

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.032

秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响

李 荣 侯贤清 吴鹏年 李培富 王西娜
(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为揭示宁夏扬黄灌区秸秆还田配施氮肥对土壤性状与玉米水分利用效率的影响,在秸秆全量还田(9 000 kg/hm²)条件下,设置4种不同纯氮施用水平:SR + N0(0 kg/hm²)、SR + N1(150 kg/hm²)、SR + N2(300 kg/hm²)和SR + N3(450 kg/hm²),以秸秆不还田施氮量333 kg/hm²为对照(CK),研究秸秆还田配施氮肥对土壤容重、含水率、养分含量、玉米产量及水分利用效率的影响。结果表明,秸秆还田配施氮肥可改善耕层(0~40 cm)土壤容重和孔隙状况,以SR + N2和SR + N3处理效果最优,耕层平均土壤容重分别较CK降低8.0%和8.8%,土壤总孔隙度分别较CK提高11.4%和12.5%。秸秆还田配施氮肥有利于提高耕层土壤有机碳和全氮含量,随施氮量的增加土壤碳氮比降低,其中以SR + N2和SR + N3处理效果最优。SR + N2处理改善土壤肥力效果最优,其土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量分别较CK提高33.6%、47.0%、30.8%。SR + N2处理在玉米生育中后期具有较好的蓄水保墒效应,玉米增产和改善水分利用效率效果最优,两年平均玉米籽粒产量和水分利用效率分别较CK提高33.9%、26.2%。通过两年研究发现,在宁夏扬黄灌区,秸秆还田配施氮肥可有效改善土壤物理性质、增加土壤养分含量、调节土壤碳氮比、增强土壤的蓄水保墒能力,从而显著提高玉米籽粒产量和水分利用效率,以秸秆还田配施纯氮300 kg/hm²效果最优。

关键词: 秸秆还田; 氮肥; 土壤容重; 土壤水分; 土壤养分; 玉米水分利用效率

中图分类号: S147.2; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0289-10

Effect of Straw Returning with Nitrogen Application on Soil Properties and Water Use Efficiency

LI Rong HOU Xianqing WU Pengnian LI Peifu WANG Xi'na
(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to define the effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency of maize in Yanghuang Irrigation Area of Ningxia, the treatment with uncovered straw and nitrogen application rate of 333 kg/hm² was taken as the control (CK), the effects of different nitrogen application rates of SR + N0 (0 kg/hm²), SR + N1 (150 kg/hm²), SR + N2 (300 kg/hm²) and SR + N3 (450 kg/hm²) on soil bulk density, water, nutrient, maize grain yield and water use efficiency were investigated. The results showed that the straw returning with nitrogen application could improve soil bulk density and total porosity in tilth soil (0~40 cm), and the SR + N2 and SR + N3 treatments were the best. The mean tilth soil bulk densities with SR + N2 and SR + N3 were significantly increased by 8.0% and 8.8%, the mean total soil porosities were significantly increased by 11.4% and 12.5%, compared with CK. Straw returning with nitrogen application was useful for increasing soil organic carbon and total nitrogen at 0~40 cm soil layer, and the contents of soil organic carbon, total nitrogen with SR + N2 and SR + N3 were significantly increased, compared with CK. The ration of carbon to nitrogen was decreased with the increase of application rate of nitrogen under the condition of straw returning. The enhancement of soil fertility was the highest at SR + N2, with significant increase of the contents of soil alkeline-N, available P, and available K by 33.6%, 47.0% and 30.8%, respectively.

收稿日期: 2019-02-19 修回日期: 2019-04-12

基金项目: 宁夏青年科技人才托举工程(科协发组字[2017]76号)、国家自然科学基金项目(31760370、31860362)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05-03)

作者简介: 李荣(1984—),女,副教授,主要从事土壤培肥研究,E-mail: lirong_mail@126.com

通信作者: 侯贤清(1981—),男,副教授,主要从事农田水肥高效利用研究,E-mail: houxianqing1981@126.com

The SR + N2 treatment had better soil moisture conservation effect at middle and later growing stage of maize, and it also achieved the higher maize grain yield and water use efficiency improvement. The two-year mean maize grain yield and water use efficiency with SR + N2 were significantly increased by 33.9% and 26.2%, respectively, compared with CK. Through the two-year results it was found that straw returning with application of nitrogen can not only effectively improve soil physical properties, but also significantly increase the soil nutrient contents, regulate the ration of carbon to nitrogen, and showed the better soil water conservation ability, therefore significantly increased crop yield and water use efficiency in Yanghuang Irrigation Area of Ningxia. The straw returning with application of pure nitrogen for 300 kg/hm² was the best.

Key words: straw returning; nitrogen fertilizer; soil bulk density; soil water; soil nutrient; water use efficiency of maize

0 引言

我国秸秆资源丰富,年产量约 7.9 亿 t,约占世界的 39.5%。除部分用作燃料、造纸、饲料外,大部分秸秆被焚烧^[1-2]。随着化肥用量增长,厩肥、绿肥量大幅降低,秸秆已成为重要的有机肥源之一^[3],作为农业生产中重要的培肥措施,秸秆还田不仅可杜绝秸秆焚烧现象,减少环境污染,还可改善土壤孔隙结构和理化性质,达到提高土壤保水保肥性能、增加作物产量的目的^[4],其综合利用对稳定农业生态平衡、促进农民增产增收、缓解能源与环境压力具有重要作用^[5]。因此,充分利用现有秸秆资源是当前亟待解决的重要问题。

近年来,围绕秸秆还田对农田土壤理化特性及作物响应机理相关研究已成为国内外学者普遍关注的热点^[6-10]。秸秆与化肥配施具有培肥改土作用,可改善土壤物理结构,增强土壤蓄水保墒的能力,减少水分蒸发,提高作物的水分利用效率^[11-14]。白伟等^[15]研究表明,秸秆还田配施氮肥可显著提高土壤含水率,降低土壤容重,调节土壤三相比。张亮^[16]研究也表明,秸秆还田配施氮肥的作物水分利用效率明显高于不施氮肥处理,秸秆还田配施氮肥量(纯 N)225 kg/hm²的水分利用效率最高。在现阶段农业生产中为追求作物高产,氮肥施用量越来越大,不仅增加了生产成本,还造成土壤污染^[17]。因而如何将氮肥施用量和秸秆还田措施有机结合,更好地促进农业生产的发展,是目前值得研究的重要课题。

