几年试验研究数据和文献资料报道,本研究以玉米田土壤氮挥发20 kg·hm<sup>-2</sup>、反硝化作用损失3 kg·hm<sup>-2</sup>和氮素淋失60 kg·hm<sup>-2</sup>,向日葵田土壤氮挥发35 kg·hm<sup>-2</sup>、反硝化作用损失3 kg·hm<sup>-2</sup>和氮素淋失25 kg·hm<sup>-2</sup>来计算河套灌区氮素损失量[7,12,14,24]。

氮盈余=化肥氮输入+灌溉输入氮+种子输入氮+干湿沉降输入氮+非共生固氮-收获带走氮。

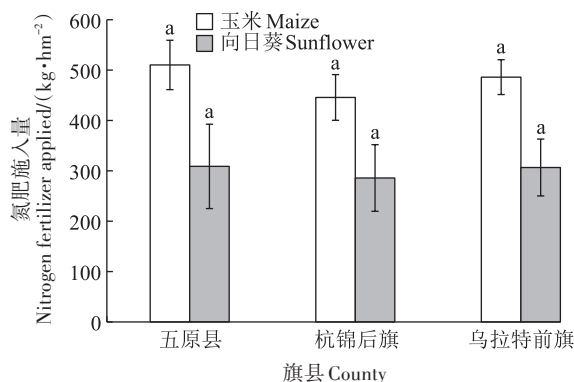
潜在损失氮=氮盈余-土壤残留无机氮(0~90 cm土体残留量)。

## 2 结果与分析

### 2.1 河套灌区主要种植作物化肥氮投入

据调查,2020年河套灌区作物总播种面积为76.78万hm<sup>2</sup>,其中玉米28.78万hm<sup>2</sup>、向日葵326.53万hm<sup>2</sup>,占总播种面积的72%。

从化肥投入情况来看(图1),氮肥投入与作物需肥规律和产量有直接的关系,河套灌区玉米田氮肥投入量较高,平均为477.56 kg·hm<sup>-2</sup>,向日葵为277.65 kg·hm<sup>-2</sup>;五原县玉米和向日葵氮肥投入量最高,达



不同小写字母表示不同地区同一作物间差异显著( $P<0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences between the same crop in different regions ( $P<0.05$ ).

图1 不同旗县氮肥平均投入量

Figure 1 Average nitrogen fertilizer input in different counties



510.20、308.83 kg·hm<sup>-2</sup>,其次为乌拉特前旗。这可能与不同区域农户的氮肥习惯用量有关。

## 2.2 河套灌区主要作物土壤无机氮残留分布特征

由图2和图3可知,河套灌区内不同作物种植地块施氮量和土壤无机氮残留量有所差异,玉米和向日

葵种植地块平均施氮量分别为477.56、277.65 kg·hm<sup>-2</sup>,平均无机氮残留量(0~90 cm)分别为66.11、45.53 kg·hm<sup>-2</sup>。由玉米田土壤无机氮残留量空间分布情况发现,河套灌区中部五原县和东部乌拉特前旗的玉米田土壤无机氮残留量较高,最高值出现在隆兴

