

秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响

赵政鑫^{1,2} 王晓云^{1,2} 李府阳^{1,2} 王锐^{1,2} 田雅洁^{1,2} 蔡焕杰^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究秸秆还田配施稳定性氮肥对关中地区麦玉轮作体系作物生长及水氮利用的综合影响,并确定合理的高产高效施肥管理措施,设置两种秸秆还田模式(秸秆不还田、秸秆全量还田)和两种施肥措施(常规尿素和减量施用稳定性氮肥),以无秸秆还田且不施肥作为对照,共5个处理,研究分析作物产量、地上部生物量、土壤氨挥发累积量、土壤含水率、土壤硝态氮残留量及水氮利用效率。结果表明:秸秆还田配施氮肥会分别显著提高夏玉米和冬小麦产量28.03%~39.63%和90.10%~112.52%、地上部生物量27.88%~34.00%和78.96%~107.64%;施用稳定性氮肥较施用常规尿素分别降低夏玉米季和冬小麦季全生育期土壤氨挥发累积量50.18%~59.32%和68.21%~73.43%;秸秆还田会显著提高夏玉米季0~10 cm土壤含水率6.29%~21.38%,显著提高冬小麦季0~10 cm土壤含水率6.80%~25.06%;相同施肥措施下,秸秆还田会显著降低夏玉米与冬小麦收获期0~100 cm土壤NO₃⁻-N残留量7.34%~10.78%和6.57%~11.24%,在相同秸秆还田模式下,施用稳定性氮肥较施用尿素会显著降低夏玉米与冬小麦收获期0~100 cm土壤NO₃⁻-N残留量28.96%~31.63%和4.16%~9.54%;在相同施肥措施下,秸秆还田显著提高夏玉米季和冬小麦季水分利用效率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率4.55%~7.85%、5.79%~12.08%、25.22%~41.43%和7.36%~9.73%、2.25%~14.38%、4.33%~30.35%,在相同秸秆还田模式下,施用稳定性氮肥显著提高夏玉米和冬小麦氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮素吸收效率、氮肥回收效率43.75%~52.29%、42.01%~60.39%、62.07%~66.67%、52.50%~72.73%和21.93%~36.41%、11.37%~39.14%、50.67%~53.85%、60.00%~64.15%。因此,秸秆还田配施减量稳定性氮肥会显著提高麦玉轮作体系水氮利用效率、减少氮素挥发损失及氮素淋失风险,综合考虑认为,秸秆还田配施180 kg/hm²稳定性氮肥和秸秆还田配施150 kg/hm²稳定性氮肥是关中地区夏玉米和冬小麦实现高产高效的合理施肥措施。

关键词: 秸秆还田; 稳定性氮肥; 产量; 氨挥发; 土壤硝态氮; 水氮利用

中图分类号: S146

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)06-0350-11

OSID:



Effects of Straw Returning and Application of Stable Nitrogen Fertilizer on Water and Nitrogen Use Efficiencies of Wheat Maize Rotation

ZHAO Zhengxin^{1,2} WANG Xiaoyun^{1,2} LI Fuyang^{1,2} WANG Rui^{1,2} TIAN Yajie^{1,2} CAI Huanjie^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the comprehensive impact of straw returning with stable nitrogen fertilizer on crop growth and water and nitrogen utilization of wheat maize rotation system in Guanzhong region, and determine reasonable high-yield and efficient fertilization management measures, two straw returning modes (no straw returning, full straw returning) and two nitrogen application measures (conventional urea and reduced application of stable nitrogen fertilizer) were set up in a completely random combination, and straw free returning and no fertilization were set as control, a total of five treatments were set to study and analyze crop yield, aboveground biomass, soil ammonia volatilization accumulation, soil moisture content, soil nitrate nitrogen residue and water and nitrogen utilization efficiency. The results showed that straw returning to the field could significantly increase the yield of summer maize and

收稿日期: 2022-11-14 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879223)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400201)

作者简介: 赵政鑫(1997—),男,博士生,主要从事农业资源高效利用研究,E-mail: 15840121398@nwfufu.edu.cn

通信作者: 蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业资源高效利用研究,E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

winter wheat by 28.03% ~ 39.63% and 90.10% ~ 112.52%, respectively, and increase the aboveground biomass by 27.88% ~ 34.00% and 78.96% ~ 107.64%. The application of stable nitrogen fertilizer reduced the soil ammonia volatilization accumulation by 50.18% ~ 59.32% and 68.21% ~ 73.43% during the whole growth period of summer maize season and winter wheat season respectively compared with the application of conventional urea. Straw returning to the field could significantly increase the soil moisture content of 0 ~ 10 cm soil in summer maize season by 6.29% ~ 21.38%, and that of 0 ~ 10 cm soil in winter wheat season by 6.80% ~ 25.06%. Under the same fertilization measures, straw returning to the field could significantly reduce the NO_3^- -N residues in the 0 ~ 100 cm soil of summer maize and winter wheat at harvest time by 7.34% ~ 10.78% and 6.57% ~ 11.24%. Under the same straw returning mode, the application of stable nitrogen fertilizer could significantly reduce the NO_3^- -N residues in the 0 ~ 100 cm soil of summer maize and winter wheat at harvest time by 28.96% ~ 31.63% and 4.16% ~ 9.54% compared with that of application of urea. Under the same fertilization measures, straw returning significantly improved water use efficiency, nitrogen partial productivity and nitrogen agronomic efficiency in summer maize season and winter wheat season by 4.55% ~ 7.85%, 5.79% ~ 12.08%, 25.22% ~ 41.43% and 7.36% ~ 9.73%, 2.25% ~ 14.38% and 4.33% ~ 30.35%. Under the same straw returning mode, the application of stable nitrogen fertilizer significantly improved the partial productivity of nitrogen fertilizer, agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, nitrogen absorption efficiency, nitrogen recovery efficiency of 43.75% ~ 52.29%, 42.01% ~ 60.39%, 62.07% ~ 66.67%, 52.50% ~ 72.73% and 21.93% ~ 36.41%, 11.37% ~ 39.14%, 50.67% ~ 53.85%, 60.00% ~ 64.15%, respectively, in summer maize season and winter wheat. Therefore, straw returning with stable nitrogen fertilizer would significantly improve water and nitrogen use efficiency of wheat maize rotation system, reduce nitrogen volatilization loss and nitrogen leaching risk. Based on comprehensive consideration, 180 kg/hm² stable nitrogen fertilizer and 150 kg/hm² stable nitrogen fertilizer were reasonable fertilization measures for realizing high yield and efficiency of summer maize and winter wheat in Guanzhong area.

