

秸秆深埋配合减氮对旱塬春玉米水分利用的影响

张媛媛^{1,3}, 杨忠浩², 党廷辉^{1,2,3}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 提高土壤水分利用是黄土旱塬区农业可持续发展的重要目标。通过 4 年春玉米田间试验,研究秸秆深埋配合减氮对土壤剖面耗水 and 水分利用分布的影响,旨在为黄土高原旱作农业区水肥科学管理提供科学依据。试验于 2017 年 4 月至 2020 年 9 月在陕西长武中科院黄土高原农业生态试验站进行。试验设置 4 个处理:常量施氮(CON1, N250 kg/hm²),秸秆深埋配合常量施氮(CON2, N250 kg/hm² + 秸秆),减量施氮(CR1, N200 kg/hm²)和秸秆深埋配合减量施氮(CR2, N200 kg/hm² + 秸秆)。结果表明:(1)秸秆深埋处理提高春玉米产量 9.80%~10.43%;减量施氮至 200 kg/hm² 并不降低春玉米产量,配合秸秆深埋处理显著提高春玉米产量。(2)土壤耗水量波动主要发生在 100—200 cm 土层,0—100 cm 土层土壤耗水达到动态平衡;秸秆深埋显著降低土壤总耗水量($p < 0.05$),2017 年和 2019 年秸秆深埋处理土壤总耗水量降低 10.86, 20.31 mm。(3)试验 4 种处理水分利用效率为 CR2 > CON2 > CR1 > CON1,秸秆深埋配合减氮至 200 kg/hm² 水分利用效率最高,为 33.16 kg/(mm · hm²)。在黄土旱塬区,秸秆深埋配合减量施氮至 200 kg/hm² 是提高水分利用效率的有效措施。

关键词: 黄土旱塬; 秸秆深埋; 减量施氮; 春玉米; 水分利用

中图分类号:S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0340-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.01.043

Effects of Deep Straw Burial Combined with Nitrogen Reduction on Water Use of Spring Maize in Dryland

ZHANG Aiai^{1,3}, YANG Zhonghao², DANG Tinghui^{1,2,3}

(1.The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Improving soil water use is an important goal to the sustainable development of agriculture in the dry loess plateau area. Through a four-year spring corn field experiment, the effects of deep burial of straw combined with nitrogen reduction on soil profile water consumption and water use distribution were studied, in order to provide a scientific basis for scientific management of water and fertilizer in dry farming areas on the Loess Plateau. The experiment was conducted at the Loess Plateau Agro-ecological Experiment Station of the Chinese Academy of Sciences in Changwu, Shaanxi from April 2017 to September 2020. Four treatments were set up: Constant nitrogen application (CON1, N250 kg/hm²), deep straw burial combined with constant nitrogen application (CON2, N250 kg/hm² + straw), reduced nitrogen application (CR1, N200 kg/hm²) and deep straw burial combined with reduced amount of nitrogen (CR2, N200 kg/hm² + straw). The results showed that: (1) The treatment of deep burial of straw increased the yield of spring maize by 9.8%~10.43%. Reducing nitrogen application to 200 kg/hm² did not reduce the crop yield, in the contrary, combined with the deep burial of straw, it would increase the yield of spring maize. (2) The fluctuation of soil water consumption mainly occurred in the 100—200 cm soil layer, and the soil water consumption in the 0—100 cm soil layer reached a dynamic balance. The deep burial of straw significantly reduced the total soil water consumption ($p < 0.05$). The total water consumption of the treated soil decreased by 10.86 and 20.31 mm under the deep burial of straw in 2017 and 2019 respectively. (3) The 4-year experimental data showed

收稿日期:2022-05-13

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800105,2016YFC0501602)

第一作者:张媛媛(2000—),女,硕士研究生,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:zhangaiai0502@163.com

通信作者:党廷辉(1964—),男,研究员,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:dangth@ms.iswc.ac.cn

that the water use efficiency of the four treatments was $CR2 > CON2 > CR1 > CON1$, and the water use efficiency of deep burial of straw combined with reduced nitrogen application ($N200\text{ kg/hm}^2 + \text{straw}$) was the highest, which was $33.16\text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$. In the loess dryland area, deep burial of straw combined with reduced nitrogen application to 200 kg/hm^2 is an effective measure to improve water use efficiency.