在不同土壤类型及气候条件下,不同秸秆还田方式结合施肥措施对土壤物理性质变化及作物产量和水分利用效率的影响并不相同^[18]。宁夏扬黄灌区是宁夏重要的玉米产区,地处中温带干旱区,降雨较少,土壤质地粘重、有机质含量偏低、养分匮乏,严重制约了作物的生长,从而导致该地区水分利用效率低下^[19]。该区长期以来一直依赖化学肥料,盲目施肥导致肥料的大量浪费和土壤质量下降^[20]。秸

秆还田配施氮肥作为一种有效的土壤快速培肥方式已在该区开始应用^[21],然而由于秸秆还田后的氮肥用量及还田周期不同,其对秸秆还田后土壤物理性质、玉米产量及水分利用效率的影响效果亦不相同^[8,14-15,18]。目前,秸秆还田配施氮肥对作物产量和土壤肥力等方面的研究已有诸多报道,然而秸秆还田配施氮肥不同用量对宁夏扬黄灌区土壤物理性质、玉米产量及水分利用效率的研究却鲜见报道。为此,本研究针对宁夏扬黄灌区干旱少雨、土壤结构差、水分利用效率低等问题,通过补灌和秸秆还田配施不同用量的氮肥,研究其对土壤容重、含水率及春玉米产量和水分利用效率的影响,以期为该区秸秆还田配施适量氮肥和玉米高产及水分高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本试验于 2016 年 4 月至 2017 年 10 月在宁夏旱作节水高效农业科技园进行。该园区位于宁夏回族自治区同心县王团镇(36°51'N, 105°59' E),属中温带干旱大陆性气候,海拔约 1 200 m,干旱少雨,年降水量 150 ~ 300 mm,年际变率大,无霜期 120 ~ 218 d,年平均气温 8.6℃,水分蒸发强烈。2016 年玉米生育期(4—9 月)降水量为 146.4 mm,2017 年玉米生育期降水量为 297.2 mm(表 1)。试验地土壤质地为砂壤土,0 ~ 40 cm 层土壤有机质质量比为 8.2 g/kg,碱解氮质量比 38.3 mg/kg,有效磷质量比 16.1 mg/kg,速效钾质量比 198.0 mg/kg,pH 值 8.4,属低等肥力水平。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,在玉米秸秆全量还田(9 000 kg/hm²)条件下,设 4 种纯氮配施水平:SR + N0(0 kg/hm²),SR + N1(150 kg/hm²),SR + N2(300 kg/hm²),SR + N3(450 kg/hm²),以秸秆不还田施氮量 333 kg/hm²为对照(CK),5 个处理,每个

表1 玉米不同生育阶段降水、灌水和追肥情况

Tab.1 Precipitation, irrigation and top-dressing status during growing stage of maize

生育时期	2016 年			2017 年		
	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	降水量/mm	追肥量(N)/(kg·hm ⁻²)	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	降水量/mm	追肥量(N)/(kg·hm ⁻²)
生育前期	1 200	66.4	90	1 500	80.2	90
生育中期	1 800	34.3	60	1 800	184.1	60
生育后期	1 500	45.7		975	32.9	
合计	4 500	146.4	150	4 275	297.2	150

处理3个重复,共15个小区,小区面积为49 m² (7 m×7 m)。纯氮配施水平设置依据:参考国内外相关文献并结合宁夏中部干旱区当地春玉米最佳纯氮施用水平多在225 kg/hm²左右,由于在秸秆直接还田时通常配施一定量无机氮肥,以补充土壤速效氮的不足,因此设计纯氮中间施用量为300 kg/hm²,为探讨不同施氮量下土壤物理性质变化及对玉米产量和水分利用效率的影响,设置中间量减半处理(150 kg/hm²)和中间量加半处理(450 kg/hm²),对照为秸秆不还田施氮量333 kg/hm²,其中225 kg/hm²为最佳施氮量,108 kg/hm²为还田秸秆带入的氮素。

试验所用玉米秸秆有机养分含量(质量比)分别为有机碳705.8 g/kg、全氮12.0 g/kg、全磷2.6 g/kg、全钾12.7 g/kg。试验处理具体操作如下:将前一年收获后的玉米秸秆切碎成3~5 cm小段,在2016年试验处理前将基肥纯牛粪(有机养分含量(质量比)分别为有机碳769.2 g/kg、全氮23.0 g/kg、全磷16.3 g/kg、全钾22.4 g/kg)1.0 t/hm²、磷酸二铵(总养分(N+P₂O₅)质量分数大于等于64.0%,总氮(N)质量分数大于等于18.0%,有效磷(P₂O₅)质量分数大于等于46.0%)150 kg/hm²撒在地表,与秸秆一起翻入土壤。各处理均按秸秆全量(9 000 kg/hm²)进行翻压还田(翻压深度20 cm),同时在施氮肥处理中分别施入4种不同纯氮用量(尿素N质量分数大于等于46%)。2017年玉米收获后,将基肥磷酸二铵150 kg/hm²撒在地表,与秸秆一起翻入土壤。各处理均按秸秆全量(9 000 kg/hm²)进行人工翻压还田,同时在施氮肥处理中分别施入4种不同纯氮用量。对照处理为秸秆不还田,施氮量为纯氮333 kg/hm²,进行人工翻入土壤。

玉米供试品种为当地常规品种先玉335,分别于2016年5月8日和2017年4月11日播种,2016年9月30日和2017年10月6日收获。玉米采用鸭嘴式点播器人工点播,种子播深5~10 cm,宽窄行种植,宽行距70 cm,窄行距40 cm,株距为20 cm,种植密度为90 955株/hm²。试验期间利用自动降雨监测系统对降水量进行监测。玉米生育时期灌水量、降水量及追施纯氮量如表1所示,2016年玉米

生育期灌溉方式为畦灌,每个生育阶段隔20 d以相同灌水量分3次灌入,采用人工追肥;2017年灌溉方式为滴灌,每个生育阶段隔20 d以相同灌水量分3次灌入,水肥一体化进行追肥,生育期间进行人工除草。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 基本指标

土壤容重:2016年4月中旬试验处理前及2017年10月玉米收获后,按0~20 cm和20~40 cm用环刀取样,采用环刀法测定各土层土壤容重,并计算土壤总孔隙度。