Key words: straw returning; stable nitrogen fertilizer; yield; ammonia volatilization; soil NO_3^- -N; water and nitrogen utilization

0 引言

由于过量施用化肥、肥料利用率低等原因造成环境恶化的问题已成为农业可持续发展的重大隐患^[1]。我国秸秆年产量约为 7 亿多吨^[2],随着农业的发展,秸秆产量出现过剩的情况,不合理的秸秆处理造成资源浪费的同时还会污染环境^[3],推动秸秆资源化综合利用可对农业生产起到提质增效的作用。适量施氮会促进作物生长且提高氮肥利用效率,施氮量超过作物需求时不仅会降低产量,且使得作物更易染病虫害,降低作物抵抗自然灾害的能力,同时由于土壤氮挥发、土壤氮素残留等氮素损失会降低氮肥利用效率和氮收获指数^[4-6]。因此,科学合理地利用秸秆并寻找合理的田间施肥措施,提高资源利用效率,实现农业生产高产高效是可持续性农业发展的重要途径。

秸秆还田是保护性耕作的核心措施之一,不仅能提高土壤固碳能力还对土壤具有保墒调温作用^[7]。有研究表明,由于秸秆分解会产生作物生长所需的氮、磷、钾等营养元素,秸秆还田会提高作物产量 4.02% ~ 10.57%, 提高水分利用效率 2.87% ~ 12.25%^[8],另外,由于秸秆含有丰富的纤

维素,腐解后会改善土壤结构,提高养分循环利用,增加土壤养分,丰富土壤微生物群落种类^[9]。LI 等^[10]研究表明较常规尿素减量 20% 施用稳定性氮肥不会显著影响玉米产量且可显著提高氮肥利用率,XU 等^[11]研究表明秸秆还田配施氮肥会促进小麦对养分的吸收进而提高氮肥偏生产力。稳定性氮肥是一种新型缓控释肥料,通过在尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂减少氮素损失提高氮素利用率^[12]。QIAO 等^[13]研究表明,肥料中添加硝化抑制剂可减少 N_2O 排放和氮素淋溶,可显著增加产量并提高经济效益。彭玉净等^[14]研究表明,添加脲酶抑制剂会降低土壤氮挥发量 53%。王宜伦等^[15]研究表明,夏玉米一次基施缓控释肥料可以满足作物生长后期对氮素的需求,是实现简化栽培的重要技术措施。

近年来对于秸秆还田配施氮肥的研究主要集中在秸秆还田配施尿素,关于秸秆还田配施稳定性氮肥对作物生长和水氮利用的研究较少,且秸秆还田对作物生长及水氮利用的影响与当地气候条件、耕作制度、土壤质地等因素有关,对于秸秆还田配施稳定性氮肥在关中地区麦玉轮作制度下应用的研究较为缺乏。本文以关中地区冬小麦-夏玉米为研究对

象,以不施肥无秸秆还田为对照,探究秸秆还田配施减量稳定性氮肥对麦玉轮作体系产量、地上部生物量、土壤氮挥发、土壤硝态氮残留及水氮利用效率的影响,以明确秸秆还田与减量施用稳定性氮肥对冬小麦-夏玉米生长及水氮利用的综合影响,为关中地区麦玉轮作种植体系提供合理的施肥措施,并为关中地区农业生产提质增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2020年6月—2021年6月在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室节水灌溉试验站(34°17' N, 108°04' E, 海拔521 m)进行。该区属典型的暖温带半湿润季风气候,年均无霜期210 d,日照时数2 164 h,年平均气温12.9℃,多年平均降水量550 mm。供试土壤类型为壤土,pH值7.8,0~20 cm耕层有机质含量(质量比)14.48 g/kg,容重1.40 g/cm³,有效磷含量13.67 mg/kg,有效钾含量183.20 mg/kg。试验期间气象资料如图1所示。

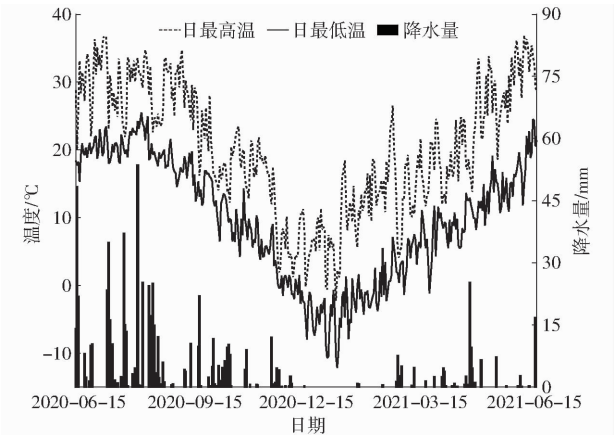


图1 试验期间试验区日最高温、最低温与降水量分布
Fig.1 Daily maximum and minimum temperature and precipitation distribution in test area during test period

1.2 田间试验设计

试验采用完全随机组合设计,试验因素为施氮和秸秆还田模式。施氮包括施用常规尿素F1(冬小麦施氮量为200 kg/hm²,夏玉米施氮量为270 kg/hm²)、减量施用稳定性氮肥F2(冬小麦施氮量为150 kg/hm²,夏玉米施氮量为180 kg/hm²),其中稳定性氮肥中硝化抑制剂效率为0.06,脲酶抑制剂效率为0.25;秸秆还田模式设置两个水平,包括秸秆不还田(N)和秸秆全量还田(S),设置秸秆不还田且不施氮处理作为对照。其中,F1尿素施氮量参考当地农民常规施氮量,F2稳定性氮肥施氮量参考前人研究中推荐施氮量^[16]。稳定性氮肥在种前

一次性施入,尿素在种前以基肥形式施入总施氮量的60%,施肥方式为均匀撒播后进行人工翻耕,以追肥形式在小麦拔节期、玉米拔节期施入余下40%。如表1所示,试验共5个处理,重复3次,共15小区,小区面积为12 m²。秸秆还田方式为秸秆粉碎覆盖还田,夏玉米季还田秸秆为小麦秸秆,冬小麦季还田秸秆为玉米秸秆。夏玉米品种为郑单958,种植密度为6×10⁴株/hm²,播种时间为2020年6月19日,追肥时间为2020年7月26日,收获时间为2020年9月30日;冬小麦品种为小偃22,播种密度为165 kg/hm²,越冬前以漫灌的方式灌水30 mm,保证冬小麦顺利过冬,播种时间为2020年10月19日,追肥时间为2021年3月14日,收获时间为2021年6月3日。全生育期病虫害防治与田间除草管理与当地农户相同。

表1 试验设计
Tab.1 Experimental design

试验处理	秸秆还田量	施氮种类及施氮量/(kg·hm ⁻²)
NF1	0	常规尿素(玉米270,小麦200)
NF2	0	稳定性氮肥(玉米180,小麦150)
SF1	全量还田	常规尿素(玉米270,小麦200)
SF2	全量还田	稳定性氮肥(玉米180,小麦150)
NF0	0	不施氮

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量

夏玉米成熟期时,在各处理小区随机选取10株玉米穗,自然风干后脱粒称量,同时测定其含水率,并折算每公顷产量(含水率14%)。冬小麦成熟时,在各处理小区选取1 m²长势均匀的小麦,自然风干后脱粒称量,同时测定其含水率,并折算每公顷产量(含水率14%)。

1.3.2 地上部生物量

玉米生长成熟期在各处理试验小区内随机选取3株玉米,贴地面采集玉米地上部分,将样品茎、叶、果分部分装袋,置于干燥箱内105℃杀青30 min,之后75℃干燥至质量恒定,称取干质量,并折算每公顷生物量。在小麦生长成熟期在各处理试验小区内选取0.06 m²长势均匀的小麦,将样品茎、叶、果分部分装袋,置于干燥箱内105℃杀青30 min,之后75℃干燥至质量恒定,称取干质量,并折算每公顷生物量。