Keywords: Loess dryland; straw deeply buried; reduced nitrogen application; spring maize; water use

黄土旱塬区气候干旱,蒸发强烈,降雨较少,地下水因埋藏较深而难以被作物吸收利用,影响作物生长发育,土壤水分已成为制约当地农业发展的重要因素^[1-2]。秸秆还田具有维持土壤水分,提高作物产量及水分利用的效果,是土壤蓄水保墒的有效途径^[3]。氮肥的适量施用提高作物产量,但过量施用并不能使作物增产,反而消耗大量土壤水分,降低水分利用效率^[4]。不同地区、不同秸秆还田方式和氮肥施用对作物产量和水分利用的影响并不相同。已有研究^[5-6]表明,秸秆覆盖还田较秸秆深埋还田有机物腐解较慢,与幼苗生长争夺水分,不利于植株的生长生育和干物质积累;黄毅等^[7]在辽西地区的研究表明,玉米秸秆深埋还田能增加玉米根系的扎根深度和伸展宽度,从而促进根系对水分和养分的吸收;曾莉等^[8]研究表明,秸秆还田配合氮肥施用可以提高土壤有机质含量,施用氮肥可以加速秸秆腐解,也增加土壤耗水,降低水分利用效率^[9];李荣等^[10]在宁夏黄灌区秸秆翻压还田配施纯氮 300 kg/hm^2 改善土壤物理性状和提高水分利用效果最佳。因此,如何更有效地利用秸秆还田方式及氮肥用量来提高黄土旱塬地区的水分利用是当前需要研究的重要课题。

有关秸秆深埋和施用氮肥对土壤性质和作物产量的研究在东北黑土区已有诸多报道^[11-12],但关于黄土旱塬区秸秆深埋及氮肥减量措施对土壤水分及剖面分布的研究还较少^[13-14]。因此,本研究通过玉米大田试验,以常量施氮 250 kg/hm^2 为对照,研究黄土旱塬秸秆深埋配合减量施氮措施对春玉米产量及土壤水分利用的影响,为旱作农田秸秆资源利用及提高水分利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验布设在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站($35^{\circ}12'N, 107^{\circ}40'E$),位于黄土高原南部长武塬的中塬上,塬面平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄盖黏黑垆土,属于典型的雨养农业区。土壤容重 1.3 g/cm^3 ,田间持水量 22.6% ,凋萎含水量 10.5% ,土壤稳定湿度 15.5% 。耕层土壤有机质含量 10.9 g/kg ,全氮含量 0.8 g/kg ,碱解氮含量 37.0 mg/kg ,全磷含量 0.7 g/kg ,速效磷含量 5.0 mg/kg ,速效钾含量 129.3 mg/kg ,pH 为 8.4。研究区多年年均降水量 584 mm ,

7—9 月降雨量占全年降雨量的 57% ,年均潜在蒸发量 $1\,500\text{ mm}$,年平均气温 $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时间 $2\,232\text{ h}$,塬面 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $3\,029\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 171 天,地下水位 $50\sim 80\text{ m}$,无灌溉条件。春玉米是该区主要粮食作物之一。2017—2020 年玉米生育期逐月降水量见图 1。

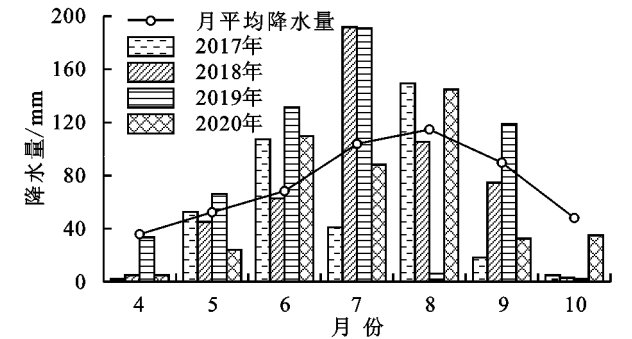


图 1 2017—2020 年春玉米生育期逐月降水量

1.2 试验设计

供试春玉米品种为“先玉 335”,于 2017 年 4 月至 2020 年 9 月进行试验。玉米采用半地膜种植模式,膜宽 80 cm ,膜间距 30 cm ,玉米行距 60 cm ,种植密度 $60\,000\text{ 株/hm}^2$ 。