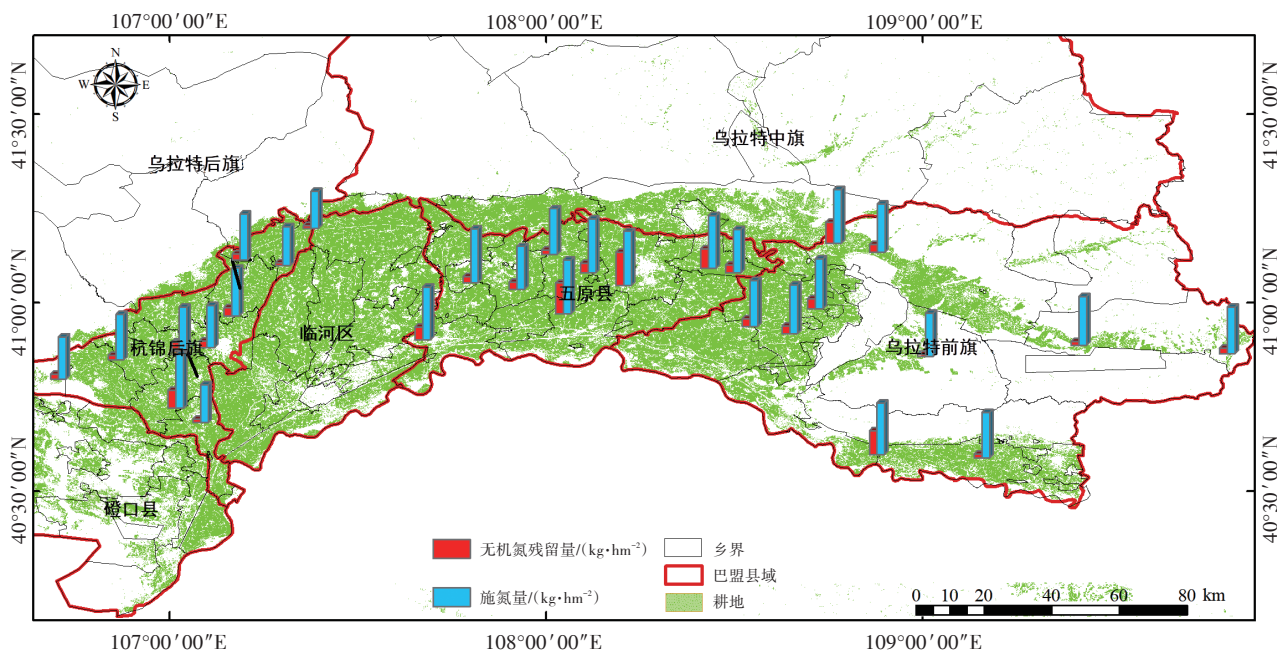


图2 河套灌区玉米田施氮量与土壤无机氮残留量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of maize fields nitrogen fertilizer application amount and soil inorganic nitrogen residue in Hetao Irrigation area

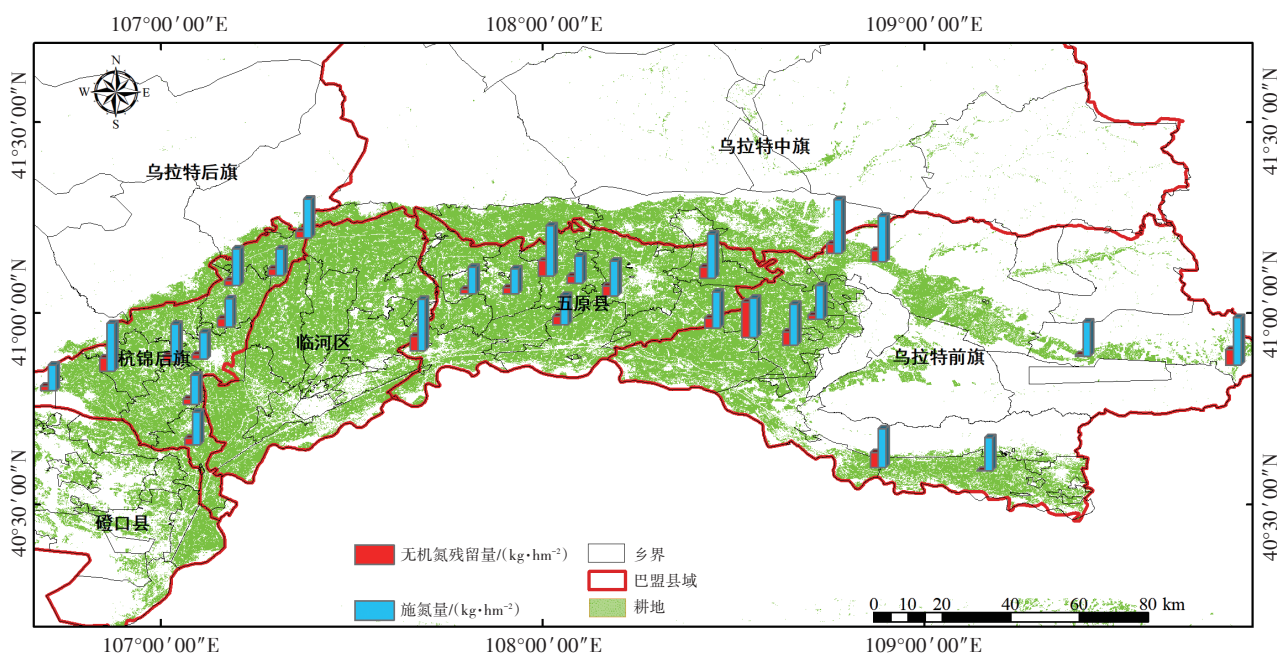


图3 河套灌区向日葵田施氮量与土壤无机氮残留量空间分布

Figure 3 Spatial distribution of sunflower fields nitrogen fertilizer application amount and soil inorganic nitrogen residue in Hetao Irrigation area

