文章编号:1000-7601(2025)05-0168-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.17

秸秆超高量深施对土壤速效氮的影响

胡胜超[1],李雪嫣[1],胡雨彤[1],张群媛[1],王旭东[1,2],张育林[1,2]

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了探讨秸秆超高用量条件下秸秆还田深度对土壤速效氮含量及其储量的影响,本研究以小麦秸秆为供试材料进行田间试验。试验共设置 6 个处理,分别为 CK(土壤深层未施秸秆)、J1-40(秸秆以 24 000 kg·hm^{-2}还田至 40 cm)、J2-20(秸秆以 123 000 kg·hm^{-2}还田至 20 cm)、J2-40(秸秆以 123 000 kg·hm^{-2}还田至 40 cm)、J2-60(秸秆以 123 000 kg·hm^{-2}还田至 60 cm)和 J3-40(秸秆以 308 000 kg·hm^{-2}还田至 40 cm)。研究结果表明,秸秆超高量深施能够显著提高表层(0~10 cm)土壤中铵态氮和硝态氮含量及其储量。其中,在小麦季 0~10 cm 土层中,J3-40 处理较其他处理的铵态氮含量和储量分别提高 6.91%~43.78%和 18.68%~44.83%,J2-40 处理硝态氮含量和储量较 CK 处理分别提高 25.63%和 25.99%。在玉米季 0~10 cm 土层中,J3-40 处理较其他处理铵态氮含量和储量分别提高 4.60%~43.14%和 18.25%~44.16%,J2-40 处理较 CK 硝态氮含量分别提高 18.15%和 18.51%。所有处理在施入秸秆的土层附近均观察到铵态氮含量和储量增加、硝态氮含量和储量降低的现象。在小麦季和玉米季 40~50 cm 土层中,J3-40 处理的铵态氮含量较 CK 分别提升了 47.78%和 44.08%;J3-40 处理较 CK 铵态氮储量分别提升 43.86%和 39.95%。在小麦季 40~50 cm 土层中,J2-40 处理较 CK 硝态氮储量降低了 14.78%。秸秆超高量深施 1 年后,深层土壤中的铵态氮和硝态氮含量及其储量保持稳定。秸秆超高量深施后在土壤 30 cm 以内没有造成明显的争氮现象。综上所述,短期来看将秸秆深埋至 40 cm 处对于土壤速效氮的优化效果最佳。

关键词:秸秆超高量深施;冬小麦-夏玉米轮作;铵态氮;硝态氮

中图分类号:S344.1^{+}3;S143.1 **文献标志码**:A

Effects of straw deep application at ultra-high dosages on soil available nitrogen

HU Shengchao[1], LI Xueyan[1], HU Yutong[1], ZHANG Qunyuan[1],
WANG Xudong[1,2], ZHANG Yulin[1,2]

(1. *College of Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China*,
Ministry of Agriculture, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Wheat straw was used in this study as the test material for field experiments to explore the effects of straw returning depths on the contents of available nitrogen and its storage in soil under the condition of ultra-high dosage. Six treatments were set up in the experiment, including CK (no straw applied), J1-40 (24 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm), J2-20 (123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 20 cm), J2-40 (123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm), J2-60 (123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 60 cm), and J3-40 (308 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm). The result showed that straw deep application at ultra-high dosages could significantly increase the concentration and storage of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in the surface soil (0~10 cm). In the 0~10 cm soil layer of wheat's season, the J3-40 treatment increased the concentration and storage of ammonium nitrogen by 6.91%~43.78% and 18.68%~44.83% compared to other treatments, while the J2-40 treatment increased the concentration and storage of nitrate nitrogen by 25.63% and 25.99% compared to CK. In

收稿日期:2024-11-13 **修回日期**:2024-12-24

基金项目:陕西省农业关键核心技术攻关项目(2023NYGG011)

作者简介:胡胜超(1999-),男,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为土壤养分管理。E-mail:huhuhsc@163.com

通信作者:张育林(1984-),男,陕西武功人,副教授,硕士生导师,主要从事土壤改良和土壤养分管理研究。E-mail:yulinzhangbest@126.com

the 0~10 cm soil layer of maize's season, the J3-40 treatment increased the concentration and storage of ammonium nitrogen by 4.6%~43.14% and 18.25%~44.16% compared to other treatments, and the J2-40 treatment increased the concentration of nitrate nitrogen by 18.15% and 18.51% compared to the CK treatment. In all treatments, an increasing trend in ammonium nitrogen concentration and storage, and a decreasing trend in nitrate nitrogen concentration were observed near the soil layer where straw was applied. In the 40~50 cm soil layer of the wheat and maize season, the ammonium nitrogen concentration of the J3-40 treatment increased by 47.78% and 44.08%, respectively, and the ammonium nitrogen storage of the J3-40 treatment increased by 43.86% and 39.95%, respectively, compared with the CK treatment. In the 40~50 cm soil layer of wheat's season, the nitrate nitrogen storage under J2-40 treatment decreased by 14.78%, compared with the CK treatment. The concentration and storage of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in deep soil remained stable after one year of straw application. There was no obvious phenomenon of nitrogen competition within 30 cm soil layer after deep application of straw. In summary, it is best to deeply bury the straw into the 40 cm soil layer according to the soil's available nitrogen concentration and storage in the short term.