1.3.3 土壤NH₃挥发量

土壤NH₃挥发量采用通气法进行测定^[17],测定频率为施肥后第1周每天取样1次,之后视测量结果每3 d取样1次,后期可延长到7 d取样1次直至挥发量很低停止取样。取样结束后将收集的海绵立

即装入装有 300 mL 浓度为 1 mol/L 氯化钾溶液的塑料瓶内进行振荡提取,用 AA3 型流动分析仪(Seal,德国)测定浸提液中的铵态氮含量。

氨挥发累积量计算公式为

$$CAE = \sum_{i=1}^n \frac{0.01M_i}{0.99A} \quad (1)$$

式中 CAE——氨挥发累积量,kg/hm²

M_i——单个装置第 i 次收集的氨量,mg

A——收集装置的横截面积,取 0.017 7 m²

n——收集次数

其中 0.01 为转换系数,0.99 为捕获装置的回收率。

1.3.4 土壤含水率

在夏玉米和冬小麦各生育期测定土壤含水率,若出现降雨,适当提前或延后。使用土钻取 0~100 cm 土层土样,每 10 cm 装入一个铝盒称量湿质量,放入干燥箱 105℃ 干燥至质量恒定称量干质量,每个小区取 3 个重复,计算土壤含水率。

1.3.5 土壤硝态氮含量

在夏玉米及冬小麦收获后,用土钻采集 0~100 cm 土层土样,每 10 cm 为一层,将土样晾干研磨,用 2 mol/L 氯化钾溶液进行振荡浸提,然后用 AA3 型流动分析仪测定浸提液 NO₃⁻-N 质量浓度(mg/L),并计算出土壤 NO₃⁻-N 含量。

1.3.6 植株全氮含量

将干燥后的植物样品粉碎,过 0.5 mm 筛,用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,用 AA3 型流动分析仪测定植株各部分氮素含量。

1.4 数据计算与分析

1.4.1 水分利用效率计算

采用水量平衡公式^[18]计算冬小麦、夏玉米全生育期蒸发蒸腾量(ET),计算公式为

$$ET = \Delta W + P_0 + I + K - D \quad (2)$$

式中 ET——作物蒸发蒸腾量,mm

ΔW——土壤含水量变化量,mm

P₀——有效降水量,mm

I——灌水量,mm

K——地下水补给量,mm

D——深层渗漏量,mm

本研究中地下水较深,故 K=0;1 m 以下土层水分含量基本保持稳定,故 D 可视为 0;在夏玉米生长季未灌水,故 I=0;在冬小麦生长季灌水 30 mm,故 I=30 mm。因此式(2)可简化为

$$ET = \Delta W + P_0 + I \quad (3)$$

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)计算式为

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中 Y——产量,kg/hm²

1.4.2 氮素利用效率相关指标计算

氮肥偏生产力(NPFP,kg/kg)、氮素吸收效率(NUPE,kg/kg)、氮肥农学利用率(AEN,kg/kg)、氮肥回收效率(NER,kg/kg)、氮收获指数(NHI,%)计算公式参考文献[19-20]。

1.4.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据整理和误差计算;使用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较,多重比较采用最小显著性差异法(LSD);使用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与施氮对麦玉轮作产量和成熟期地上部生物量的影响

图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同)为不同处理夏玉米和冬小麦产量。在相同施肥措施下,产量均表现为有秸秆还田处理高于无秸秆还田处理,夏玉米产量增幅为 5.80%~9.06%,冬小麦产量增幅为 2.24%~14.37%。在夏玉米季,SF1 处理产量最高,为 9 579.75 kg/hm²,较其它有施肥的处理高 1.54%~9.06%,但与其与 SF2 和 NF2 处理产量无显著性差异(P>0.05);在冬小麦季,SF2 处理产量最高,为 6 704.93 kg/hm²,较其它有施肥的处理高 2.30%~14.37%,但与其与 SF1 和 NF1 处理产量无显著性差异(P>0.05)。图 3 为不同处理夏玉米和冬小麦的地上部生物量累积量。在相同施肥措施下,地上部生物量均表现为有秸秆还田处理高于无秸秆还田处理,夏玉米地上部生物量增幅为 4.21%~4.62%,冬小麦地上部生物量增幅为 2.76%~16.02%。如图 3a 所示,在夏玉米季,SF2 处理地上部生物量最高,为 15 503.00 kg/hm²,较其它有施肥的处理高 0.15%~4.79%,茎和叶的生物量均表现为有施肥措施的各处理显著高于 NF0 处理(P<0.05);如图 3b 所示,在冬小麦季,SF2 处理的地上部生物量最高,为 14 652.80 kg/hm²,较其它有施肥的处理高 5.77%~16.02%,叶生物量表现为有施肥措施的各处理显著高于 NF0 处理(P<0.05),且有施肥措施的各处理之间无显著性差异。以上结果表明,秸秆还田会提高作物产量和地上部生物量,在适当条件下,减量施用稳定性氮肥不会降低作物产量和地上部生物量。

2.2 秸秆还田与施氮对麦玉轮作土壤氮挥发的影响

图 4 为夏玉米与冬小麦全生育期土壤氮挥发累积量。由图 4a 可知,夏玉米施入基肥后各处理的土

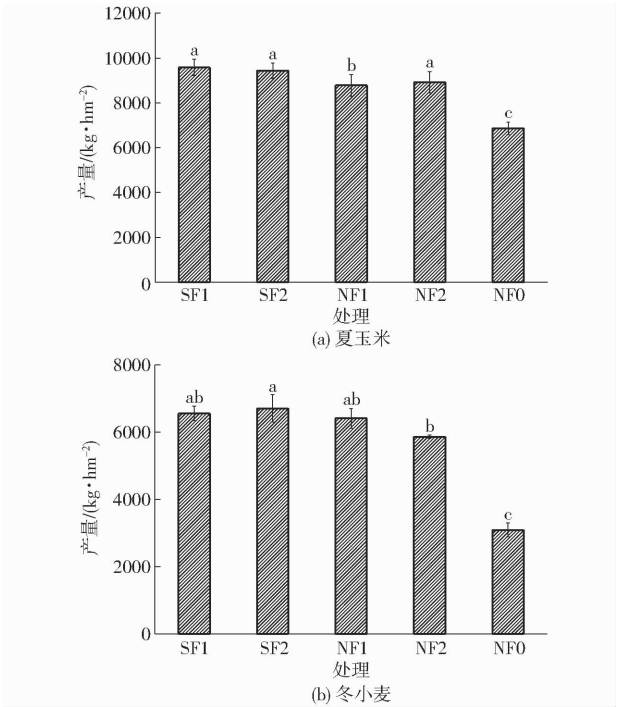


图2 不同处理夏玉米和冬小麦产量
Fig.2 Yields of maize and winter wheat with different treatments