昌镇宏伟村,达336.93 kg·hm<sup>-2</sup>,占施氮量的61.7%,而西部杭锦后旗相对较低。由向日葵田土壤无机氮残留量空间分布情况发现,东部乌拉特前旗向日葵田土壤无机氮残留量较高,最高值出现在西小召镇槐木村,达273.66 kg·hm<sup>-2</sup>,而中部五原县和西部杭锦后旗无机氮残留量较低。由此可见,不同作物、不同地块土壤无机氮残留量差异较大,且土壤无机氮残留量高的地块,相应的氮肥施用量高。

2.3 河套灌区主要作物不同土层无机氮残留量分布

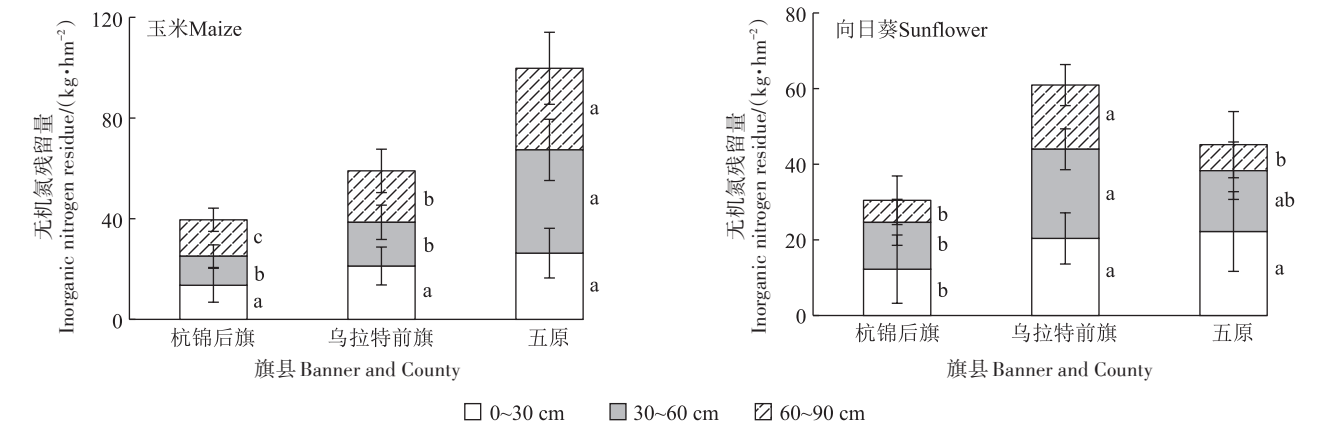
由河套灌区玉米田和向日葵田0~90 cm土体无机氮残留量可知(图4):玉米田平均氮残留量为66.11 kg·hm<sup>-2</sup>,其中五原县最高,达99.77 kg·hm<sup>-2</sup>,其次为乌拉特前旗,为59.0 kg·hm<sup>-2</sup>;向日葵田平均氮残留量为45.53 kg·hm<sup>-2</sup>,乌拉特前旗最高,达60.94 kg·hm<sup>-2</sup>,其次为五原县,为45.17 kg·hm<sup>-2</sup>。

为了秋后淋盐、春季保墒,河套灌区收获后通常

进行秋浇,这会使土壤无机氮更易被淋移至更深层的土壤中。由图4可知,河套灌区耕层(0~30 cm)土壤无机氮残留量占比较小,耕层以下(30~90 cm)土壤无机氮残留量占比较大,玉米田占69.19%,向日葵田占59.86%,相比于向日葵,玉米田秋灌后土壤氮素的淋失风险更大。