Keywords: ultra-high dosage straw deep application; winter wheat-summer maize rotation; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen

由于我国种植小麦、玉米等粮食作物农田经济效益低,因此长期以来有机肥零投入、管理粗放、养地措施不足的问题尤为突出。作物秸秆是土壤有机碳的重要来源,作物秸秆分解后不但可以改善土壤物理结构,而且对增加和平衡土壤养分及土壤微生物均具有显著作用[1]。然而,秸秆还田后在形成腐殖质之前,可能会引发微生物与作物间养分竞争和农田病虫害增加等问题。2011 至 2022 年间,我国秸秆年产量由 7.5 亿 t 增加到了 8.6 亿 t[2]。然而,大量秸秆在田间地头堆放现象依然普遍,秸秆资源并没有很好用于农田土壤有机碳的循环过程,秸秆利用率低且造成严重的环境压力。同时,尽管我国有机物料数量持续增加,但其利用率长期偏低。为了更有效地提高秸秆利用率并减少环境压力,提出了秸秆超高量深施技术。秸秆超高量深施,即将大量的秸秆深埋至 30 cm 土层以下。与传统秸秆还田相比,秸秆深施可以避开作物主要根系集中区,避免了作物秸秆对植物生长产生的不利影响[3]:如影响作物出苗、局部水分传导和根系下扎等。秸秆深施还可以在不影响作物生长的前提下实现高量甚至超高量还田,有利于增加土壤固碳容量。随着大量秸秆在土层深处转化成腐殖质,使深层土壤更适合作物生长,从而增加了土壤中植物可以吸收利用的养分。因此,秸秆超高量深施很可能在促进底土土壤质量提升、深层土壤固碳扩容、促进养分循环和减少化肥用量等方面具有较大的潜力。

秸秆深施至 20~40 cm 土层作为一种创新的农业管理措施,已被证实对土壤健康、作物产量和环境可持续性具有正面影响,近年来受到高度重视[4]。有研究发现,将秸秆深埋至 20~40 cm 土层时,能够促进土壤微生物活动,有效提升土壤肥力,促进土壤养分的循环,同时有助于减少化肥使用量[5-6]。长期秸秆深施试验结果表明,将秸秆以 24 000 kg · hm^{-2} 深施至 40 cm 土层 3 年后,0~40 cm 土层的速效养分含量均显著提高[7]。在秸秆深施的背景下,董建新等[8]发现将玉米秸秆高量(75 000 kg · hm^{-2})一次性深施至 30~40 cm 土层,相较于常量(15 000 kg · hm^{-2})深层还田对土壤的改良效果可以维持更多年限,这对于提升土壤质量具有重要作用。丛萍等[9]还发现将玉米秸秆以 45 000~75 000 kg · hm^{-2} 富集深施后可以显著增加土壤有机碳含量。还有研究发现,秸秆富集深施至 18~38 cm 土层时,显著提高了 20~40 cm 土层的速效氮含量[6]。秸秆超高量深施技术作为一种新兴的秸秆还田方式,对土壤物理性质有正面影响[10],通过将大量秸秆深埋至 30~40 cm 土层,有效避免对作物根系生长的直接影响,减少对植物生长产生的负面影响,同时促进深层土壤的改良。当前,秸秆高量深施的深度通常在 10~40 cm 范围内,施用量则从1 000至 75 000 kg · hm^{-2} 不等,具体数值还应根据土壤条件和作物需求来调整[8,11-12]。此外,现代农机具也逐步可以实现秸秆条带状深施效果,深度可达 30~40 cm[6]。这一技术的进步显著提升了秸秆深施的工作效率,并为秸秆高量深施农机具的发展奠定了坚实的基础,也为秸秆超高量深施在农田系统中的应用提供了技术支撑。

当前,农业生产面临如何高效利用农作物秸秆

实现土壤肥力持续提升和作物产量稳定增长的挑战[13]。虽然前人做过一些关于秸秆高量深施的研究,但关于秸秆超高量深施对农田深层土壤速效氮分布影响的研究仍相对欠缺。因此,本试验于关中平原地区研究不同秸秆还田用量及还田深度对不同深度土壤速效氮含量及储量的影响,以期为我国西北地区秸秆资源超高量深施还田在农业生产中的应用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 10 月—2023 年 10 月在陕西省咸阳市武功县大庄镇(108°9′24″ E,34°15′33″ N)进行。该地区属于暖温带大陆性季风气候,是典型的冬小麦-夏玉米轮作一年两熟种植区。试验期间的气温与降水数据来自气象数据记录仪(图 1)。全年平均气温在 9~13℃,无霜期 240~315 d,年平均降水量为 633.7 mm,降水主要集中在 5—9 月。供试土壤为塿土(土垫旱耕人为土)。表层土壤(0~20 cm)初始理化性质为:pH 值 8.41,*EC* 113 μS·cm^{-1},有机碳 10.43 g·kg^{-1},全氮 1.36 g·kg^{-1},硝态氮 9.49 mg·kg^{-1},铵态氮 5.86 mg·kg^{-1},有效磷 10.86 mg·kg^{-1},速效钾 154.32 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计,设置 4 种不同的秸秆施用量,分别为 0、24 000、123 000、308 000 kg·hm^{-2};同时,还设置了 3 种不同还田深度,分别为 20、40、60 cm。每个小区面积为 20 m^2(4 m × 5 m),各处理设有 4 次重复,共计 24 个小区。具体的试验处理描述详见表 1。除秸秆深埋过程外,所有处理的其他田间管理措施(如常规秸秆还田、播种、旋耕等)保持一致。各处理还田秸秆均为小麦秸秆,收割机收获小麦后的粉碎秸秆,长度约为 1~2 cm,为了便于进行秸秆超高量深施,小麦秸秆还田前使用造粒机对其进行造粒处理。秸秆全氮、全磷、全钾、有机碳含量分别为 5.13 、0.63、12.29、415.85 mg·g^{-1}。

在 2022 年 10 月布置试验时一次性完成秸秆深施,后续各处理不再进行秸秆深施。为了不扰乱原有的土壤剖面构型,具体操作为:在施入秸秆前,将整个小区的土壤按照每 20 cm 的深度挖出后,并按顺序堆放在小区周围,随后将秸秆均匀铺于不同深度土层,再将挖出的土壤按原始层次顺序移回,并适度压实以减少土壤容重误差。各处理的秸秆还田方式按作物的轮作周期进行,小麦收获后将粉碎的小麦秸秆覆盖在地表,硬茬播种玉米;玉米收获后将玉米秸秆粉碎,使用旋耕机旋耕约 10 cm。各处理每季小麦秸秆还田量约为 6 000 kg·hm^{-2},玉米季秸秆还田约 7 700 kg·hm^{-2}。