采用随机区组设计,本试验设置 4 个处理(表 1),每个处理 3 次重复,共 12 个小区。小区长 8.5 m ,宽 5.5 m ,面积 46.75 m^2 。

表 1 试验处理设计 单位: kg/hm^2

处理代码	处理方式	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	秸秆
CON1	常量施氮	250	120	38	0
CON2	秸秆深埋配合常量施氮	250	120	38	15000
CR1	减量施氮	200	120	38	0
CR2	秸秆深埋配合减量施氮	200	120	38	15000

秸秆深埋方式:玉米收获后,将小区全部秸秆切成 30 cm 左右长度,在 CON2 和 CR2 的小区内,开沟埋入 30 cm 深度土层,沟宽 40 cm ,沟间距 40 cm 。覆土时,将相应位置挖出的全部土壤原位回填。除施氮量不同外,其余施肥方式均相同。氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,钾肥用硫酸钾,均于播种前混施于 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层。

1.3 采样方法与测定项目

1.3.1 土壤水分测定 春玉米播种前和收获后,在每个小区膜上,膜间两点,用直径 3 cm 的土钻钻取 $0\sim 300\text{ cm}$ 土壤样品装入标记好的铝盒中。 $0\sim 100\text{ cm}$,每 10 cm 采 1 次混合土样; $100\sim 300\text{ cm}$,每 20 cm 采

1 次混合土样),烘干法测定土壤质量含水量^[15]。

1.3.2 春玉米产量测定 每年 9 月收获期,各小区选取 4 m×4 m(16 m²)的样方,收集地上所有玉米植株,称重,并选出 15 株典型代表样带回实验室,进行前处理和风干,室内考种,计算产量。

1.4 计算公式

(1)土壤质量含水量

$$\theta = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\%$$

式中:θ 为土壤质量含水量(%);m₁ 为土壤鲜土质量(g);m₂ 为烘干土质量(g)。

(2)土壤储水量

$$W = h \times a \times \theta \times 10$$

式中:W 为土壤储水量(mm);h 为土层深度(cm);a 为土壤容重(g/cm³)。

(3)土壤耗水量

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

式中:ΔW 为土壤耗水量(mm);W₁ 为播前土壤储水量(mm);W₂ 为收获期土壤储水量(mm)。

(4)采用水量平衡法计算作物全生育期内总耗水量,公式为:

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

式中:P 为玉米生育期降雨量(mm);I 为生育期灌水量(mm);ET 为作物生育期耗水量(mm);D 为地下水的渗透量和补给量(mm);R 为地表径流(mm)。

由于在本试验地块无灌溉条件,地下水位很深(超过 70 m),水分入渗深度一般在根层以内,很少发生地表径流,故不考虑地表径流(R)。因此,作物耗水量的计算公式可简写为:

$$ET = \Delta W + P$$

(5)水分利用效率

$$WUE = Y / ET$$

式中:WUE 为作物水分利用效率[kg/(mm·hm²)];Y 为作物产量(kg/hm²)。

1.5 数据处理

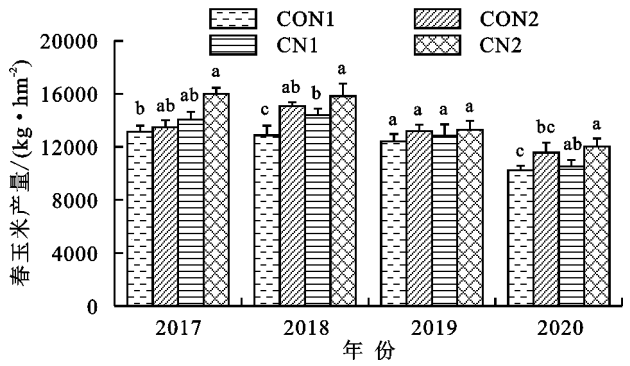
试验数据处理和分析采用 Excel 2010 和 SPSS 26 软件,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 秸秆深埋配合减氮对春玉米产量的影响

秸秆深埋配合减氮对春玉米产量有显著影响(*p* < 0.05)(图 2)。4 年数据表明秸秆深埋配合减氮处理(CR2)的春玉米产量最高。在同等施氮量下,4 年间秸秆深埋处理获得的春玉米产量较高,CON2 较 CON1 分别增加 355.00,2 220.43,768.63,1 338.57 kg/hm²;CR2 较 CR1 分别增加 1 959.21,1 441.91,467.47,1 487.67 kg/hm²。在无秸秆下,2017 年、2019 年及 2020 年 CON1 和