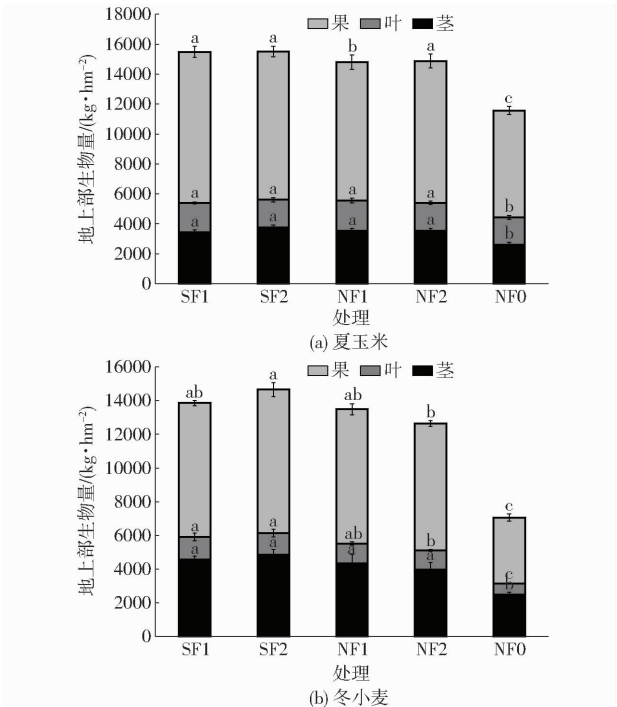


图3 不同处理夏玉米和冬小麦地上部生物量
Fig.3 Aboveground biomass of different treatments of summer maize and winter wheat

壤氮挥发累积量动态变化呈现相同趋势,即第1周上升较快,之后逐渐趋于稳定,且施用尿素的各处理在拔节期追肥后的土壤氮挥发累积量也呈现相同的变化趋势。由于施用尿素的处理有追肥措施,因此在追肥后 SF1 和 NF1 处理的土壤氮挥发累积量快速上升。在夏玉米季,施用相同氮肥种类的各处理

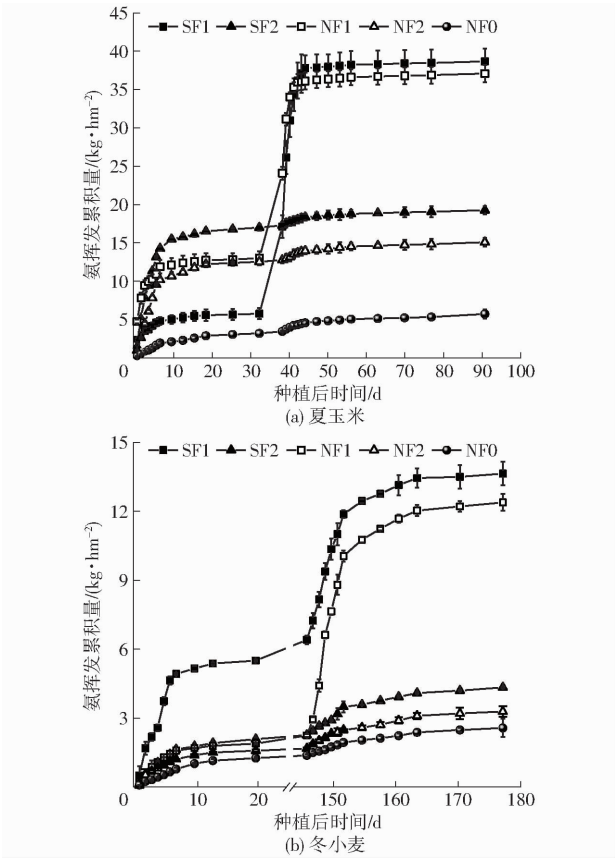


图4 夏玉米与冬小麦全生育期土壤氮挥发累积量
Fig.4 Cumulative ammonia emission from soil during whole growth period of summer maize and winter wheat

中均表现出有秸秆还田处理的土壤氮挥发累积量高于无秸秆还田的各处理。在相同的秸秆还田模式下,全生育期施用稳定性氮肥的 SF2 和 NF2 处理的土壤氮挥发累积量较施用尿素的 SF1 和 NF1 处理低 50.18% 和 59.32%。冬小麦全生育期土壤氮挥发累积量动态变化趋势与夏玉米基本一致,秸秆还田条件下的 SF1 和 SF2 处理土壤氮挥发累积量分别高于秸秆不还田条件下的 NF1 和 NF2 处理 9.19% 和 24.1%,全生育期施用稳定性氮肥的 SF2 和 NF2 处理的土壤氮挥发累积量较施用尿素的 SF1 和 NF1 处理低 68.21% 和 73.43%。

2.3 秸秆还田与施氮对土壤含水率的影响

图 5(图中 * 表示差异显著 ($P < 0.05$),下同)为夏玉米各处理不同生育期 0 ~ 100 cm 土壤含水率。秸秆还田会显著提高夏玉米苗期 0 ~ 20 cm 土壤含水率及拔节期、吐丝期、灌浆期、成熟期 0 ~ 10 cm 土壤含水率,对于其它土层土壤含水率无显著影响。在苗期,相同施肥措施下,秸秆还田会显著提高 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤含水率 21.38% ~ 21.76% 和 5.71% ~ 7.58%;在拔节期,秸秆还田会显著提高 0 ~ 10 cm 土壤含水率 13.42% ~ 14.03%,在吐丝期、灌浆期和成熟期相

应提高 10.24% ~ 15.63%、20.99% ~ 21.74% 和 6.29% ~ 6.96%。如图 6 所示,秸秆还田会显著提高冬小麦苗期 0 ~ 30 cm 土壤含水率、越冬期和拔节期 0 ~ 20 cm 土壤含水率及成熟期 0 ~ 10 cm 土壤含水率,对于其它土层土壤含水率无显著性影响。在苗期,与无秸秆还田相比,秸秆还田条件下,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土壤含水率分别提高 14.61% ~ 15.35%、10.31% ~ 12.91% 和 8.50% ~ 9.69%;在越冬期,秸秆还田条件下,

0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤含水率较无秸秆还田分别提高 17.11% ~ 25.06% 和 5.95% ~ 9.36%,在拔节期,相应提高 12.13% ~ 13.61% 和 7.23% ~ 8.00%;在成熟期,秸秆还田显著提高 0 ~ 10 cm 土壤含水率 6.80% ~ 9.60%。秸秆还田显著提高冬小麦和夏玉米浅层土壤含水率,由于秸秆逐渐分解,秸秆还田对土壤含水率的提升程度在夏玉米和冬小麦季均呈现随生育期进程逐渐减弱的趋势。