在完成秸秆填埋后,于 2022 年 10 月 20 日进行冬小麦播种,品种为‘沃丰麦 168’,播种量为 225 kg·hm^{-2},并于 2023 年 6 月 6 日收获。冬小麦播种前一次性施用嘉力旺复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O = 15∶20∶5)600 kg·hm^{-2}作为底肥,施肥量折算为 N:90 kg·hm^{-2},P_2O_5:120 kg·hm^{-2},K_2O:30 kg·hm^{-2}。于 2023 年 6 月 21 日播种夏玉米,品种为‘先玉 1140’,播种量为 25 kg·hm^{-2},并于 2023 年 10 月 8 日收获。玉米播种一次性施用史丹利缓释肥(N∶P_2O_5∶K_2O = 28∶6∶6)375 kg·hm^{-2}作为底肥,施肥量折算为 N:116 kg·hm^{-2},P_2O_5:25 kg·hm^{-2},K_2O:25 kg·hm^{-2}。小麦和玉米生育期内不再进行追肥。为了避免不同扰动深度对灌溉效果的影响,且兼顾当季降雨量因素,冬小麦和夏玉米生长期间未进行灌溉。

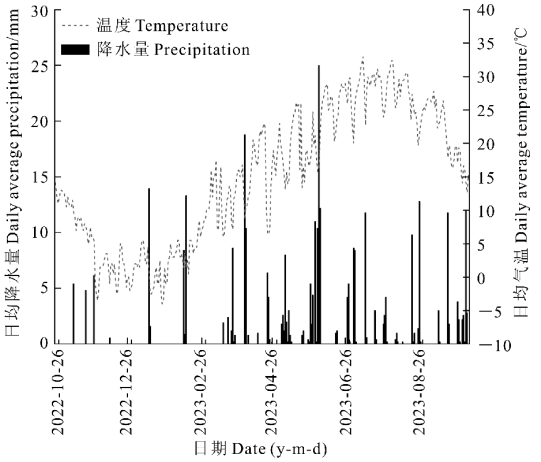


图 1 试验期间日平均降水量和日平均气温

Fig.1 Daily average precipitation and temperature during the experimental period

表 1 田间试验方案

Table 1 Field experimental plan

处理 Treatment	试验处理描述 Description of experimental treatment
CK	土壤深层未施秸秆 No straw applied
J1-40	秸秆用量 24 000 kg·hm^{-2}、还田深度 40 cm 24 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm
J2-20	秸秆用量 123 000 kg·hm^{-2}、还田深度 20 cm 123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 20 cm
J2-40	秸秆用量 123 000 kg·hm^{-2}、还田深度 40 cm 123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm
J2-60	秸秆用量 123 000 kg·hm^{-2}、还田深度 60 cm 123 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 60 cm
J3-40	秸秆用量 308 000 kg·hm^{-2}、还田深度 40 cm 308 000 kg·hm^{-2} returned to the soil in 40 cm

1.3　测定指标与计算方法

1.3.1　*样品采集*　土壤样品于 2023 年 6 月小麦收获后和 2023 年 10 月玉米收获后用直径 3 cm 的土钻采集 0~100 cm 土壤样品,每 10 cm 为 1 层,共分 10 层。在每个小区随机取 3 个点,将相同土层的土壤样品混匀组成一个混合样品(秸秆夹层的土壤样品取回后只捡出肉眼可辨的秸秆材料),拣出土壤样品中的石砾和植株残体后将土壤样品过 2 mm 筛。保存于 4℃冰箱,用于土壤速效氮的测定。

于 2023 年 10 月玉米收获后,在 CK、J2-40 和 J3-40 处理的小区内分别挖出一个 100 cm 深的土壤剖面,用环刀采集土样带回实验室进行土壤容重测定。CK 处理仍以 10 cm 间隔将 0~100 cm 土壤分为 10 层;J2-40 和 J3-40 处理由于秸秆用量较高,30~40 cm 土层为秸秆层,故不采集 30~40 cm 土层来测定容重,因此将土层分 9 层;用环刀采集土样,每层测定 3 个重复。

1.3.2　*测定方法*　称取过 2 mm 筛的新鲜土壤样品 5.00 g 置于 150 mL 三角瓶中,用 1 mol·L^{-1} KCl 溶液进行振荡浸提,使用 AA3 型连续流动分析仪测定 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量。用烘干法测定土壤含水量,土壤容重采用环刀法测定[14]。

1.3.3　*计算方法*　土壤铵态氮储量(kg·hm^{-2}) = 土层厚度×土壤容重×土壤铵态氮含量/10。土壤硝态氮储量(kg·hm^{-2}) = 土层厚度×土壤容重×土壤硝态氮含量/10[15-16]。

1.4　数据分析与计算

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据统计,用 IBM SPSS Statistics 25 软件对不同施用深度、不同秸秆用量对速效氮的影响进行单因素方差分析(one-way ANOVA);采用 Origin 2023 软件进行数据绘图。