CR1 之间没有显著差异,2018 年 CR1 较 CON1 春玉米产量增加 1 516.51 kg/hm²;在秸秆深埋处理下,4 年试验结果 CR2 较 CON2 春玉米产量增多,但没有显著差异。2020 年各处理的春玉米产量均低于其他年份。研究结果表明,减量施氮至 200 kg/hm²并没有降低春玉米产量,反而使春玉米产量增加,但差异不显著;秸秆深埋显著提高春玉米产量(*p* < 0.05);秸秆深埋配合减氮效果最好。



注:图柱上方不同字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平(*p* < 0.05)。下同。

图 2 秸秆深埋配合减氮对春玉米产量的影响

2.2 秸秆深埋配合减氮对土壤剖面耗水变化及总耗水量的影响

播种前与收获后的土壤储水量差值可以表征土壤水分的亏缺程度,土壤耗水量正负值变化的点为土壤底墒消耗临界值。从年际变化(图 3)来看,2017 年土壤耗水在 0—100 cm 土层变化较小,100—200 cm 土层耗水急剧增加后缓慢减少,峰值出现在 140 cm 处;2018 年土壤耗水量呈先增加后减少的趋势,80—200 cm 土层土壤耗水量大于 0,在 140 cm 土层处出现峰值,底墒消耗量最大;2019 年 0—140 cm 土层耗水量总体上趋近于 0,但 160—300 cm 土层土壤耗水量增加;2020 年 0—300 cm 土层土壤耗水总体为负,0—300 cm 土层均为补水状态。通过对比 4 年 0—300 cm 的土壤耗水量看出,4 种处理土壤耗水量呈现相似的变化特征,秸秆深埋配合减氮处理(CR2)的土壤耗水量在土壤剖面上总体低于常量施氮处理(CON1)。

由图 4 可知,2017 年及 2018 年土壤总耗水量为正值,2019 年和 2020 年为负值,说明 2019 年和 2020 年其储水量并未减少,反而增加。2017 年秸秆深埋配合减氮(CR2)总耗水量较常量施氮(CON1)、常量施氮配合秸秆(CON2),减量施氮(CR1)处理分别低 30.71%,14.19%,13.61%。2018 年 CR1、CR2 与 CON1、CON2 有显著差异(*p* < 0.05),CR1、CR2 较 CON1、CON2 平均降低 44.25%。2019 年 CON1 总耗水量最多,为 9.04 mm,CON2、CR1 及 CR2 处理均为负值,土壤储水量 CR2 较 CR1 增加 19.84 mm,

较 CON2 增加 12.70 mm($p<0.05$)。2020 年各处理间显著性差异与 2018 年一致, CR1、CR2 较 CON1、CON2 土壤储水量平均增多 23.40%。研究结果表