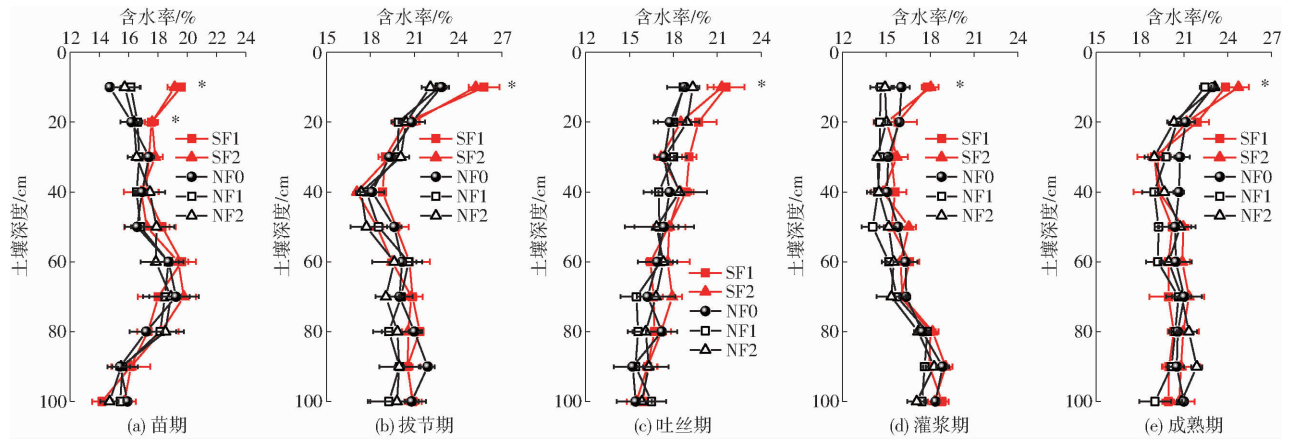


图 5 夏玉米各处理不同生育期 0 ~ 100 cm 土壤含水率
Fig. 5 0 ~ 100 cm soil water content of different summer maize treatments at different growth stages

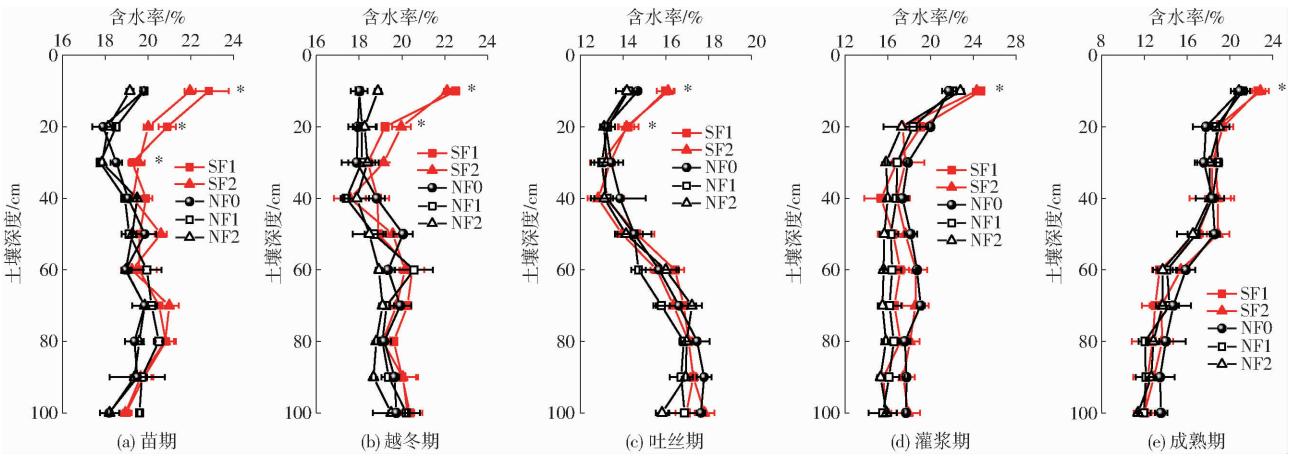


图 6 冬小麦各处理不同生育期 0 ~ 100 cm 土壤含水率
Fig. 6 0 ~ 100 cm soil water content of different winter wheat treatments at different growth stages

2.4 秸秆还田与施氮对收获期土壤 NO₃⁻-N 残留的影响

图 7 为夏玉米与冬小麦收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量。秸秆还田与施氮均会显著影响收获期土壤 NO₃⁻-N 残留量。在夏玉米季和冬小麦季,收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量各处理之间由大到小依次为 NF1、SF1、NF2、SF2、NF0。在相同施肥措施下,秸秆还田会显著降低夏玉米与冬小麦收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量 7.34% ~ 10.78% 和 6.57% ~ 11.24%;在相同秸秆还田模式下,施用稳定性氮肥较施用尿素会

显著降低夏玉米与冬小麦收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量 28.96% ~ 31.63% 和 4.16% ~ 9.54%。另外,在夏玉米与冬小麦季,各有施肥措施的处理中 0 ~ 40 cm 土层 NO₃⁻-N 残留量占 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量比例最大的均为 SF2 处理,分别为 58.33% 和 89.78%,较其它各处理分别高 2.13% ~ 12.66% 和 6.08% ~ 21.90%,占比最小的分别为 SF1 处理和 NF1 处理,分别为 45.67% 和 67.88%。说明施用稳定性氮肥较施用尿素可以减少深层土壤氮素残留,降低氮素淋失的风险进而提高氮肥利用效率。

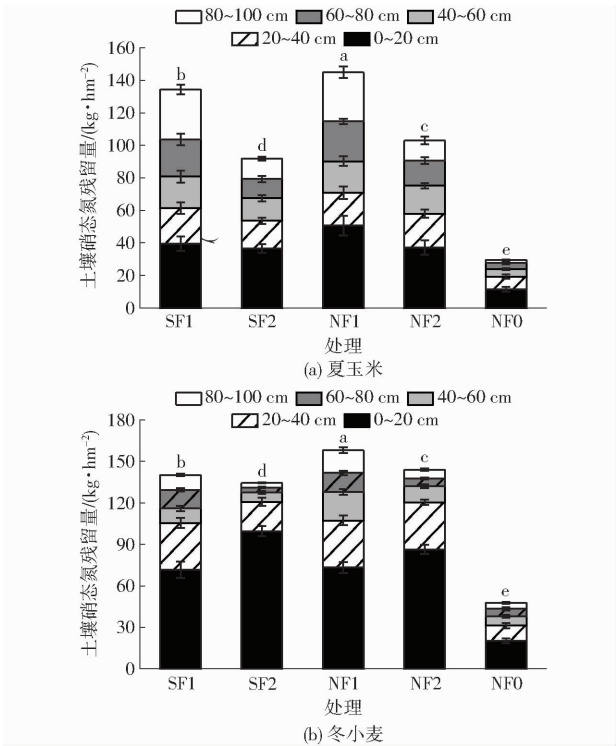


图7 夏玉米与冬小麦收获期0~100 cm土壤硝态氮残留量
Fig.7 Residual amount of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in soil from 0 ~ 100 cm at harvest time of summer maize and winter wheat