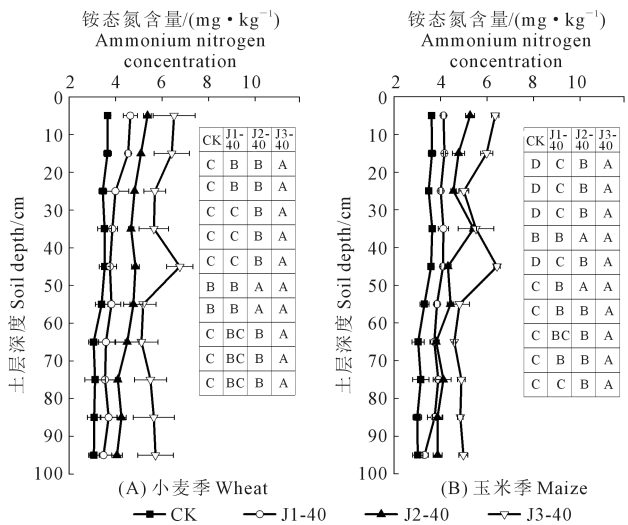
2　结果与分析

2.1　不同秸秆用量对土壤铵态氮含量的影响

在 0~100 cm 土壤剖面中,小麦季与玉米季 CK、J1-40、J2-40 和 J3-40 处理的铵态氮含量随秸秆用量的变化趋势相似,秸秆用量越大铵态氮含量越高,两季均表现为 J3-40>J2-40>J1-40>CK(图 2)。在小麦季和玉米季 0~10 cm 土层中,J3-40 处理相较于其他处理铵态氮含量提升最为显著,较其他处理分别显著提高 17.51%~43.78%和 17.07%~43.14%。在 30~50 cm 土层中,小麦季和玉米季 J3-40 处理的铵态氮含量急速增长并出现峰值,同时此土层的铵态氮含量显著高于 J2-40、J1-40 和 CK 处理,其含量分别为 6.76 mg·kg^{-1}和 6.43 mg·kg^{-1},较 J2-40、J1-40 和 CK 处理分别显著提高28.11%~47.47%和 32.84%~44.08%。在小麦季 30~50 cm 土层,J2-40 处理的铵态氮含量并未出现峰值,而在玉米季出现了峰值。

2.2　秸秆还田深度对土壤铵态氮含量的影响

不同秸秆还田深度对土壤铵态氮含量的影响表现出一定的规律性。在 0~100 cm 土层土壤中,小麦季与玉米季秸秆高量深施处理(J2-60、J2-40 和 J2-20)的铵态氮含量较 CK 均显著增加(图 3)。在小麦季和玉米季,J2-20 和 J2-60 处理铵态氮含量均于施加秸秆的土层中出现峰值。在 0~20 cm 土层中,小麦季和玉米季各处理铵态氮含量从高到低依次为 J2-20>J2-60>J2-40>CK。在 10~20 cm 土层中,小麦季和玉米季 J2-20 处理铵态氮含量显著高于其他处理,其含量分别为 7.45 mg·kg^{-1}和 6.74 mg·kg^{-1}。在 10~20 cm 土层中,J2-20 处理在小麦季铵态氮含量分别比 J2-40、J2-60 和 CK 处理显著提高 31.68%、25.2%和 51.01%,在玉米季 J2-20 处理铵态氮含量分别比 J2-40、J2-60 和 CK 处理显著提高 29.08%、26.85%和 46.4%。在 20~50 cm 土层中,小麦季 J2-40 处理铵态氮含量未出现峰值;而玉米季 J2-40 处理铵态氮含量出现了峰值并显著高于其他处理,其含量为 5.42 mg·kg^{-1}。



注:图中表格里不同大写字母表示 0~100 cm 土壤剖面中同一土层不同处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different capital letters in the table indicate significant differences between treatments within the same soil layer in the 0~100 cm soil profile (P<0.05), the same below.

图 2　不同秸秆用量对小麦季和玉米季土壤铵态氮含量的影响

Fig.2　Effects of different amounts of straw on soil NH_4^+-N in wheat and maize season

2.3 不同秸秆用量对土壤硝态氮含量的影响

在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施(J2-40 和 J3-40)较其余处理显著提升了表层(0~30 cm)土壤硝态氮含量。J1-40、J2-40 和 J3-40 处理硝态氮含量均在施加秸秆附近的土层急速下降(图 4)。在小麦季和玉米季,CK、J1-40 和 J3-40 处理的硝态氮含量均表现为随土层深度增加而逐渐降低,在深层达到稳定。小麦季 J2-40 处理的硝态氮含量表现出随土层的加深呈先降低后增加的现象,玉米季 J2-40 处理随着土层的加深而逐渐降低。

0~30 cm 土层中,小麦季和玉米季均为 J2-40 处理的硝态氮含量最高,且显著高于 CK 和 J1-40 处理。30~50 cm 土层中,小麦季和玉米季 J1-40、J2-40 和 J3-40 处理的硝态氮含量迅速下降,小麦季各秸秆还田处理硝态氮含量分别为 6.78、6.21、6.96 mg·kg^{-1},玉米季各秸秆还田处理硝态氮含量分别为 6.70、6.71、6.87 mg·kg^{-1}。50~100 cm 土层中,小麦季 CK 和 J1-40 处理的硝态氮含量随着土层深度增加逐渐趋于稳定,J2-40 和 J3-40 处理则随着土层加深硝态氮含量逐渐增加。在深层(80~100 cm)土壤中,小麦季 J2-40 和 J3-40 处理的硝态氮含量显著高于 CK 和 J1-40,硝态氮含量从大到小依次为 J2-40>J3-40>J1-40>CK;而玉米季表现为 J1-40 处理的硝态氮含量显著高于 J2-40 和 CK 处理。

2.4 秸秆还田深度对土壤硝态氮含量的影响

在小麦季,J2-20、J2-40 和 J2-60 处理的硝态氮含量随着土层的加深呈先快速下降后又逐渐增加的趋势(图 5A)。在小麦季 0~30 cm 土层中,J2-40 和 J2-60 处理的硝态氮含量显著高于 J2-20 和 CK 处理。其中 J2-20 在施加秸秆的土层上(10~30 cm)硝态氮含量明显降低,显著低于其他处理,含量为 6.63 mg·kg^{-1}。30~40 cm 土层中,J2-40 处理在施用秸秆的土层硝态氮含量同样急速下降,含量为 6.21 mg·kg^{-1}。50~60 cm 土层中,J2-60 处理在施用秸秆的土层硝态氮含量同样急速下降,含量为 6.65 mg·kg^{-1}。60~100 cm 土层中,J2-20、J2-40 和 J2-60 处理的硝态氮含量随着土层加深而逐渐增长,而 CK 硝态氮含量较为稳定。在深层(80~100 cm)土壤中,各处理硝态氮含量从大到小依次为 J2-20>J2-40>J2-60>CK。

在玉米季,J2-20 处理的硝态氮含量随着土层的加深先降低后逐渐增加;CK、J2-40 和 J2-60 处理的硝态氮含量随着土层的加深逐渐降低,在深层(60~100 cm)土壤中硝态氮含量趋于稳定(图 5B)。