2.4 河套灌区主要作物农田氮素盈余

根据上述农田输入和输出氮素的计算方法与土壤无机氮素残留的计算结果(表1),可得农田氮素年输入总量为:玉米田514.81 kg·hm<sup>-2</sup>,向日葵田314.73 kg·hm<sup>-2</sup>。每年的氮素输出为作物收获带走和氮素损失,计算得到农田氮素年输出总量为:玉米田362.1 kg·hm<sup>-2</sup>,向日葵田209.65 kg·hm<sup>-2</sup>。河套灌区玉米和向日葵农田氮素处于大量盈余状态,年盈余量分别为235.71、168.08 kg·hm<sup>-2</sup>;年度土壤无机氮残留量分别为66.11、45.53 kg·hm<sup>-2</sup>,玉米田氮素潜在损失风险高



不同小写字母表示同一土层不同地区间差异显著( $P<0.05$ )。  
Different lowercase letters indicate significant differences between different areas of the same soil layer ( $P<0.05$ ).

图4 河套灌区玉米和向日葵不同土层无机氮残留量

Figure 4 Inorganic nitrogen residue at different soil layers of maize and sunflower fields in Hetao Irrigation area

表1 河套灌区玉米和向日葵农田氮素盈余(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Nitrogen surplus of maize and sunflower fields in Hetao Irrigation area(kg·hm<sup>-2</sup>)

| 项目 Item                                          |                                        | 玉米 Maize      | 向日葵 Sunflower |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|---------------|
| 输入项 Input                                        | 施入氮肥 Nitrogen fertilizer applied       | 477.56±187.80 | 277.65±109.00 |
|                                                  | 灌水带入的氮 Nitrogen from irrigation        | 7.26          | 7.26          |
|                                                  | 干湿沉降 Dry and wet deposition            | 14.70         | 14.70         |
|                                                  | 种子带入的氮 Nitrogen brought in by the seed | 0.29          | 0.12          |
|                                                  | 非共生固氮 A symbiotic nitrogen fixation    | 15.00         | 15.00         |
| 输出项 Output                                       | 收获带走 Nitrogen taken away by harvest    | 279.10±45.23  | 146.65±25.07  |
|                                                  | 氮素损失 Nitrogen loss                     | 83.00         | 63.00         |
|                                                  | 氮素盈余 Surplus of nitrogen               | 235.71        | 168.08        |
| 土壤无机氮残留(0~90 cm) Soil inorganic nitrogen residue |                                        | 66.11         | 45.53         |
| 潜在损失氮 Potential loss of nitrogen                 |                                        | 169.60        | 122.55        |

于向日葵田。

## 2.5 河套灌区主要作物田氮素污染风险分析

土壤中残留的无机氮素是氮素损失、污染的潜在来源,不合理的施肥和灌溉方式很容易加剧氮素的损失,导致环境污染。由表2可以看出:向日葵和玉米0~60 cm土层土壤无机氮残留量与氮肥施入量呈极显著正相关,高氮肥投入显著增加了土壤无机氮残留量;灌水量对不同土层土壤氮素残留量分布具有明显影响,随着灌水量的增加极显著增加了60~90 cm土层的无机氮含量,按当地传统秋浇后,0~90 cm土体的无机氮很容易被淋洗到根区外的深层土壤当中,因而会加剧农田氮素污染风险。科学施肥和合理灌溉是减缓河套灌区向日葵田和玉米田氮素损失和面源污染的有效措施。

表2 河套灌区不同土层无机氮残留与氮肥施入和灌水量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of inorganic nitrogen residues in different soil layers and nitrogen fertilizer application and irrigation amount in Hetao Irrigation district

| 作物<br>Crop       | 土层<br>Soil layer/cm | 氮肥施入量<br>Nitrogen fertilizer applied | 灌水量<br>Irrigation amount |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 向日葵<br>Sunflower | 0~30                | 0.541 2**                            | 0.357                    |
|                  | 30~60               | 0.619 5**                            | 0.719 1**                |
|                  | 60~90               | 0.338 5                              | 0.506 7**                |
| 玉米 Maize         | 0~30                | 0.570 8**                            | -0.034 9                 |
|                  | 30~60               | 0.635 9**                            | 0.035 5                  |
|                  | 60~90               | -0.143 1                             | 0.692 1**                |

注:数字表示相关系数,\*表示 $P<0.05$ 显著相关;\*\*表示 $P<0.01$ 显著相关。

Note: The number indicates the correlation coefficient, \* indicates that  $P<0.05$  is significantly correlated; \*\* indicates a significant correlation at  $P<0.01$ .