表2 秸秆还田与施氮对麦玉轮作水氮利用的影响

Tab.2 Effects of straw returning and nitrogen application on water and nitrogen utilization in wheat and maize rotation							
作物	处理	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	氮肥偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮素吸收效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥农学利用率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥回收效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮收获 指数/%
夏玉米	SF1	2.06 ^a	36.46 ^b	0.51 ^b	10.07 ^b	0.33 ^b	0.64 ^a
	SF2	2.07 ^a	52.41 ^a	0.85 ^a	14.30 ^a	0.57 ^a	0.61 ^a
	NF1	1.91 ^c	32.53 ^c	0.58 ^b	7.12 ^c	0.40 ^b	0.62 ^a
	NF2	1.98 ^b	49.54 ^a	0.94 ^a	11.42 ^{ab}	0.61 ^a	0.67 ^a
	NF0	1.58 ^d					0.61 ^a
	秸秆还田模式(M)	15.12 ^{**}	12.63 ^{**}	4.76	12.68 ^{**}	2.28	0.31
	施氮(N)	74.37 ^{**}	488.42 ^{**}	86.04 ^{**}	43.06 ^{**}	39.89 ^{**}	0.14
	M × N	0.99	5.43 [*]	0.08	5.42 [*]	0.23	1.50
冬小麦	SF1	2.48 ^a	32.77 ^c	0.78 ^b	17.35 ^b	0.53 ^b	0.67 ^b
	SF2	2.48 ^a	44.70 ^a	1.20 ^a	24.14 ^a	0.87 ^a	0.72 ^{ab}
	NF1	2.31 ^b	32.05 ^c	0.75 ^b	16.63 ^b	0.50 ^b	0.70 ^{ab}
	NF2	2.26 ^b	39.08 ^b	1.13 ^a	18.52 ^b	0.80 ^a	0.77 ^a
	NF0	1.39 ^c					0.76 ^{ab}
	秸秆还田模式(M)	13.25 ^{**}	6.23 ^{**}	0.07	6.40 ^{**}	0.65	1.76
	施氮(N)	88.87 ^{**}	56.31 ^{**}	28.92 ^{**}	12.03 ^{**}	25.45 ^{**}	2.17
	M × N	0.18	3.71 [*]	0.02	3.83 [*]	0.078	0.10

注:同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。 ** 和 * 表示 0.01 和 0.05 水平影响显著。

4.33% ~ 30.35% ;在相同秸秆还田条件下,减量施用稳定性氮肥处理的 NPFP 和 AEN 较施用常规尿素的处理在两季分别提高 43.75% ~ 52.29%、42.01% ~ 60.39% 和 21.93% ~ 36.41%、11.37% ~ 39.14%。减量施用稳定性氮肥在夏玉米和冬小麦季均表现会显著提升氮素吸收效率(NUPE) 和氮肥

2.5 秸秆还田与施氮对麦玉轮作水氮利用效率的影响

秸秆还田与施氮对麦玉轮作水氮利用效率的影响如表 2 所示。秸秆还田与施氮及二者交互对麦玉轮作体系水氮利用效率有显著性影响。在相同施肥条件下,有秸秆还田处理的水分利用效率较无秸秆还田的处理在夏玉米季和冬小麦季分别高 4.55% ~ 7.85% 和 7.36% ~ 9.73%。较 NF0 处理,施氮会提高夏玉米季水分利用效率 20.89% ~ 31.01%、提高冬小麦季水分利用效率 62.59% ~ 78.42%。夏玉米季和冬小麦季水分利用效率的方差分析结果类似,即秸秆还田和施氮均会显著提高水分利用效率,但在两季中,秸秆还田配施常规尿素(SF1 处理)与秸秆还田配施减量稳定性氮肥(SF2 处理)的水分利用效率均无显著性差异。

方差分析表明,秸秆还田、施氮及二者交互对夏玉米和冬小麦季的氮肥偏生产力(NPFP) 和氮肥农学利用率(AEN) 均有显著性影响。在相同施肥条件下,有秸秆还田处理的 NPFP 和 AEN 较无秸秆还田的处理在夏玉米和冬小麦季分别提高 5.79% ~ 12.08%、25.22% ~ 41.43% 和 2.25% ~ 14.38%、

回收效率(NER)。在夏玉米季,减量施用稳定性氮肥较施用常规尿素会提高 NUPE 62.07% ~ 66.67%,提高 NER 52.50% ~ 72.73% ;在冬小麦季,减量施用稳定性氮肥较施用常规尿素会提高 NUPE 50.67% ~ 53.85%,提高 NER 60.00% ~ 64.15%。各处理的氮收获指数在两季中均无显著

性差异。以上结果表明, 秸秆还田会显著提高氮肥偏生产力及氮肥农学利用率, 施用稳定性氮肥通过提高氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮肥农学利用率和氮肥回收效率实现氮肥高效利用。

3 讨论

3.1 秸秆还田与施氮对作物产量及地上部生物量的影响

秸秆还田与施氮对作物产量及成熟期地上部生物量具有显著影响。有研究表明, 在一定范围内, 作物产量与施氮量呈正相关关系, 但施氮量超过作物生长所需的量时, 施氮会抑制作物生长^[21]。秸秆还田可以改善土壤耕层结构, 提高土壤肥力及酶活性^[22], 进而提高作物产量及干物质质量。吕宏菲等^[23]研究表明, 秸秆还田配施氮肥可显著提高玉米产量及地上部生物量, 胡迎春等^[24]研究表明, 施用缓释氮肥可以提高作物干物质累积。本研究结果表明, 与不施肥且无秸秆还田处理相比, 秸秆还田配施氮肥可显著提高夏玉米和冬小麦产量 28.03% ~ 39.63% 和 90.10% ~ 112.52%, 提高夏玉米和冬小麦成熟期地上部生物量 27.88% ~ 34.00% 和 78.96% ~ 107.64%。秸秆还田配施减量稳定性氮肥 (SF2 处理) 与秸秆还田配施常规尿素 (SF1 处理) 的夏玉米及冬小麦产量和地上部生物量均无显著性差异, 这与赵欢等^[25]研究结果一致, 说明秸秆还田配施减量稳定性氮肥不会降低作物产量和生物量。

3.2 秸秆还田与施氮对土壤氮挥发及土壤硝态氮残留的影响

土壤氮挥发是氮肥损失的重要途径, 氮肥施入田间后水解成 NH_4^+ 进而转化成氨气^[26], 土壤氮挥发量受多种因素影响, 如气象因素 (温度、降水、风速等)、土壤因素 (土壤类型、土壤理化性质等)、施肥因素 (肥料种类、施肥量等)。尿素施入土壤后在脲酶的作用下迅速分解生成 NH_4^+-N , 增加了氨排放底物^[27], 因而会造成大量的氮素损失, 而稳定性氮肥或缓释氮肥由于加入脲酶抑制剂或进行包膜处理会减缓肥料分解过程, 进而减少土壤氮挥发^[28], 提高肥料的利用效率。本研究结果与之相同, 施用稳定氮肥各处理的夏玉米季和冬小麦季全生育期土壤氮挥发累积量较施用常规尿素分别低 50.18% ~ 59.32% 和 68.21% ~ 73.43%。有研究表明, 秸秆还田后分解使土壤有机质增加, 提高土壤对 NH_4^+ 吸附, 减少土壤液相里的 NH_4^+ 浓度, 进而减少土壤氮挥发^[29], 但本研究结果表现为在夏玉米季和冬小麦季秸秆还田均会略提高土壤氮挥发累积量, 这一方

面可能与本研究中秸秆还田方式有关, 有研究表明, 秸秆以覆盖的方式还田会促进土壤氮挥发, 以旋耕或翻耕的方式还田会显著抑制土壤氮挥发^[30]; 另一方面可能与本研究中施肥量有关, 施肥量充足时秸秆会充分分解, 导致土壤 pH 值升高, 使土壤中 NH_4^+ 转化成 NH_3 ^[31], 进而促进土壤氮排放。