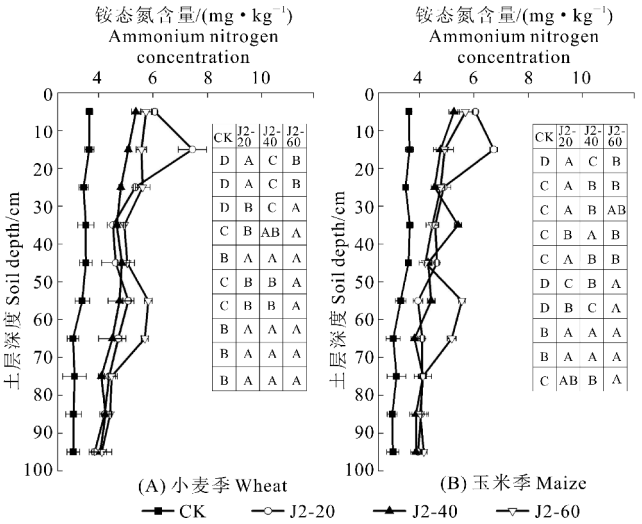


图 3 不同秸秆施用深度对小麦季和玉米季土壤铵态氮含量的影响

Fig.3 Effects of different straw application depths on soil ammonium nitrogen in wheat and maize season

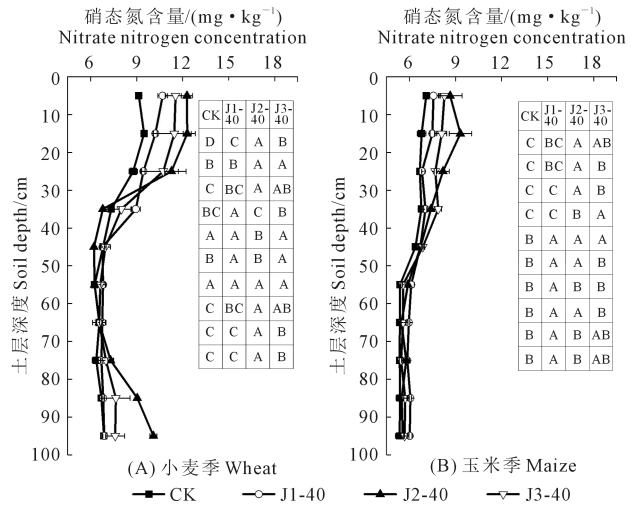


图 4 不同秸秆用量对小麦季和玉米季土壤硝态氮含量的影响

Fig.4 Effects of different amounts of straw on soil nitrate nitrogen in wheat and maize seasons

在 0~30 cm 土层中,J2-20 也是在施加秸秆的土层上(10~20 cm)硝态氮含量明显降低,显著低于 J2-40 和 J2-60 处理,含量为 6.93 mg·kg^{-1}。在 30~40 cm 土层中,J2-40 在施用秸秆的土层硝态氮含量急速下降,含量为 7.02 mg·kg^{-1}。在 50~60 cm 土层中,J2-60 也在施用秸秆的土层硝态氮含量急速下降,含量为 5.57 mg·kg^{-1}。60~100 cm 土层中,除 J2-20 处理外,各处理的硝态氮含量逐渐趋于稳定。

2.5 秸秆超高量深施对土壤铵态氮储量的影响

在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施(J3-40)后可以显著提升 0~100 cm 土壤剖面中铵态氮储

量,并且秸秆用量越高对于铵态氮储量的提升效果越显著,各处理两季铵态氮储量从高到低均表现为 J3-40>J2-40>CK(图 6)。其中除了表层(0~20 cm)土壤外,J2-40 和 J3-40 处理在施加秸秆附近的土层(40~60 cm)中均出现了峰值,并且 J3-40 处理的峰值显著高于 J2-40 处理。小麦季 J2-40 处理铵态氮峰值在 50~60 cm 土层,其储量为 8.67 kg·hm^{-2},相较于 50~60 cm 土层的 CK 提高 27.34%;J3-40 处理铵态氮储量峰值在 40~50 cm 土层,其储量为 11.81 kg·hm^{-2},相较于 40~50 cm 土层的 CK 提高 43.86%。玉米季 50~60 cm 土层中,J2-40 处理铵态氮储量为 8.07 kg·hm^{-2},相较于 50~60 cm 土层的 CK 提高 23.92%;J3-40 处理铵态氮储量峰值在 40~50 cm 土层,其储量为 11.24 kg·hm^{-2},相较于 40~50 cm 土层的 CK 提高 39.95%。在 60~100 cm 土层中,各处理铵态氮储量趋于稳定,无明显波动。

2.6　秸秆超高量深施对土壤硝态氮储量的影响

在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施较 CK 均显著提高了表层(0~10 cm)土壤硝态氮储量,其中 J2-40 处理硝态氮储量较 CK 分别显著提高 25.99% 和 18.51%。在 0~100 cm 土壤剖面中,CK、J2-40 和 J3-40 处理在玉米季的硝态氮储量均略低于小麦季(图 7)。在小麦季,40~50 cm 土层中,J2-40 和 J3-40 处理硝态氮储量在秸秆施加层均出现了急速下降,其含量分别为 10.6 kg·hm^{-2} 和 13.3 kg·hm^{-2}。50~100 cm 土层中,CK 和 J3-40 处理硝态氮储量趋于稳定,J2-40 处理硝态氮储量逐渐增加。在玉米季,秸秆超高量深施后 40~100 cm 土层硝态氮储量较为稳定。