土壤含水率:在玉米播种期、苗期、拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、成熟期及收获期,采用土钻取土干燥法测定0~100 cm层土壤质量含水率(%),每20 cm层取一土样,并结合降水量和灌水量,计算作物耗水量(mm)。

土壤养分含量:2016年4月中旬试验处理前及2016年和2017年玉米收获期后,每个处理选取3点,每20 cm采1个样,测定0~40 cm土层平均土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量。土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别采用重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法、碱解扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定。

玉米产量:玉米收获期,每个处理选取3点,每点收获3 m双行果穗,脱粒,干燥,称量。籽粒产量以14%含水率计算。

1.3.2 相关指标的计算方法

土壤总孔隙度计算公式为

$$K = (1 - \gamma / 2.65) \times 100\%$$
 (1)

式中 γ ——土壤容重,g/cm³

土壤蓄水量为

$$W = 10ha$$
 (2)

式中 h ——土层深度,cm

a ——土壤质量含水率, %

采用水量平衡法计算作物全生育期内总耗水量,公式为

$$P + I = ET + D - \Delta W + R$$
 (3)

式中 P ——玉米生育期降水量,mm

I ——生育期灌水量,mm
 ET ——玉米全生育期内总耗水量,mm
 D ——地下水的补给量和渗漏量,mm
 ΔW ——玉米播种期和收获期土壤蓄水量之差,mm
 R ——地表径流量,mm

由于本试验地地下水埋深较深(大于 25 m),地下水补给量和渗漏量(D)设为 0 mm,并且由于处理间有 50 cm 的田埂拦截,故不考虑地表径流(R)。故作物耗水量的计算公式可简写为

$$ET = P + I + \Delta W \tag{4}$$

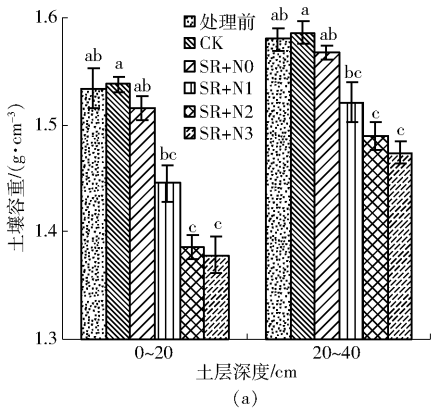
作物水分利用效率以作物经济产量与耗水量的比值表示,即

$$WUE = Y/ET \tag{5}$$

式中 Y ——玉米籽粒产量,kg/hm²

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2003 制图,SAS 8.0 进行方差分析,并用 LSD 法($P < 0.05$)进行多重比较。



2 结果与分析

2.1 对耕层土壤容重与孔隙性状的影响

土壤容重是反映土壤紧实程度的重要指标之一,秸秆还田配施氮肥对玉米收获期土壤容重有显著影响(图 1a,图中同一土层下不同小写字母表示不同处理差异达显著水平($P < 0.05$))。试验处理前,土壤质地比较黏重(0~40 cm 土层平均土壤容重为 1.56 g/cm³),经过两年玉米秸秆还田后,各处理耕层(0~40 cm)土壤容重随土壤深度增加而增加,各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤容重由大到小均依次为 CK、SR+N0、SR+N1、SR+N2、SR+N3。与试验处理前相比,不同氮肥用量均降低了耕层土壤容重,降幅达 1.0%~8.4%,而对照处理略有增加。0~20 cm 土层,SR+N2 和 SR+N3 处理的土壤容重比 CK 分别显著降低 9.8% 和 10.4%;20~40 cm 土层,分别显著降低 6.1% 和 7.1%;0~40 cm 分别显著降低 8.0% 和 8.8%。而

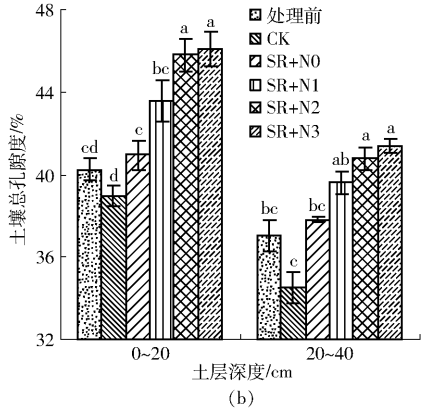


图 1 秸秆还田配施氮肥下 0~40 cm 土层土壤容重和总孔隙度

Fig. 1 Soil bulk density and soil porosity in 0~40 cm soil depth under straw returning with N application

SR+N0 处理耕层土壤容重与 CK 无显著差异。这表明,秸秆还田配施氮肥后土壤容重较不施氮肥处理均降低,其中中量和高量氮肥处理降幅最为显著。

秸秆还田可降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,各处理耕层土壤总孔隙度与土壤容重变化趋势相反,秸秆还田配施中量与高量氮肥处理显著高于秸秆还田不施氮肥和秸秆不还田处理(图 1b)。各处理耕层土壤总孔隙度在 34.5%~46.1% 之间,秸秆还田配施氮肥各处理较试验处理前提高 6.8%~12.0%。SR+N2 和 SR+N3 处理均显著高于 CK,而 SR+N0 处理与 CK 相比差异不显著。随施氮量的增加,不同氮肥用量各处理土壤总孔隙度逐渐增加,其中中量氮肥和高量氮肥处理最为显著,SR+N2 和 SR+N3 处理耕层平均土壤总孔隙度分别较 CK 显著提高 11.4% 和 12.5%。可见,秸秆还田配施氮肥后能有效改善土壤的通气能力,使土壤的孔

隙状况得到显著改善。

2.2 对玉米生育期 0~100 cm 层土壤含水率的影响

土壤含水率的变化是评价不同处理对土壤物理环境影响的重要指标。玉米主要生育阶段各处理 0~100 cm 层土壤含水率如图 2 所示。玉米生育前期(苗期—拔节期),2016 年各处理土壤含水率随土层的加深呈增加趋势,但处理间差异不显著(图 2a),而 2017 年各处理土壤含水率随土层的加深有所下降,SR+N1、SR+N2、SR+N3 处理 0~100 cm 层平均土壤含水率低于 CK 处理 6.9%~10.7%(图 2d)。生育中期(小喇叭口期—吐丝期),由于玉米生长对土壤水分消耗较大,且该阶段降水量较少,两年研究期间各处理土壤含水率均明显降低(图 2b、2e)。在 0~100 cm 土层,SR+N2 和 SR+N3 处理平均土壤含水率显著高于 SR+N0、SR+N1 和 CK 处理,其中较 CK 分别提高 25.6% 和 20.9%。SR+N1 处理 0~