明, 施氮影响作物对土壤水分的消耗, 减量施氮显著降低土壤耗水; 在同等施氮量下, 秸秆深埋可以减少土壤耗水量。

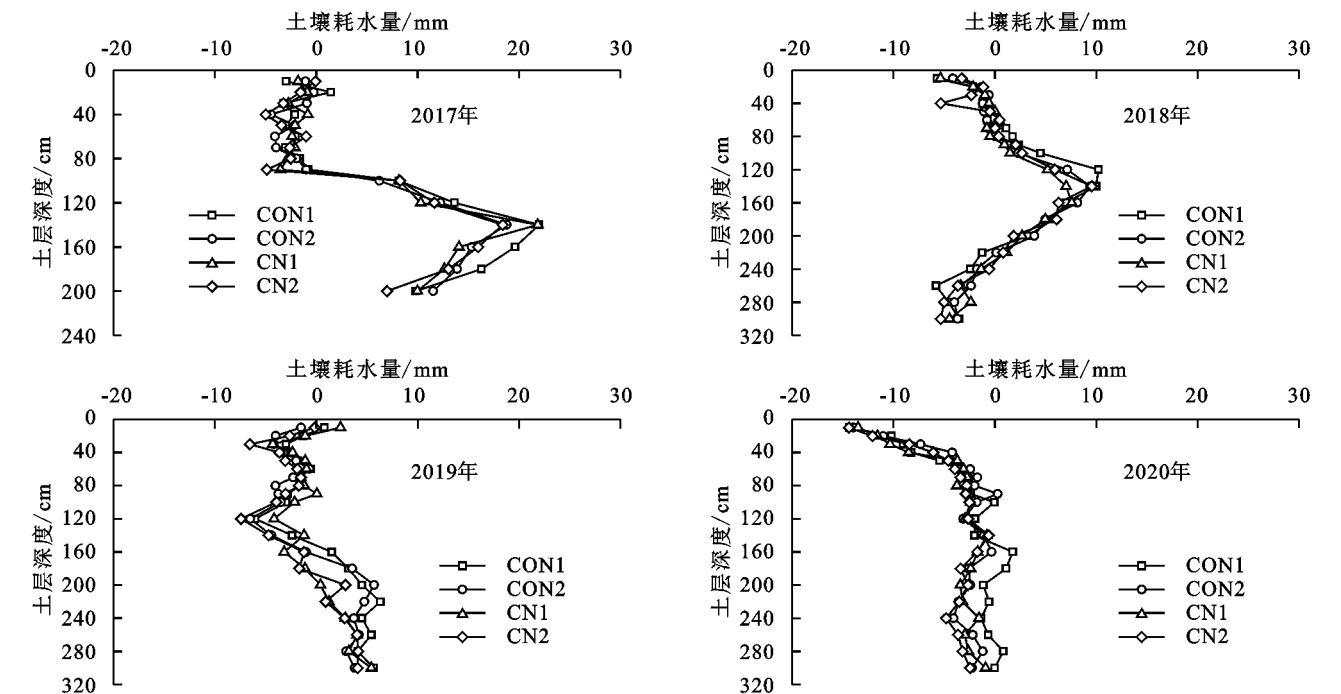
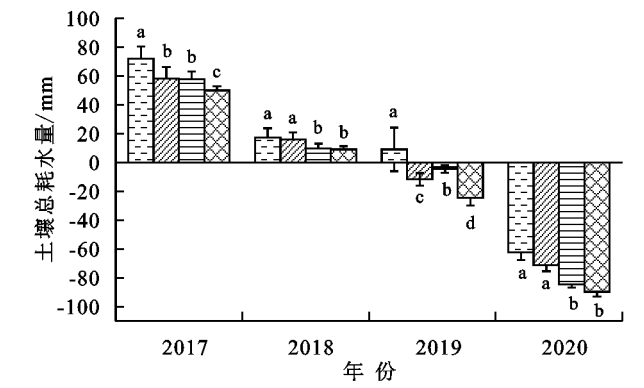


图 3 秸秆深埋配合减氮对春玉米土壤耗水量变化的影响



注: 2017 年为 0—200 cm 土层总耗水量, 其余年份为 0—300 cm 土层总耗水量。

图 4 秸秆深埋配合减氮对春玉米土壤总耗水量的影响

2.3 秸秆深埋配合减氮对土壤水分利用效率的影响

通过对比 4 年的土壤水分利用效率(图 5)看出, 秸秆深埋配合减氮(CR2)与常量施氮(CON1)相比较, 能够显著地提高 WUE($p<0.05$), 且在 4 个处理中最高。2017 年常量施氮(CON1)、常量施氮配合秸秆(CON2)以及减量施氮(CR1)处理之间差异不显著, 但其土壤水分利用效率高低为 $CR1>CON2>CON1$ 。2018 年、2019 年及 2020 年水分利用效率各处理表现 $CR2>CON2>CR1>CON1$, 3 年平均分别为 31.45, 29.50, 28.20, 25.69 kg/(mm·hm²)。在同等施氮量下, 秸秆深埋处理显著提高 WUE($p<0.05$); 减量施氮较常量施氮亦可提高 WUE, 秸秆深埋配合减氮处理水分利用效率最高。