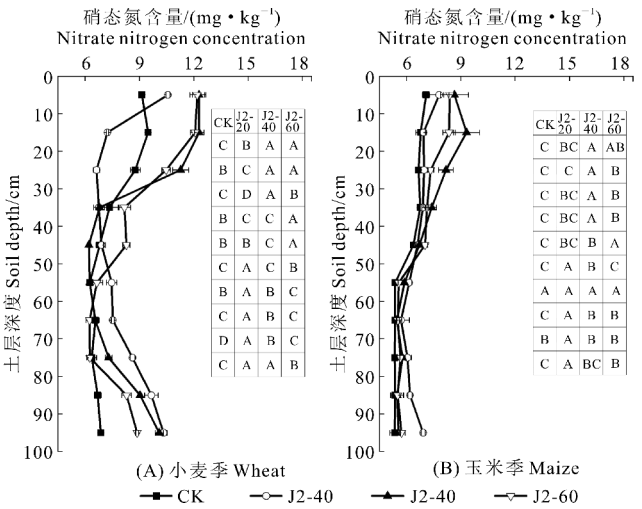


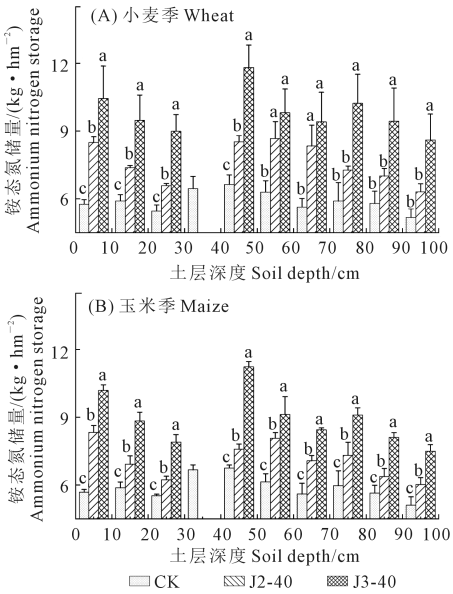
图 5　不同秸秆施用深度对小麦季和玉米季土壤硝态氮含量的影响

Fig.5　Effects of different straw application depths on soil ammonium nitrogen in wheat and maize seasons

3　讨　论

3.1　秸秆超高量深施对土壤铵态氮含量的影响

秸秆在还田前期能够显著提升土壤中的铵态氮含量[17]。先前的研究亦发现,秸秆深埋至 120 cm



注:30~40 cm 土层除 CK 外为秸秆层。图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The soil layer for 30~40 cm, except for CK, is the straw layer. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments within the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图 6　不同秸秆用量对小麦季和玉米季土壤铵态氮储量的影响

Fig.6　Effects of different amounts of straw on soil ammonium nitrogen storage in wheat and maize seasons

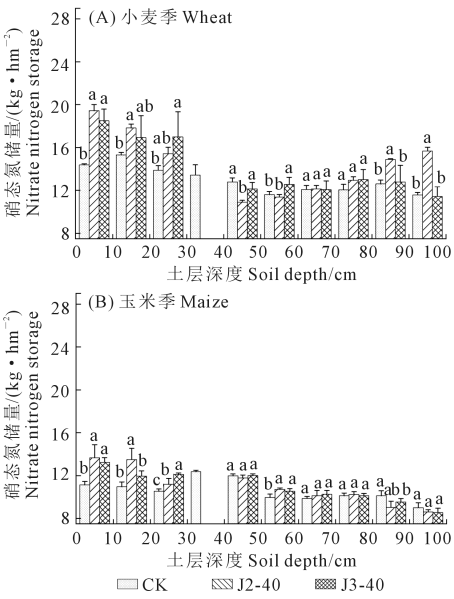


图 7　不同秸秆用量对小麦季和玉米季土壤硝态氮储量的影响

Fig.7　Effects of different amounts of straw on soil nitrate nitrogen storage in wheat and maize seasons

土层后,能够增加整个土壤剖面上铵态氮含量[18]。同样本研究也发现秸秆超高量深施后可以提高整个土壤剖面上的铵态氮含量。此外,研究进一步发现当秸秆还田深度一致而用量不同时,无论是小麦季还是玉米季,土壤剖面上的铵态氮含量均呈现出随秸秆用量增加而增加的趋势,这表明秸秆施用量的增加有助于促进各土层铵态氮含量的增加。这一现象可能与秸秆分解过程中释放的氮素有关,秸秆中的有机氮在微生物的作用下可转化为铵态氮,从而增加了整个土壤剖面上铵态氮的含量。当秸秆用量一致而还田深度不同时,在表层土壤中,小麦季和玉米季均表现为J2-20处理铵态氮含量最高,这可能是因为铵态氮作为硝化作用的底物和矿化作用的直接产物,当秸秆还田至20 cm处时,增强了表层土壤氮的矿化作用,从而提升了土壤表层的铵态氮含量[19]。

本研究还发现,在小麦季和玉米季中施加秸秆的土层附近,铵态氮含量与硝态氮含量的变化趋势恰恰相反,即铵态氮含量增加而硝态氮含量降低。这种现象归因于土壤中铵态氮和硝态氮之间存在"此消彼长"的动态平衡关系[20]。因为秸秆一次性大量施入会对土壤化学性质产生影响,如土壤微生物活动等,抑制硝化细菌的生理活性,从而导致硝化作用速度下降[21],进而造成铵态氮在秸秆夹层附近相对聚集。

有研究表明,秸秆深层还田后深层土壤中的铵态氮含量提高了86.70%[22],这与本试验结果相似。在本试验中,70~100 cm土层深施秸秆处理的铵态氮含量均高于未深施秸秆处理。这是因为大量秸秆施入土壤后提高了土壤微生物活性和数量[23],微生物活性和数量的增加加强了土壤对铵态氮的固定[24],从而使土壤中铵态氮含量增加。