100 cm 土层平均土壤含水率在 2016 年与 CK 处理无差异,而 2017 年显著高出 CK 处理 25.3%。

玉米生育后期(灌浆期—成熟期),随着作物耗水量的减少,降水量增多,0~100 cm 层土壤含水率得到恢复(图 2c、2f)。2016 年各处理 0~60 cm 层土壤含水率无明显变化,60~100 cm 层土壤含水率有所回升(图 2c)。2017 年各处理 0~40 cm 层土壤

含水率无明显变化,40~100 cm 层土壤含水率逐渐下降(图 2f)。两年秸秆还田配施氮肥处理 0~100 cm 层土壤含水率均高于对照,但处理间无显著差异。可见,在玉米生育前期,秸秆还田配施氮肥处理与对照相比无显著差异,而在中后期 SR+N2 处理保蓄 0~100 cm 层土壤水分的效果最佳,SR+N1 和 SR+N3 处理次之。

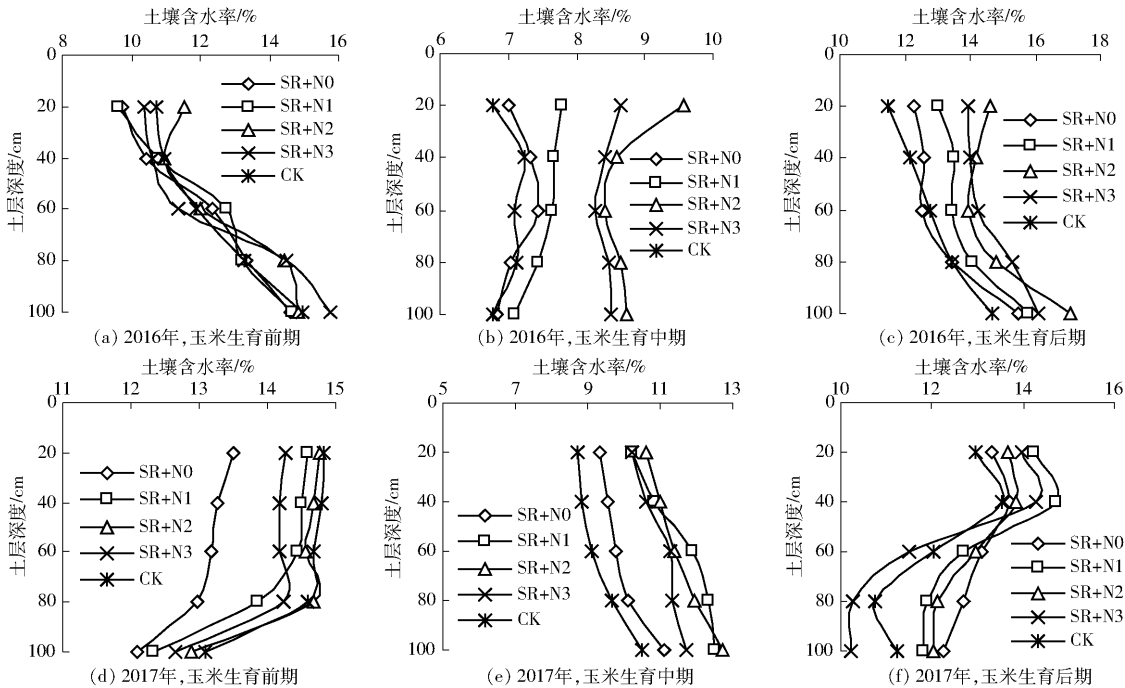


图2 秸秆还田配施氮肥下 0~100 cm 土层剖面土壤含水率变化曲线
Fig.2 Soil water content in 0~100 cm soil profile under straw returning with N application

2.3 对耕层土壤肥力的影响

秸秆还田增施氮肥可增加耕层(0~40 cm)有机碳和全氮含量,与试验处理前相比,两年玉米收获期各处理土壤有机碳和全氮含量均明显增加,增幅为 3.1%~16.7%(表 2)。2016 年 SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理土壤有机碳含量分别较 CK 显著增加 10.7%、17.8% 和 12.1%,而施氮处理间,SR+N0 与 CK 无显著差异。2017 年土壤有机碳含量随施氮量的增加而增加,SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理土壤有机碳含量分别较 CK 显著增加 11.7%、17.5% 和 18.8%,而 SR+N2 与 SR+N3、SR+N0 与 CK 均无显著差异。两年研究期间,秸秆还田条件下耕层土壤全氮含量均随施氮量的增加而增加,以 SR+N3 处理最高,施氮各处理均显著高于 CK 处理,但 SR+N2 与 SR+N3、SR+N0 与 CK 处理间差异均不显著。SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理平均土壤全氮含量分别较 CK 显著提高 25.9%、38.1% 和 43.0%。秸秆还田配施氮肥可调节土壤碳氮比(表 2)。与处理前相比,两年玉米收获期各处理耕层土壤碳氮比均显著降低,降幅为 8.1%~

26.6%。两年玉米收获期土壤碳氮比随施氮量的增加而降低,不同施氮量处理间,SR+N0 与 CK 处理间差异均不显著,但均显著低于 CK 处理。SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理 2016 年较 CK 处理分别降低 12.7%、16.3% 和 21.8%,2017 年分别降低 10.7%、13.5% 和 16.6%。

秸秆还田配施氮肥可有效增加 0~40 cm 层土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量。两年玉米收获后,秸秆还田配施不同氮肥用量各处理土壤速效养分含量均高于处理前(表 2)。玉米收获期土壤碱解氮含量 2016 年以 SR+N2 处理最高,2017 年以 SR+N3 处理最高,SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理两年平均分别较 CK 显著增加 22.3%、33.6 和 36.1%,而 SR+N0 处理与 CK 差异不显著。2016 年各处理(除 SR+N0 外)土壤有效磷含量均显著高于对照,以 SR+N1 处理增幅最大,其次为 SR+N2 和 SR+N3 处理,而 2017 年各处理土壤有效磷含量随施氮量的增加而增加,以 SR+N3 处理增幅最大。SR+N1、SR+N2 和 SR+N3 处理两年平均分别较 CK 显著提高 38.9%、47.0% 和 46.0%,但 SR+N0 处理