## 3 讨论

玉米和向日葵作物90%以上的根系集中在0~90 cm土层中,仅有少量根系深入到90 cm以下。因此,深层土壤的无机氮很难被植物吸收利用,不合理的施肥、灌水很容易导致残留在根区(0~90 cm)土层中的无机氮迁移到根区(90 cm以下)以外的土层,从而造成污染。2020收获期(秋浇前)河套灌区农田土壤残留无机氮随着施氮量的增加而增加,玉米田土壤0~90 cm无机氮平均残留量为 $66.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,向日葵田平均残留量为 $45.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图4),玉米残留量最高田块达 $336.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占施氮量(高氮,  $546 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )的61.7%,向日葵最高残留量达 $273.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图2、图3)。刘德平<sup>[25]</sup>在河套灌区玉米地得出类似研究结果,收获期根区土壤无机氮残留量在高氮处理( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )下达到了 $231.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占施氮量的57%,说明施氮量的高低直接影响土壤无机氮的残留量,残留量越高,污染风险越大。2020年河套灌区作物全生育期灌溉次数为4次,导致大量的无机氮淋洗到根区外土层当中。本研究通过调查每个旗县玉米和向日葵5个田块0~210 cm土层无机氮残留量发现(图5),玉米地根区外土层(90 cm以下)平均富集无机氮 $83.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占整个0~210 cm土层无机氮残留量的70.10%,向日葵田块根区外土层平均富集无机氮 $47.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占整个土层的54.31%,可见土壤中50%以上的无机氮分布在90 cm以下的土层中。另外,秋浇是河套灌区传统的秋后淋盐、春季保墒的一种特殊的灌溉制度,是河套灌区一年来灌水量最大的一次,为 $1\ 800\sim 2\ 000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。冯兆忠等<sup>[12]</sup>研究发现,河套灌区农田秋浇后,玉米田块 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积高峰向

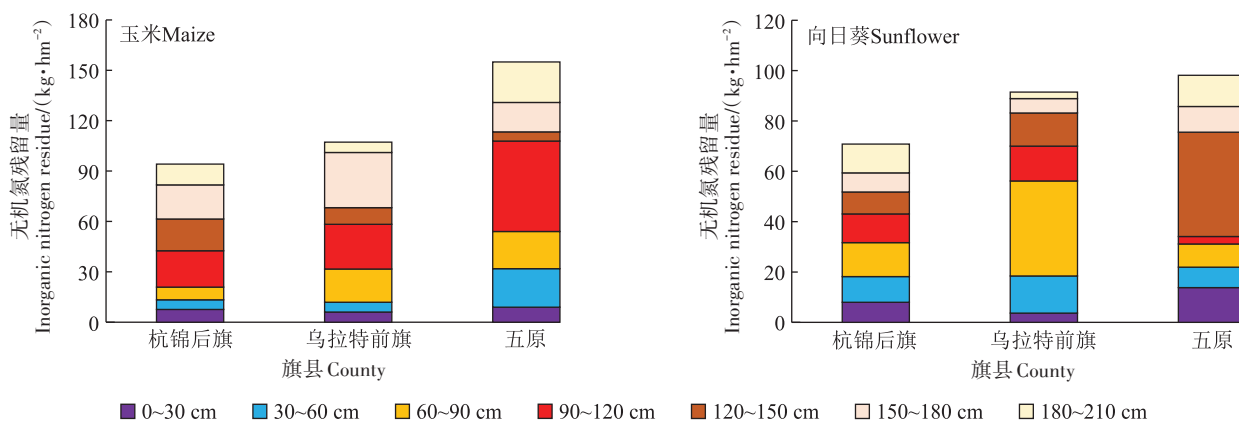


图5 河套灌区玉米和向日葵0~210 cm土层无机氮残留量

Figure 5 Residual inorganic nitrogen at 0~210 cm soil layers of maize and sunflower fields in Hetao irrigation area