3.2 秸秆超高量深施对土壤硝态氮含量的影响

秸秆还田作为一种被广泛采纳的土壤改良措施,不仅促进了土壤养分循环,还将秸秆内残存的养分归还土壤。秸秆还田在缓解土壤中氮过量的问题、提高土壤氮素利用率方面发挥了积极作用[25]。前人研究表明,秸秆还田能够显著提升土壤表层的硝态氮含量,减少氮素淋失的风险[26]。本研究发现,当秸秆还田深度一致而秸秆用量不同时,小麦季和玉米季中J2-40、J2-60和J3-40处理表层(0~10 cm)土壤的硝态氮含量均显著高于CK处理。当秸秆还田用量一致而还田深度不同时,小麦季和玉米季表层(0~10 cm)土壤硝态氮含量均表现为J2-40处理最高,CK处理最低,表明秸秆超高量深施能有效提高表层土壤硝态氮含量,并且对作物的夺氮效应不明显。这可能是由于秸秆超高量深施后改善了土壤的物理结构[5],使更多硝态氮在表层土壤中积累。在氮素供应有限的情况下,作物与微生物通常会竞争可用氮源。本研究中由于秸秆用量较大,随着秸秆的分解,有机氮逐渐矿化为无机氮,提高了土壤表层硝态氮含量,能持续地供给氮素,未出现严重的夺氮现象。

本试验中,小麦季和玉米季各处理在施加秸秆土层中硝态氮含量均显著降低。这可能是由于本试验中秸秆用量较大,且所用秸秆的碳氮比较高(83∶1),导致微生物需要从土壤中获取足够的氮素以满足生长需求,在秸秆腐解过程中微生物最先消耗的是硝态氮[27],从而导致土壤中硝态氮含量显著降低,进而提高了氮素的利用率。

3.3 秸秆超高量深施对土壤铵态氮和硝态氮储量的影响

土壤铵态氮和硝态氮是作物吸收氮素的主要形式,其储量的高低直接反映了土壤氮素供应能力的强弱。有研究指出,秸秆还田能够通过改善土壤结构来减少土壤中氮素的损失[28],同时也能增强土壤的蓄水保墒能力,降低养分流失风险[29]。本试验结果表明,在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施后提高了0~10 cm土层铵态氮和硝态氮储量,这可能是因为本试验中的秸秆用量较大,将秸秆深埋后形成了秸秆夹层,同时增强了土壤的蓄水保墒效果,从而减少养分的流失,最终提高了0~10 cm土层土壤铵态氮和硝态氮储量。

本研究发现,在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施后均在其施用层出现铵态氮储量的峰值,表明秸秆超高量深施有助于优化特定土层的铵态氮管理。产生这一现象的原因可能是因为秸秆还田促进了黏土矿物对施加秸秆附近土层铵态氮的固定[30],从而使秸秆施用层铵态氮储量出现了峰值。本试验结果表明,在小麦季和玉米季,秸秆超高量深施(J3-40)后0~100 cm剖面上的铵态氮储量均高于CK处理。这是因为秸秆中的氮素被还田后,增加了土壤中铵态氮的来源,从而提高了整个剖面的铵态氮储量。

4 结 论

秸秆超高量深施能有效提升表层土壤速效氮含量及储量,尤其是将秸秆超高量深施至40 cm处时的效果最佳。具体来说,将秸秆以308 000 kg·hm^{-2}还田至40 cm时0~100 cm土壤剖面铵态氮含

量和储量最高;而秸秆以 123 000 kg · hm^{-2}还田至 40 cm 时表层(0~10 cm)土壤硝态氮含量和储量最高,相较于土壤深层未施秸秆分别提高 22.18%~34.47%和 18.51%~25.99%。秸秆超高量深施后在土壤 30 cm 以内并没有造成明显的作物争氮现象。

参 考 文 献:

[1] ZHU C C, ZHONG W H, HAN C, et al. Driving factors of soil organic carbon sequestration under straw returning across China´s uplands[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 335: 117590.

[2] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751-760.
LIU J J, YAN X B, ZHANG M Y, et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(3): 751-760.

[3] 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 W F, YANG S Q, LOU S, 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, 2020, 36(7): 117-124.

[4] LIU N, LI Y Y, CONG P, et al. Depth of straw incorporation significantly alters crop yield, soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104772.

[5] 陈盛, 黄达, 章二子, 等. 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤无机氮量及酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 45-54.
CHEN S, HUANG D, ZHANG E Z, et al. The effects of straw incorporation depth on nitrogen dynamics and enzymatic activities in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 45-54.

[6] 王治统, 凌俊, 刘子熙, 等. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 663-674.
WANG Z T, LING J, LIU Z X, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2024, 32(4): 663-674.

[7] 王喜艳, 张亚文, 冯燕, 等. 玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 103-107.
WANG X Y, ZHANG Y W, FENG Y, et al. Effects of deep maize straw returning on soil fertility and maize yields[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 103-107.

[8] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 921-934.
DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in blacksoil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 921-934.

[9] 丛萍, 逄焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 811-823.
CONG P, PANG H C, WANG J, et al. Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancingsoil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 811-823.

[10] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田对土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 43-49.
WANG Q J, LIU F, JIAO F, et al. Effects of strip-collected chopping and mechanical deep-buried return of straw on physical properties of soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(17): 43-49.

[11] 丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 148-156.
CONG P, LI Y Y, GAO Z J, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 148-156.

[12] 王婧, 张莉, 逄焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177-183.
WANG J, ZHANG L, PANG H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 177-183.

[13] 逄焕成. 创新秸秆还田方式 助力黑土区“藏粮于地”[J]. 中国农业综合开发, 2021, (5): 23-24.
PANG H C. Innovative straw returning methods help black soil areas ‘store grain on the ground’ [J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2021, (5): 23-24.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 28-29.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 28-29.

[15] 陈肖如, 李晓欣, 胡春胜, 等. 华北平原农田关键带硝态氮存储与淋失量研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1546-1557.
CHEN X R, LI X X, HU C S, et al. Nitrate storage and leaching in the critical zone of farmland in the north China plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1546-1557.

[16] 李勋章, 董新光, 杨鹏年, 等. 干旱绿洲区硝态氮与铵态氮的分布特征及运移特点研究[J]. 中国农村水利水电, 2016, (10): 26-30.
LI X Z, DONG X G, YANG P N, et al. Research on the distribution and migration characteristics of nitrate and ammonium nitrogen in arid oasis regions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (10): 26-30.