表 2 秸秆还田配施氮肥对 0 ~ 40 cm 耕层土壤肥力的影响

Tab.2 Effects of straw returning with nitrogen fertilization on soil fertility in 0 ~ 40 cm tilth

年份	处理	有机碳质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
2016	处理前	(4.54 ± 0.23) ^c	(0.403 ± 0.02) ^c	(11.26 ± 0.94) ^a	(27.13 ± 2.13) ^c	(11.45 ± 0.21) ^b	(116.67 ± 4.62) ^c
	SR + N0	(4.58 ± 0.16) ^c	(0.443 ± 0.03) ^c	(10.34 ± 0.58) ^b	(34.13 ± 1.02) ^{bc}	(12.68 ± 0.30) ^b	(138.75 ± 3.88) ^b
	SR + N1	(4.86 ± 0.45) ^b	(0.526 ± 0.06) ^b	(9.24 ± 0.67) ^c	(37.63 ± 1.64) ^{ab}	(15.83 ± 0.42) ^a	(162.50 ± 5.92) ^a
	SR + N2	(5.17 ± 0.28) ^a	(0.583 ± 0.02) ^a	(8.86 ± 0.42) ^{cd}	(39.20 ± 0.96) ^a	(15.29 ± 0.35) ^a	(175.12 ± 3.45) ^a
	SR + N3	(4.92 ± 0.42) ^{ab}	(0.595 ± 0.10) ^a	(8.27 ± 0.53) ^d	(37.36 ± 1.35) ^{ab}	(14.21 ± 0.28) ^a	(162.50 ± 4.26) ^a
	CK	(4.39 ± 0.37) ^c	(0.415 ± 0.08) ^c	(10.58 ± 0.53) ^{ab}	(30.72 ± 2.71) ^c	(10.42 ± 0.29) ^b	(100.05 ± 3.74) ^d
2017	SR + N0	(4.61 ± 0.20) ^{bc}	(0.455 ± 0.06) ^c	(10.12 ± 0.35) ^a	(13.83 ± 1.43) ^b	(12.97 ± 1.45) ^{bc}	(128.38 ± 3.46) ^b
	SR + N1	(4.98 ± 0.32) ^{ab}	(0.549 ± 0.02) ^b	(9.07 ± 0.84) ^b	(17.50 ± 1.93) ^b	(13.59 ± 1.06) ^b	(149.45 ± 3.85) ^a
	SR + N2	(5.24 ± 0.16) ^a	(0.596 ± 0.12) ^{ab}	(8.79 ± 0.77) ^b	(21.02 ± 2.47) ^a	(15.84 ± 1.31) ^a	(127.33 ± 4.03) ^b
	SR + N3	(5.30 ± 0.41) ^a	(0.626 ± 0.05) ^a	(8.47 ± 0.54) ^b	(23.98 ± 2.03) ^a	(16.71 ± 0.59) ^a	(100.99 ± 0.85) ^c
	CK	(4.46 ± 0.38) ^c	(0.439 ± 0.09) ^c	(10.16 ± 0.46) ^a	(14.35 ± 1.44) ^b	(10.76 ± 1.14) ^c	(97.33 ± 5.51) ^c

注:同列不同小写字母表示不同处理下差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

与 CK 差异不显著。2016 年各处理对土壤速效钾含量提升效果显著,SR + N0、SR + N1、SR + N2 和 SR + N3 处理分别较 CK 显著提高 38.7%、62.4%、75.0% 和 62.4%。2017 年 SR + N0、SR + N1、SR + N2 处理分别较 CK 处理显著提高 31.9%、53.5% 和 30.8%,而 SR + N3 处理与 CK 差异不显著。由此可见,秸秆还田配施氮肥可显著增加土壤 0 ~ 40 cm 耕层土壤养分,从而改善土壤的肥力。

2.4 对玉米籽粒产量和水分利用效率的影响

秸秆还田配施不同氮肥用量对作物产量、耗水

量和水分利用效率的影响不同。由表 3 可知,秸秆还田配施氮肥能显著提高玉米的籽粒产量。2016 年各处理玉米籽粒产量由高到低依次为 SR + N2、SR + N3、SR + N1、SR + N0、CK,增产效果以 SR + N2 处理最为显著,其次为 SR + N3 处理,分别较 CK(秸秆不还田处理)增加 36.6%、21.8%;2017 年各处理玉米籽粒产量由高到低依次为 SR + N2、SR + N1、SR + N3、SR + N0、CK,增产效果以 SR + N2 处理最为显著,其次为 SR + N1 处理,分别较 CK 显著增加 31.1%、26.8%。研究期间,SR + N2 处理两年平均玉米籽粒产量较 CK 显著增加 33.9%。

表 3 秸秆还田配施氮肥措施下玉米籽粒产量和水分利用效率

Tab.3 Grain yield and water use efficiency of maize under straw returning with nitrogen application

年份	处理	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	耗水量/mm	水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2016	SR + N0	(12 546.0 ± 458.6) ^{bc}	(564.7 ± 16.4) ^b	(22.2 ± 1.6) ^b
	SR + N1	(13 230.0 ± 570.2) ^b	(567.9 ± 14.8) ^b	(23.3 ± 2.2) ^b
	SR + N2	(16 578.0 ± 642.1) ^a	(586.7 ± 18.2) ^a	(28.3 ± 3.7) ^a
	SR + N3	(15 525.0 ± 586.9) ^a	(583.9 ± 10.6) ^a	(26.6 ± 2.5) ^a
	CK	(12 136.5 ± 458.6) ^c	(530.8 ± 15.2) ^c	(22.9 ± 3.0) ^b
2017	SR + N0	(11 906.3 ± 476.9) ^{bc}	(729.0 ± 26.5) ^a	(16.3 ± 3.4) ^{bc}
	SR + N1	(13 993.3 ± 418.9) ^{ab}	(723.1 ± 36.1) ^a	(19.4 ± 2.0) ^{ab}
	SR + N2	(14 461.7 ± 440.5) ^a	(727.3 ± 24.8) ^a	(19.9 ± 1.5) ^a
	SR + N3	(13 123.3 ± 525.4) ^{ab}	(721.4 ± 33.6) ^a	(18.2 ± 2.2) ^{ab}
	CK	(11 031.7 ± 507.9) ^c	(719.2 ± 30.9) ^a	(15.3 ± 2.8) ^c