氮肥施入土壤后分解生成 NH_4^+-N , NH_4^+-N 经过进一步反应生成 NO_3^--N , 被作物直接吸收利用。不合理的施氮会抑制作物生长且造成氮素大量残留在土壤中, 经过淋溶等方式造成地下水或环境污染^[32]。稳定性氮肥与尿素等速效氮肥相比, 具有释放养分较慢的特点, 既可以充分满足作物生长后期对氮素的需求, 又可减少土壤 NO_3^--N 向深层土壤运移或淋溶的风险^[33]。有研究表明, 秸秆还田会降低土壤 NO_3^--N 残留量和淋失量^[34], 这可能是由于秸秆有较高的碳氮比, 施入土壤后在微生物的作用下会分解秸秆, 而分解的过程会消耗土壤施入的氮肥, 进而减少土壤无机氮的固定, 而有机氮和微生物中的氮含量会增加^[35]。本研究结果与之类似, 秸秆还田会显著降低夏玉米与冬小麦收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO_3^--N 残留量, 且在相同秸秆还田模式下, 施用稳定性氮肥较施用尿素会显著降低夏玉米与冬小麦收获期 0 ~ 100 cm 土壤 NO_3^--N 残留量 28.96% ~ 31.63% 和 4.16% ~ 9.54%, 同时施用稳定性氮肥会增大 0 ~ 40 cm 土层 NO_3^--N 占比, 降低氮素淋失的风险进而提高氮肥利用效率。

3.3 秸秆还田与施氮对水氮利用效率的影响

秸秆还田对田间土壤起到保墒的作用, 会促进作物根系生长, 以覆盖和翻耕的方式还田可分别提高水分利用效率 12.25% 和 11.78%^[36]。秸秆腐解后, 秸秆中的纤维素等物质会转换成腐殖质, 改善土壤结构, 增加土壤养分, 丰富土壤中微生物群落种类, 促进作物生长, 提高养分循环利用效率^[37]。有研究表明, 由于秸秆分解释放氮素, 提高了土壤供氮能力, 进而秸秆还田会显著提高植株氮素积累和氮肥偏生产力^[38]。在一定的施氮量范围内, 作物产量与施氮量呈线性增长的趋势, 因此提高水分利用效率。氮肥经缓释化处理后会显著提高作物氮素利用效率, 有研究表明, 施用缓控释氮肥较施用尿素会提高玉米氮肥利用效率 2.26% ~ 12.69%^[39], 施用等量的缓释氮肥较施用尿素显著提高玉米氮素积累量^[40], 这是由于处理后的氮肥释放在过程可适应作物对养分的需求, 减少氮挥发、氮素淋溶等损失, 进而提高氮肥利用效率。本研究结果同样体现出秸秆还田会显著提高氮肥偏生产力和氮肥农学利用率, 施用稳定性氮

肥通过提高氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮肥农学利用率和氮肥回收效率促进氮肥利用,且秸秆还田与施用稳定性氮肥的交互作用会显著提高氮肥偏生产力和氮肥农学利用率。

4 结 论

- (1) 秸秆还田会显著提高麦玉轮作体系浅层土壤含水率、水分利用效率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率。
- (2) 减量施用稳定性氮肥会显著降低麦玉轮作

体系全生育期土壤氮挥发累积量、减少 0 ~ 100 cm 土壤 NO₃⁻-N 残留量并降低氮素淋失风险,显著提高氮肥偏生产力、氮素吸收效率、氮肥农学利用率和氮肥回收效率,且不会显著影响冬小麦和夏玉米的产量和地上部生物量。

- (3) 综合考虑认为,秸秆还田配施 180 kg/hm² 稳定性氮肥和秸秆还田配施 150 kg/hm² 稳定性氮肥是关中地区夏玉米和冬小麦实现高产高效的合理施肥措施,适合在干旱及半干旱地区冬小麦-夏玉米轮作模式下推广使用。

参 考 文 献

[1] 史常亮,郭焱,朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671 – 679. SHI Changliang, GUO Yan, ZHU Junfeng. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671 – 679. (in Chinese)

[2] 张志娟,周腰华. 基于文献计量的我国玉米秸秆综合利用研究进展与态势分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 135 – 142. ZHANG Zhijuan, ZHOU Yaohua. Research progress and situation analysis of comprehensive utilization of corn straw in China based on literature measurement[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(3): 135 – 142. (in Chinese)

[3] 张晓庆,王梓凡,参木友,等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9): 30 – 41. ZHANG Xiaoqing, WANG Zifan, CAN Muyou, et al. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(9): 30 – 41. (in Chinese)

[4] 吴萍萍,李录久,耿言安,等. 不同新型肥料对江淮地区水稻生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (3): 149 – 153. WU Pingping, LI Lujia, GENG Yan'an, et al. Effect of new-type fertilizers on rice growth, nitrogen uptake and utilization in Jianghuai region[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(3): 149 – 153. (in Chinese)

[5] 杨志奇,俄胜哲,温宏昌,等. 氮肥施用量对玉米生长发育及产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2019(10): 37 – 41. YANG Zhiqi, E Shengzhe, WEN Hongchang, et al. Effect of different nitrogen fertilizer application rates on growth and yield of corn[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2019(10): 37 – 41. (in Chinese)

[6] TAN Y, XU C, LIU D, et al. Effects of optimized N fertilization on greenhouse gas emission and crop production in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 135 – 146.

[7] ZHANG H L, LAL R, ZHAO X, et al. Chapter one-opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. Advances in Agronomy, 2014, 124: 1 – 36.

[8] 隋鹏祥,张文可,梅楠,等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255 – 261. SUI Pengxiang, ZHANG Wenke, MEI Nan, et al. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 255 – 261. (in Chinese)

[9] 宋佳丽,王鸿雁,张淑香,等. 施肥和秸秆还田对黑土农田土壤剖面养分分布的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 41(1): 108 – 115. SONG Jiali, WANG Hongyan, ZHANG Shuxiang, et al. Effect of fertilization and straw return on nutrient distribution along soil profile in black soil croplands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 41(1): 108 – 115. (in Chinese)

[10] LI Q Q, YANG A L, WANG Z H, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in North and Northwest China[J]. Field Crops Research, 2015, 175: 96 – 105.

[11] XU X, PANG D, CHEN J, et al. Straw return accompany with low nitrogen moderately promoted deep root[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 71 – 80.

[12] LI P F, LU J W, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78 – 87.

[13] QIAO C L, LIU L L, HU S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1249 – 1257.

[14] 彭玉净,田玉华,尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氮挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 19 – 23. PENG Yujing, TIAN Yuhua, YIN Bin. Effect of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 19 – 23. (in Chinese)

[15] 王宜伦,苗玉红,韩燕来,等. 缓/控释氮肥对玉米氮代谢、氮素积累量及产量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 147 – 150. WANG Yilun, MIAO Yuhong, HAN Yanlai, et al. Slow/controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and nitrogen accumulation of summer maize and the impact of production[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 147 – 150. (in Chinese)

[16] HU X K, SU F, JU X T, et al. Greenhouse gas emissions from a wheat-maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 198 – 207.

[17] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 205 – 209.
WANG Chaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205 – 209. (in Chinese)

[18] RATHORE V S, NATHAWAT N S, BHARDWAJ S, et al. Yield, water and nitrogen use efficiencies of sprinkler irrigated wheat grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 232 – 245.