[17] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4087-4101.
HUANG R, GAO M, LI J C, et al. Effects of combined application of various organic materials and chemical fertilizer onsoil nitrogen formation and greenhouse gas emission under equal nitrogen rates from purple Soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(21): 4087-4101.

[18] 王翊婷, 陈强, 马良, 等. 深埋秸秆及淋洗处理对盐碱土壤改良效果研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(12): 159-166.
WANG Y T, CHEN Q, MA L, et al. Effects of deep buried straw and leaching onsaline-alkali soil improvement[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(12): 159-166.

[19] 朱晓晴. 秸秆不同还田深度下土壤温室气体排放特征及其影响因素[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
ZHU X Q.Soil greenhouse gas emission and influence factors in different depths of straw returning[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.

[20] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. 中国农业科学, 2015, (23): 4717-4727.
DUAN P P, CONG Y H, XU W J, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamic ofsoil soluble N in greenhouse cultivation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, (23): 4717-4727.

[21] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81-85.
MU P, ZHANG E H, WANG H N, et al.Effects of continuous returning straw to maize tilth soil on chemical character and microbial biomass[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 81-85.

[22] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the north China plain[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108612.

[23] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3985-3996.
JIN Y T, LI X F, CAI Y, et al. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in-rice-rape rotation[J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3985-3996.

[24] BANAYO N P M C, BUENO C S, HAEFELE S M, et al. Site-specific nutrient management enhances sink size, a major yield constraint in rainfed lowland rice[J]. Field Crops Research, 2018, 224: 76-79.

[25] 张天尧, 吴泽璐, 卫正宇, 等. 整合分析秸秆还田对中国主要粮食作物氮肥利用率的影响[J]. 土壤与作物, 2023, 12(4): 429-438.
ZHANG T Y, WU Z L, WEI Z Y, et al. Effects of straw returning on nitrogen use efficiency of major grain crops in China: a meta-analysis[J]. Soil and Crop, 2023, 12(4): 429-438.

[26] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1143-1150.
DONG L L, WANG H H, LU C Y, et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1143-1150.

[27] 邹晨怡, 丁洪, 王亚萨, 等. 秸秆对尿素氮在土壤中转化的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1213-1219.
ZOU C Y, DING H, WANG Y S, et al. Effect of straw onurea nitrogen transformation in soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, 30(6): 1213-1219.

[28] 吴三鼎, 董强, 党廷辉. 减量施氮及秸秆深埋对春玉米地土壤电导率和硝态氮淋溶的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 46-51.
WU S D, DONG Q, DANG T H. Effects of reduced nitrogen application and deep burial of straw on Soil electrical conductivity and nitrate nitrogen leaching in spring maize field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 46-51.

[29] 于博, 徐松鹤, 任琴, 等. 秸秆还田研究进展及内蒙古玉米秸秆深翻还田现状[J]. 作物杂志, 2022, (2): 6-15.
YU B, XU S H, REN Q, et al. Research progress of straw returning and present situation of maize straw returning by deep ploughing in Inner Mongolia[J]. Crops, 2022, (2): 6-15.

[30] 曲瑞姣. 秸秆还田对肥料来源固定态铵在土壤中年际动态变化的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
QU R J. Effects of straw returning to field on interannual dynamic changes of fixed ammonium from fertilizer source in soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

(上接第 167 页)

[19] 黄雅茹, 马迎宾, 郝玉光, 等. 绿洲春季不同来源灌溉水土壤盐分离子分布特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1856-1863.
HUANG Y R, MA Y B, HAO Y G, et al. Distribution characteristics ofsoil salt Ions of different sources of irrigation water in oasis spring[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2018, 31(9): 1856-1863.

[20] 张剑, 王利平, 谢建平, 等. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2455-2464.
ZHANG J, WANG L P, XIE J P, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in Dunhuang Yangguan wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2455-2464.

[21] 赵娜, 李瑞东, 王小利, 等. 外源碳酸钙和温度对黄壤活性有机碳组分及微生物群落组成的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 238-245.
ZHAO N, LI R D, WANG X L, et al. Effects of exogenous calcium carbonate and temperature on active organic carbon components and microbial mommunity composition in yellowsoil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 238-245.

[22] 张前前, 王飞, 刘涛, 等. 微咸水滴灌对土壤酶活性、CO_2通量及有机碳降解的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2743-2750.
ZHANG Q Q, WANG F, LIU T, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO_2 flux and organic matter decomposition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2743-2750.

[23] 王鹏, 郑学博, 梁洪波, 等. 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳组分和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(1): 187-196.
WANG P, ZHENG X B, LIANG H B, et al. Effects of different fertilization models on active organic carbon components and enzyme activities of tobacco-growing brown Soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(1): 187-196.

[24] 刘学东, 陈林, 杨新国, 等. 荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J]. 西北植物学报, 2016, 36(9): 1882-1890.
LIU X D, CHEN L, YANG X G, et al. Characteristics of soil labile organic carbon fractions and their relationship withsoil enzyme activities in four typical communities in desert steppe[J]. Acta Botanica Sinica, 2016, 36(9): 1882-1890.

[25] LI Y, LI W, JIANG L, et al. Salinity affects microbial function genes related to nutrient cycling in arid regions[J]. Frontiers in Microbiology, 2024,15: 1407760.

[26] FENG G, WU Y, YANG C, et al. Effects of coastal saline-alkali soil on rhizosphere microbial community and crop yield of cotton at different growth stages[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1359698.

[27] KALAM S, BASU A, AHMAD I, et al. Recent understanding ofsoil *Acidobacteria* and their ecological significance: a critical review[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 580024.

[28] PENG W T, WANG Y, ZHU X X, et al. Distribution characteristics and diversities of *cbb* and *coxL* genes in paddy soil profiles from southern China[J]. Pedosphere, 2021, 31(6): 954-963.

[29] 舒向阳. 沙化高寒草甸土壤有机碳、微生物群落与酶活性对不同修复措施响应特征分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
SHU X Y. Characteristics of response of soil organic carbon, microbial community and enzyme activity to different restoration measures in desertified alpine meadow[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.