2016 年灌水量(畦灌方式,4 500 m³/hm²)略高于 2017 年(滴灌方式,4 275 m³/hm²),然而 2017 年玉米生育期降水量(297.2 mm)是 2016 年(146.4 mm)两倍多,2017 年作物耗水量明显高于 2016 年,而两年玉米籽粒产量各处理年际间差异不明显,因而 2016 年玉米水分利用效率明显高于 2017 年(表 3)。2016 年秸秆还田配施氮肥各处理下作物耗水量较对照显著增加,其中 SR + N1、SR + N2 和 SR + N3 处

理作物耗水量分别较 CK 显著增加 7.0%、10.5% 和 10.0%;2017 年各处理间作物耗水量无显著差异。2016 年 SR + N2 处理玉米水分利用效率较 CK 显著提高 23.6%,SR + N3 处理较 CK 显著提高 16.2%,而 SR + N1、SR + N0 处理与 CK 差异不显著;2017 年 SR + N1、SR + N2 和 SR + N3 处理水分利用效率分别较 CK 显著提高 26.8%、30.1% 和 19.0%,而 SR + N0 处理与 CK 无显著差异。可见,两年玉米水

分利用效率均以 SR + N₂ 处理最高, 平均较 CK 显著增加 26.2%。

3 讨论

3.1 秸秆还田配施氮肥对土壤容重及孔隙度的影响

众多研究结果表明, 秸秆还田与施氮量对土壤容重和孔隙度有显著影响^[22-23]。在深翻秸秆还田的基础上, 还田量为 9 000 kg/hm² 和配施氮肥 225 kg/hm² 可显著降低土壤容重, 调节土壤三相^[15]。稻麦轮作区实施全量秸秆还田配施氮磷钾肥能够降低土壤容重, 增大土壤总孔隙度和大孔隙度, 改善水稻土的物理结构^[24]。本研究也表明, 秸秆还田施用氮肥后土壤容重均较不施氮肥和秸秆不还田处理显著降低, 改善了土壤总孔隙度, 以中高量氮肥处理较秸秆不还田处理最为显著。其主要原因是: 秸秆深翻还田(深度为 20 cm)能有效打破犁底层^[23], 同时通过配施不同氮肥用量可影响秸秆腐解效果, 在微生物和酶的共同作用下持续向土壤中提供大量有机物质, 分解物与土壤颗粒结合形成稳定疏松的团粒结构, 从而改善土壤的紧实程度, 进而使耕层土壤容重降低, 改善了土壤孔隙度的空间分布^[25-26]。然而, 中氮肥的基础上增加施氮量不利于土壤物理性质的改善, 这是由于高氮肥投入导致土壤环境恶化^[27], 结果造成土壤容重增加, 孔隙度降低。本研究还发现, 秸秆还田条件下不施氮肥会增加土壤容重, 分析其原因可能是作物秸秆腐熟过程需要消耗土壤中大量养分^[28], 从而导致土壤质地黏重, 土壤孔隙度变小, 最终使土壤容重增大。

3.2 秸秆还田配施氮肥对土壤水肥效应的影响

在秸秆还田基础上施肥可增强土壤的蓄水能力, 提高土壤含水率^[29]。在玉米秸秆还田后, 玉米生育前期会表现出秸秆与作物争夺水分现象, 土壤贮水量低于秸秆不还田处理, 而后期则增强土壤的贮水能力^[30]。同时, 秸秆还田结合施氮具有保水缓温作用^[31]。本研究发现, 在玉米生育前期各处理间差异不显著, 秸秆还田配施氮肥处理在玉米生育中后期对保蓄土壤水分效果显著, 这是由于秸秆还田后对土壤水分的影响具有双重性: 初期秸秆腐解过程消耗大量水分, 产生与作物争夺水分的现象; 中后期腐解过程结束后, 秸秆还田配施氮肥改善土壤的物理性状, 增强土壤的保蓄水分能力, 因而有利于土壤含水率的增加^[32]。本研究还发现, 玉米生育中后期低氮肥(SR + N₁、SR + N₂)比高氮肥处理(SR + N₃)土壤含水率高, SR + N₀ 处理保水效果则低于 CK, 可能由于中期高氮肥处理植株长势较好, 植株蒸腾耗水大导致土壤含水率降低^[33], 而 SR + N₀ 处

理下秸秆不腐熟或腐熟不完全使土壤保水能力降低。

秸秆还田配施氮肥措施有利于土壤有机碳的积累, 同时还可提高土壤氮素的供应能力^[21]。张静^[34]研究认为, 秸秆全量还田(9 000 kg/hm²)配施 600 kg/hm² 的氮肥量对土壤碳氮的固持和供给效果较好, 且可调控土壤碳氮比, 增强土壤微生物固定碳氮的能力。汪军等^[35]也发现, 秸秆还田和氮肥配施可显著提高土壤有机质和全氮含量。本研究结果表明, 秸秆还田配施氮肥能有效提高土壤有机碳、全氮含量, 其中以秸秆还田配施 300、450 kg/hm² 氮肥处理表现最佳。分析其原因是由于秸秆还田后施入无机氮, 会改善土壤氮素的供给水平, 使土壤碳氮比降低, 更有利于促进微生物的增殖及分解更多的有机质, 进而增加土壤有机质中碳的分解与释放及土壤全氮的含量^[10]。有研究表明, 秸秆还田后配施一定量的氮肥, 在保证土壤肥力逐年提升的同时, 又可提高土壤速效养分含量^[36]。本研究认为, 秸秆还田配施氮肥能提高耕层土壤速效养分含量。分析其原因: ①碳氮比高的秸秆还田后会激发土壤氮的矿化, 增加土壤碱解氮的含量^[37]。②秸秆还田增施氮肥后由于改善土壤的物理环境, 进而促进玉米秸秆的腐解, 增加了土壤的有机物质, 同时可降低速效养分的淋溶, 提高土壤对氮磷钾元素的吸附力, 从而弥补秸秆降解过程中土壤微生物对养分的固持^[38]。