下迁移了40 cm,40~60 cm土层的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 损失量最大,并且主要富集在80 cm土层以下,向日葵地秋浇后表层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量明显低于灌溉前。本研究是秋浇前土壤无机氮残留量,因此,秋浇后根区土层中的无机氮很容易淋洗到根区外的土层中,产生富集,加大污染风险。目前,内蒙古河套灌区玉米和向日葵农田施氮量较大,这与农民为获得较高的产量而投入过量的氮肥有直接的关系,玉米地氮肥投入量平均高达 $477.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,向日葵地高达 $277.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表1),根据河套灌区目前的生产水平来看,玉米和向日葵农田的氮肥投入量远高于作物吸收的氮量。在高氮投入的同时,河套灌区农田氮素存在大量的盈余,且伴随有大量潜在损失的氮。作物收获后未被利用的氮主要以潜在损失的氮和残留无机氮形式存在,在缺氮或适量施氮条件下,土壤作物系统中潜在损失的氮和残留无机氮均较低,在高氮条件下,氮素盈余急剧增加,总体上表现为随着施氮量的增加而增加<sup>[26-27]</sup>,

刘德平<sup>[25]</sup>对河套灌区玉米地的优化施肥田间试验表明,中氮( $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )条件下,氮素盈余在 $222.5\sim 231.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,而高氮( $405\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )条件下,则达到了 $351.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,当施氮量达到中氮水平时,再增施氮肥将产生显著的氮素损失,造成环境污染,并且高氮处理显著增加了37.6%~51.1%的土壤氮素残留以及77.3%~91.0%的氮素表观(潜在)损失,而玉米植株吸氮量增加的并不显著,说明高氮并不能显著增加玉米产量;戴嘉璐等<sup>[9]</sup>对河套灌区玉米地减肥试验表明,在试验区农民常规施肥量( $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )减少50%的情况下,获得了和农民相近的产量,但常规施肥条件下,全生育期土壤硝态氮累积量高出65.7%。因此,河套灌区合理的氮肥施用是减少氮素盈余和潜在损失氮的关键。在内蒙古河套灌区目前的生产水平条件下,根据巨晓棠<sup>[11]</sup>的作物氮肥推荐量,保持现有产量水平的氮肥推荐量,玉米约为 $280\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,向日葵约为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与目前河套灌区玉米和向日葵氮肥投入相比,分别节约 $198\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $128\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,且该施用量也可以显著降低潜在损失的氮,降低环境压力。

#### 4 结论

内蒙古河套灌区玉米和向日葵农田氮素处于大量盈余状态,玉米田氮素年盈余量占投入量的49%左右,向日葵田高达60%以上,并伴随着每年 $169.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $122.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 潜在的氮素损失。通过氮

素平衡的综合分析得出,内蒙古河套灌区保持现有产量水平的玉米氮肥推荐量约为 $280\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,向日葵为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与目前河套灌区玉米和向日葵氮肥投入相比,分别节约 $198\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $128\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,同时该施用量也可以显著降低潜在损失的氮,降低环境压力。

#### 参考文献:

- [1] 星焱,胡小平.中国新一轮粮食增产的影响因素分析:2004—2011年[J].中国农村经济,2013(6):14-26. XING Y, HU X P. Analysis of the influencing factors of China's new round of grain production: 2004—2011[J]. *China Rural Economy*, 2013(6):14-26.
- [2] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018. The People's Republic of China Bureau of Statistics. China statistical year book[M]. Beijing:China Statistics Press, 2018.
- [3] PENG S, BURESH R J, HUANG J, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3):649-656.
- [4] 万伟帆,李斐,红梅,等.氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2018, 24(3):693-702. WAN W F, LI F, HONG M, et al. Effects of nitrogen rate and urease inhibitor on  $\text{N}_2\text{O}$  emission and  $\text{NH}_3$  volatilization in drip irrigated potato fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3):693-702.
- [5] 李风军,杨树青,史海滨,等.河套灌区秋浇期氮素流失对水环境的影响[J].中国农村水利水电,2012(6):40-42, 46. LI F J, YANG S Q, SHI H B, et al. The influence of Hetao Irrigation district autumn poured period nitrogen element loss on water environment[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(6):40-42, 46.
- [6] 赵春晓,郑海春,郜翻身,等.不同处理对河套灌区玉米土壤硝态氮和铵态氮动态及氮肥利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2017(6):99-104. ZHAO C X, ZHENG H C, GAO F S, et al. Effect of different materials on dynamic change of soil nitrate and ammonium nitrogen and N uptake by maize in Hetao Irrigation area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6):99-104.
- [7] 武岩,红梅,林立龙,等.不同施肥措施对河套灌区盐化潮土氨挥发及氧化亚氮排放的影响[J].土壤,2017, 49(4):745-752. WU Y, HONG M, LIN L L, et al. Influence of different fertilization measures on  $\text{NH}_3$  volatilization and  $\text{N}_2\text{O}$  emission in salined flavoquic soil of Hetao Irrigation area[J]. *Soils*, 2017(4):745-752.
- [8] 李哲.河套灌区滴灌施肥对玉米生长及氮素利用效率影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018:70-74. LI Z. Effects of drip fertigation on maize growth and nitrogen use efficiency in Hetao Irrigation district[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2018:70-74.
- [9] 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[J].水土保持学报,2021, 35(1):271-277. DAI J L, LI R P, LI C C, et al. Effects of water saving and fertilizer reducing on water and nutrients of maize at different growth stages in the Hetao