[19] 高仁才, 陈松鹤, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与减氮优化根系分布提高冬小麦产量及水氮利用效率[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(14): 2709 – 2725.
GAO Rencai, CHEN Songhe, MA Hongliang, et al. Straw mulching from autumn fallow and reducing nitrogen application improved grain yield, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat by optimizing root distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(14): 2709 – 2725. (in Chinese)

[20] 汝晨, 胡笑涛, 吕梦薇, 等. 花后高温干旱胁迫下氮素对冬小麦氮积累与代谢酶、蛋白质含量及水氮利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(17): 3303 – 3320.
RU Chen, HU Xiaotao, LÜ Mengwei, et al. Effects of nitrogen on nitrogen accumulation and distribution, nitrogen metabolizing enzymes, protein content, and water and nitrogen use efficiency in winter wheat under heat and drought stress after anthesis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(17): 3303 – 3320. (in Chinese)

[21] FARHADI S, NIKOO M R, RAKHSHANDEHROO G R, et al. An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: a case study[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 348 – 358.

[22] 张海晶, 王少杰, 罗莎莎, 等. 不同秸秆还田方式对土壤微生物影响的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(2): 150 – 158.
ZHANG Haijing, WANG Shaojie, LUO Shasha, et al. Research advances in the impact of different straw returning ways on soil microorganisms[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(2): 150 – 158. (in Chinese)

[23] 吕宏菲, 马星霞, 杨改河, 等. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(4): 513 – 522.
LÜ Hongfei, MA Xingxia, YANG Gaihe, et al. Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat-maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(4): 513 – 522. (in Chinese)

[24] 胡迎春, 韩云良, 施成晓, 等. 氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(7): 1068 – 1078.
HU Yingchun, HAN Yunliang, SHI Chengxiao, et al. Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in Loess Plateau[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(7): 1068 – 1078. (in Chinese)

[25] 赵欢, 张萌, 秦松, 等. 缓释肥减量施用对覆膜栽培玉米生物性状、干物质积累与养分分配的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 139 – 146.
ZHAO Huan, ZHANG Meng, QIN Song, et al. Effect of controlled release fertilizer reduction in plastic mulching on biological characteristics, dry matter accumulation and distribution of nutrient content of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 139 – 146. (in Chinese)

[26] 朱影, 庄国强, 吴尚华, 等. 农田土壤氨挥发的过程和控制技术研究[J]. *环境保护科学*, 2020, 46(6): 88 – 96.
ZHU Ying, ZHUANG Guoqiang, WU Shanghua, et al. Ammonia volatilization process and control technology of farmland soil[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(6): 88 – 96. (in Chinese)

[27] GU L M, LIU T N, WANG J F, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of Northern Chinese wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 473 – 474.

[28] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(1): 149 – 162.
LU Lili, WU Genyi. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1): 149 – 162. (in Chinese)

[29] MENG X P, GUO Z Y, YANG X N, et al. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 105006.

[30] 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 等. 基于 Meta 分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1678 – 1687.
ZHAO Zhengxin, WANG Xiaoyun, TIAN Yajie, et al. Effects of straw returning on soil ammonia volatilization under different production conditions based on Meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1678 – 1687. (in Chinese)

[31] FAN X H, LI Y C, ALVA A K. Effects of temperature and soil type on ammonia volatilization from slow-release nitrogen fertilizers[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(10): 1111 – 1122.

[32] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3930 – 3943.
GUO Jinjin, ZHANG Fucang, WANG Haidong, et al. Effect of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3930 –

3943. (in Chinese)

[33] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 221 – 227.
ZHENG Lifang, WU Sanding, DANG Tinghui. Effect of different fertilization modes on spring maize yield, water use efficiency and nitrate nitrogen residue[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 221 – 227. (in Chinese)

[34] 杨世琦, 王永生, 韩瑞芸, 等. 宁夏引黄灌区秸秆还田对麦田土壤硝态氮淋失的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5537 – 5544.
YANG Shiqi, WANG Yongsheng, HAN Ruiyun, et al. Effect of nitrate leaching of winter wheat field based on straw application in the Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinca, 2015, 35(16): 5537 – 5544. (in Chinese)

[35] QIU S, JU X, LI L, et al. Nitrate transformation and N₂O emission in a typical intensively managed calcareous fluvaquent soil: a 15-nitrogen tracer incubation study[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(14): 1763 – 1777.

[36] 隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 等. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255 – 261.
SUI Pengxiang, ZHANG Wenke, MEI Nan, et al. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 255 – 261. (in Chinese)

[37] 宋佳丽, 王鸿雁, 张淑香, 等. 施肥和秸秆还田对黑土农田土壤剖面养分分布的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 41(1): 108 – 115.
SONG Jiali, WANG Hongyan, ZHANG Shuxiang, et al. Effect of fertilization and straw return on nutrient distribution along soil profile in black soil cropland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 41(1): 108 – 115. (in Chinese)

[38] NAFI E, WEBBER H, DANSO I, et al. Soil tillage, residue management and site interactions affecting nitrogen use efficiency in maize and cotton in the Sudan Savanna of Africa[J]. Field Crops Research, 2019, 244:107629.

[39] 孙晓, 景建元, 吕慎强, 等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 848 – 855.
SUN Xiao, JING Jianyuan, LÜ Shenqiang, et al. Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 848 – 855. (in Chinese)

[40] 武鹏, 杨克军, 王玉凤, 等. 缓释尿素对土壤和玉米植株氮素及干物质和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 94 – 101.
WU Peng, YANG Kejun, WANG Yufeng, et al. The effects of slow-release urea on soil and plant nitrogen content, dry matter and yield of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 94 – 101. (in Chinese)

(上接第 263 页)

[24] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[J]. CoRR, 2015: abs/1512.03385.

[25] SAINING X, ROSS G, PIOTR D, et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks[J]. CoRR, 2016: abs/1611.05431.

[26] 鲍文霞, 吴德钊, 胡根生, 等. 基于轻量型残差网络的自然场景水稻害虫识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 145 – 152.
BAO Wenxia, WU Dezhaoh, HU Gensheng, et al. Rice pest identification in natural scene based on lightweight residual network[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 145 – 152. (in Chinese)

[27] 何自芬, 黄俊璇, 刘强, 等. 基于非对称混洗卷积神经网络的苹果叶部病害分割[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 221 – 230.
HE Zifen, HUANG Junxuan, LIU Qiang, et al. High precision identification of apple leaf diseases based on asymmetric shuffle convolution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 221 – 230. (in Chinese)

[28] CHENG X, ZHANG Y H, CHEN Y Q, et al. Pest identification via deep residual learning in complex background[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 351 – 356.

[29] HOEL K, JIHENE B, CHRISTIAN D, et al. Boundary loss for highly unbalanced segmentation[J]. Medical Image Analysis, 2020, 67: 101851.

[30] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[J]. Springer, Cham, 2018, 11072(64): 3 – 19.

[31] 章权兵, 胡姗姗, 舒文灿, 等. 基于注意力机制金字塔网络的麦穗检测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 253 – 262.
ZHANG Quanbing, HU Shanshan, SHU Wencan, et al. Wheat spikes detection method based on pyramidal network of attention mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 253 – 262. (in Chinese)

[32] WANG Q J, ZHANG S Y, DONG S F, et al. Pest24: a large-scale very small object data set of agricultural pests for multi-target detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175:105585.