3.3 秸秆还田配施氮肥对玉米产量及水分利用效率的影响

由于区域生态环境的不同, 关于秸秆还田方式、还田量、还田周期、氮肥配施用量方面的研究, 不同学者存在不同的研究结论。高金虎等^[33]在辽西风沙半干旱区的研究发现, 秸秆还田配施氮肥对提高玉米水分利用效率以秸秆还田量 6 000 ~ 9 000 kg/hm² 配施纯氮 420 kg/hm² 效果最佳。余坤等^[39]研究表明, 在关中灌区实施粉碎氨化秸秆连续两年还田后能显著提高冬小麦产量和水分利用效率。张亮等^[40]研究认为, 玉米秸秆还田能提高关中平原冬小麦产量和水分利用率, 秸秆全量还田(4 500 kg/hm²)冬小麦氮肥用量应控制在 175 ~ 262.5 kg/hm²。本研究结果表明, 在宁夏扬黄灌区, 秸秆粉碎全量还田(9 000 kg/hm²), 配施中量氮肥(300 kg/hm²)能显著提高玉米产量和水分利用效率, 同时高于低氮肥处理和高氮肥处理。主要原因为: ①秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm² 后, 可改善土壤微环境(土壤孔隙度、土壤水分、养分等), 使微生物及酶活性显著提高, 从而加速秸秆的腐解和土壤有机质养分的分解利用, 改善土壤的水肥状况, 促进作物的生长发育,

最终使玉米产量和水分利用效率显著提高^[32]。
②秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm²能够更好地调节土壤中的碳氮比,使作物充分利用土壤氮素,从而提高作物的水分利用效率^[13]。本研究还发现,2016 年灌水量(4 500 m³/hm²)略高于 2017 年(4 275 m³/hm²),但 2017 年玉米生育期降水量(297.2 mm)是 2016 年(146.4 mm)两倍多,致使 2017 年作物耗水量明显高于 2016 年,而两年玉米籽粒产量各处理年际间差异不明显,因而导致 2016 年玉米水分利用效率明显高于 2017 年,这与以往研究^[41-42]结果不一致,还可能与年际降水量在玉米生育期的分布、土壤微生物变化规律及作物根系生长发育等有关^[15],这仍需要进一步深入探讨。

4 结论

(1) 秸秆还田配施氮肥能有效降低耕层土壤容

重、提高土壤总孔隙度,以秸秆还田配施纯氮 300、450 kg/hm²处理效果最为显著。秸秆还田配施氮肥处理对提高玉米生育中后期 0~100 cm 层土壤含水率效果显著,以秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm²土壤蓄水保墒效果较优。

(2) 秸秆还田配施氮肥能有效提高土壤有机碳、全氮含量,调节土壤碳氮比,随施氮量的增加,土壤碳氮比降低,其中以秸秆还田配施纯氮 300、450 kg/hm²处理表现较优。秸秆还田配施氮肥能提高耕层土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量,秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm²处理对土壤培肥效果最优。

(3) 秸秆还田配施氮肥可显著提高玉米籽粒产量和水分利用效率。与秸秆不还田 CK 处理相比,秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm²处理的玉米增产和改善作物水分利用效率的效果最优。

参 考 文 献

- [1] WEI T, ZHANG P, WANG K, et al. Effects of wheat straw incorporation on the availability of soil nutrients and enzyme activities in semiarid areas[J]. PLoS ONE, 2015, 10(4): e0120994.
- [2] ZHANG P, CHEN X L, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 160: 65–72.
- [3] BAKHT J, SHAFI M, JAN M T, et al. Influence of crop residue management: cropping system and N fertilizer on soil N and C dynamics and sustainable wheat (*Triticum aestivum* L.) production[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(2): 233–240.
- [4] BHATTACHARYYA R, PRAKASH V, KUNDU S, et al. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 132(1): 126–134.
- [5] 王金武, 唐汉, 王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 1–21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1–21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journalid=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [6] 刘艳慧, 王双磊, 李金埔, 等. 棉花秸秆还田对土壤速效养分及微生物特性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1037–1046. LIU Yanhui, WANG Shuanglei, LI Jinpu, et al. Effects of cotton straw returning on soil available nutrients and microbial characteristics[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1037–1046. (in Chinese)
- [7] WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153: 131–136.
- [8] 李录久, 吴萍萍, 耿言安, 等. 秸秆还田结合氮肥运筹管理对白土稻田土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1259–1266. LI Lujia, WU Pingping, GENG Yan'an, et al. Effect of wheat straw addition with nitrogen application on physical-chemical properties of white paddy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(5): 1259–1266. (in Chinese)
- [9] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95(1–2): 240–254.
- [10] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633–1642. LI Tao, HE Chun'e, GE Xiaoying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(12): 1633–1642. (in Chinese)
- [11] WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 11–17.
- [12] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540. WANG Shulan, WANG Hao, LI Juan, et al. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1530–1540. (in Chinese)
- [13] 韩瑞芸, 陈哲, 杨世琦. 秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 148–154.