- Irrigated area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 271-277.
- [10] 郭富强. 内蒙古河套灌区农田退水氮磷迁移特征及最优施肥模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012: 82-90. GUO F Q. Research on migration characteristics of nitrogen and phosphorus and optimal fertilization mode in agricultural withdrawal of water in Hetao Irrigated district of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012: 82-90.
- [11] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证: 兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261. JU X T. Improvement and validation of theoretical N rate(TNR): discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261.
- [12] 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[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2027-2032. FENG Z Z, WANG X K, FENG Z W, et al. Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao Irrigation district, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2027-2032.
- [13] 徐昭. 水氮限量对河套灌区玉米光合性能与产量的影响及其作用机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 16-20. XU Z. Effect of limited irrigation and nitrogen rate on photosynthetic performance and yield of maize in Hetao Irrigation district and its regulation mechanism[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020: 16-20.
- [14] 常菲, 郜翻身, 红梅, 等. 施肥措施对河套灌区氮素淋溶和玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2951-2958. CHANG F, GAO F S, HONG M, et al. Effects of fertilization measures on nitrogen leaching and maize yield in Hetao Irrigation area[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 37(10): 2951-2958.
- [15] 田野, 李畅游, 赵胜男, 等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 162-166. TIAN Y, LI C Y, ZHAO S N, et al. Assessment of water environmental quality in Inner Mongolia section of Yellow River based on fuzzy mathematics[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(5): 162-166.
- [16] ZANG Y B, XU W, WEN Z, et al. Atmospheric deposition of inorganic nitrogen in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(6): 810-822.
- [17] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697. ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat summer maize rotation system in Northern China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684-697.
- [18] 谭金芳. 作物施肥原理与技术[M]. 二版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 39-49. TAN J F. Principles and techniques of crop fertilization[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 39-49.
- [19] 唐慎欣. 小麦-玉米种植体系中养分资源利用规律及平衡研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 39-42. TANG S X. Study on soil nutrient resource and nutrient balance of wheat-maize rotation[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012: 39-42.
- [20] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229. LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [21] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018: 105-107. LIU X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018: 105-107.
- [22] 王伟妮, 高娃, 郑硕, 等. 内蒙古典型生态区不同类型向日葵氮肥响应差异[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 140-149. WANG W N, GAO W, ZHENG S, et al. Differences in responses to nitrogen fertilizer of edible sunflower and oil sunflower in typical ecological zones of Inner Mongolia[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 140-149.
- [23] 闫建文, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区盐渍化土壤玉米水氮耦合效应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 103-110. YAN J W, SHI H B, LI X Y, et al. Effect of water and nitrogen coupling on maize in salinity soil of the Hetao Irrigation area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 103-110.
- [24] 常菲, 红梅, 武岩, 等. 灌溉方式和改良措施对河套灌区盐渍土氮挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 38-45. 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[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2): 38-45.
- [25] 刘德平. 基于盐渍化灌区水土环境安全的优化施肥模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014: 49-62. LIU D P. Study on the optimization models of fertilization based on environment security of soil and water in salinization irrigation district[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014: 49-62.
- [26] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368. JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [27] 蔡红光, 米国华, 张秀芝, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 89-97. CAI H G, MI G H, ZHANG X Z, et al. Effect of different fertilizing methods on nitrogen balance in the black soil for continuous maize production in northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 89-97.