- HAN Ruiyun, CHEN Zhe, YANG Shiqi. Effect of straw-returning on nitrogen and phosphorus and water of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 148 – 154. (in Chinese)
- [14] 程东娟, 王丽玄, 王利书, 等. 秸秆还田下基肥施用方式与肥量对土壤水分及玉米产量的影响[J]. 节水灌溉, 2018(10): 14 – 19.
- CHENG Dongjuan, WANG Lixuan, WANG Lishu, et al. Effects of application methods and amount of base fertilizer on soil moisture and maize yield under straw returning[J]. Water Saving Irrigation, 2018(10): 14 – 19. (in Chinese)
- [15] 白伟, 安景文, 张立祯, 等. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 168 – 176.
- BAI Wei, AN Jingwen, ZHANG Lizhen, et al. Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turnover plus nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 168 – 176. (in Chinese)
- [16] 张亮. 关中麦玉米轮作区施氮对秸秆还田小麦产量和秸秆养分释放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- ZHANG Liang. Effects of nitrogen fertilizer on yield of winter wheat and straw decomposition under maize straw returning in Guanzhong irrigation district[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [17] 李有兵, 李锦, 李硕, 等. 秸秆还田下减量施氮对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 79 – 84, 152.
- LI Youbing, LI Jin, LI Shuo, et al. Effects of reducing nitrogen application on crop yields, nutrients uptake and utilization with straw incorporation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 79 – 84, 152. (in Chinese)
- [18] 杨治平, 周怀平, 李红梅. 旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 49 – 52.
- YANG Zhiping, ZHOU Huaiping, LI Hongmei. Effect of autumn fertilization combined with returning stalks to field on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 49 – 52. (in Chinese)
- [19] 刘学军, 翟汝伟, 李真朴, 等. 宁夏扬黄灌区玉米滴灌水肥一体化灌溉施肥制度试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(9): 74 – 78.
- LIU Xuejun, ZHAI Ruwei, LI Zhenpu, et al. Experimental research on the application of integrated fertilizer and fertilizer system for maize drip irrigation in Ningxia yellow irrigation area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(9): 74 – 78. (in Chinese)
- [20] 侯贤清, 吴鹏年, 王艳丽, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤水肥状况和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1928 – 1934.
- HOU Xianqing, WU Pengnian, WANG Yanli, et al. Effects of returning straw with nitrogen application on soil water and nutrient status, and yield of maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1928 – 1934. (in Chinese)
- [21] 侯贤清, 李荣, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 238 – 246.
- HOU Xianqing, LI Rong, WU Pengnian, et al. Effects of straw returning with nitrogen application on soil carbon, nitrogen content and maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 238 – 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180928&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.028. (in Chinese)
- [22] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氨化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103 – 111.
- YU Kun, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 103 – 111. (in Chinese)
- [23] BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, et al. The combination of subsoil and the incorporation of corn stover affect physicochemical properties of soil and corn yield in semi-arid China[J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 2016, 98(5 – 6): 561 – 570.
- [24] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297 – 302.
- FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297 – 302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180434&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.034. (in Chinese)
- [25] 庞党伟, 陈金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1689 – 1699.
- PANG Dangwei, CHEN Jin, TANG Yuhai, et al. Effect of returning methods of maize straw and nitrogen treatments on soil physicochemical property and yield of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(11): 1689 – 1699. (in Chinese)
- [26] 张聪, 慕平, 尚建明. 长期持续秸秆还田对土壤理化特性、酶活性和产量性状的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 92 – 98.
- ZHANG Cong, MU Ping, SHANG Jianming. Effects of continuous returning corn straw on soil chemical properties, enzyme activities and yield trait[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 92 – 98. (in Chinese)
- [27] 丁雪丽, 何红波, 李小波, 等. 不同供氮水平对玉米秸秆降解初期碳素矿化及微生物量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 784 – 788.
- DING Xueli, HE Hongbo, LI Xiaobo, et al. Effect of nitrogen level on carbon mineralization and microbial biomass during initial decomposition of maize straw[J]. Chinese Journal Soil Science, 2008, 39(4): 784 – 788. (in Chinese)
- [28] 王旭东, 陈鲜妮, 王彩霞, 等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 252 – 257.
- WANG Xudong, CHEN Xianni, WANG Caixia, et al. Decomposition effect of corn straw under different fertility conditions in

- farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 252–257. (in Chinese)
- [29] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春玉米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 307–314.
ZHANG Yali, LÜ Jialong, JIN Jiyun, et al. Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(2): 307–314. (in Chinese)
- [30] 牛芬菊, 张雷, 李小燕, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米秸秆还田对玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 161–165.
NIU Fenju, ZHANG Lei, LI Xiaoyan, et al. Effect of stalk returning and plastic mulching on growth and yield of maize under ridge and furrow planting in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 161–165. (in Chinese)
- [31] 孙媛, 任广鑫, 冯永忠, 等. 秸秆还田和施氮对土壤水热因子及呼吸速率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 146–152.
SUN Yuan, REN Guangxin, FENG Yongzhong, et al. Comprehensive influence of straw-returning and nitrogen fertilization on hydrothermal factors and soil respiration[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(3): 146–152. (in Chinese)
- [32] 高飞, 崔增团, 孙淑梅, 等. 甘肃中东部旱区秸秆还田量对土壤水分、玉米生物性状及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 74–78.
GAO Fei, CUI Zengtuan, SUN Shumei, et al. Effects of straw returning on soil water, biological traits and yield of maize in the eastern arid region of Gansu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 74–78. (in Chinese)
- [33] 高金虎, 孙占祥, 冯良山, 等. 秸秆与氮肥配施对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 116–120.
GAO Jinhui, SUN Zhanxiang, FENG Liangshan, et al. Effect of corn straw plus nitrogen fertilizer on growth and water use efficiency of maize[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(11): 116–120. (in Chinese)
- [34] 张静. 秸秆还田与氮肥互作对接茬麦田土壤碳氮的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
ZHANG Jing. The effect of maize straw returning and nitrogen fertilizer interaction on soil C and N in continuing cultivated wheat field[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [35] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40–44.
WANG Jun, WANG Dejian, ZHANG Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 40–44. (in Chinese)
- [36] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4446–4456.
HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yilin, et al. Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2016, 37(11): 4446–4456. (in Chinese)
- [37] TOSTI G, BENINCASA P, FARNESELLI M, et al. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 136–146.
- [38] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 101–105.
HU Hongxiang, WANG Yufang, CHEN Zhu, et al. Effects of straw return with chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus leaching from yellow cinnamon soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 101–105. (in Chinese)
- [39] 余坤, 冯浩, 李正鹏, 等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 116–123.
YU Kun, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 116–123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141019&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.019. (in Chinese)
- [40] 张亮, 黄婷苗, 郑险峰, 等. 施氮对秸秆还田冬小麦产量和水分利用率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 41(1): 50–54.
ZHANG Liang, HUANG Tingmiao, ZHENG Xianfeng, et al. Effects of nitrogen fertilizer on yield and water use efficiency of winter wheat planted in the croplands with straw returning[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 41(1): 50–54. (in Chinese)
- [41] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1797–1807.
ZHAO Yali, GUO Haibin, XUE Zhiwei, et al. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1797–1807. (in Chinese)
- [42] 张哲, 孙占祥, 张燕卿, 等. 秸秆还田与氮肥配施对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 144–152.
ZHANG Zhe, SUN Zhanxiang, ZHANG Yanqing, et al. Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer on yield and water use efficiency of spring maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 144–152. (in Chinese)