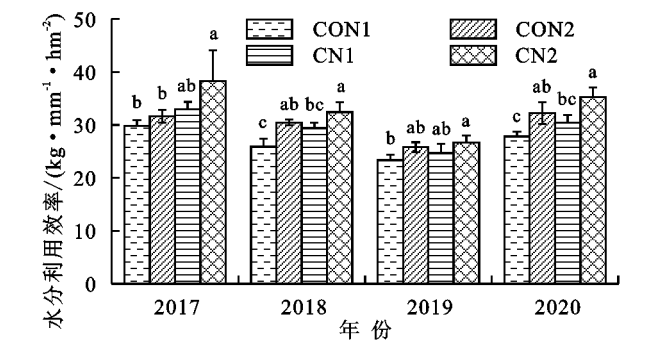


图 5 秸秆深埋配合减氮对春玉米水分利用效率的影响

3 讨论

秸秆深埋是提高旱塬春玉米产量的有效措施。本试验结果表明, 秸秆深埋可显著提高春玉米产量($p<0.05$)。在同等施氮量下, CON2 较 CON1 平均增产 9.80%, CR2 较 CR1 平均增产 10.43%。作物产量受土壤水分、温度以及养分变化等的影响, 秸秆深埋不仅增强土壤蓄水保墒能力, 而且其本身富含的氮、磷及有机质等营养元素深埋于土壤, 可被微生物加速分解利用^[16], 进而达到促进作物增产的效果^[17]。由于秸秆含氮量低, 微生物分解秸秆过程中会出现与作物争氮的现象^[18], 合理施用氮肥可以改善土壤养分状况, 提高春玉米产量, 但过量施用并不能继续提高春玉米产量, 反而造成环境污染^[19]。本研究表明, 将传统施氮量减至 200 kg/hm², 春玉米增产 866.93 kg/hm²。此外, 不同处理方式间春玉米产量表现为 $CR2>CON2>CR1>CON1$ 。杨忠浩等^[13]研究

表明,黄土旱塬区春玉米产量随施氮量的增加呈二次抛物线趋势,传统施氮量(250 kg/hm^2)已严重过量,减氮 20% 可以取得较高的产量。在关中麦玉轮作区的研究结果也表明,秸秆还田配施氮肥作物生物量会随着施氮量的增加呈现先增加后减少的趋势^[20]。可见,在秸秆深埋配合减量施氮的条件下,春玉米获得的产量最高,这与前期研究^[21]结果一致。

土壤水分是影响旱地作物生长和生产力高低的关键因素,黄土旱塬区属雨养农业区,土壤耗水量的盈亏程度与作物生育期的降雨量关系密切^[22]。4 年结果表明,0—100 cm 土层土壤耗水量达到动态平衡。其中 2017 年、2018 年、2019 年 0—100 cm 土层土壤耗水量变化趋于 0,这可能与作物雨热同期,降雨使表层土壤水分得到补充有关^[23],2020 年 0—100 cm 土层中土壤储水量较多,可能与 2020 年后期降雨量较多有关。不仅充分补充玉米耗水需求,而且使其在土壤水分再分配过程中 100—200 cm 土层水分达到动态平衡^[24]。除生育期降水外,土壤底墒也是植被供水的重要组成部分。100—200 cm 土层土壤耗水多,波动较大,这是因为生育期降雨不均衡,玉米根系对土壤深层水分强烈吸收,使土壤底墒发生部分消耗^[25-26]。韩云良等^[27]研究表明,氮肥施用会加强根系发育,使玉米根系对深层水分利用更多。秸秆深埋可诱导玉米根系下扎,从而促进深层根系发育,使土壤深层养分和水分被作物吸收^[28]。不同处理间 0—300 cm 土层土壤耗水总体趋势一致,具有显著的时空变化特征。整体来看,秸秆深埋显著降低土壤总耗水量($p < 0.05$),2017 年和 2019 年秸秆深埋处理土壤总耗水量分别降低 10.86, 20.31 mm。李波等^[29]在东北半湿润地区研究发现,秸秆深埋通过提高土壤对雨水的拦蓄能力,有效提高土壤持水能力,使剖面总体上土壤耗水减少,降低春玉米生育期总耗水量。

提高土壤水分利用效率是解决干旱地区水资源短缺的重要措施^[28]。本研究发现,在同等施氮量下,秸秆深埋显著提高水分利用效率($p < 0.05$),CON2 较 CON1 的 WUE 提高 3.30%, CR2 较 CR1 的 WUE 提高 3.76%。有研究^[30-31]表明,秸秆还田改变土壤孔隙度,使大小孔隙兼备,增加深层土壤蓄水量,改善作物耗水特性,提高 WUE。刘耀权等^[9]研究表明,在适量施氮条件下,较多的土壤水分被玉米根系吸收,促进玉米生长发育,从而提高籽粒产量和水分利用效率。但过量施肥抑制玉米根系的生长,同时增加土壤水分消耗,降低 WUE。李荣等^[10]研究表明,秸秆还田配合减量施氮有效改善土壤物理性质,增加土壤养分含量,增强土壤的蓄水保墒能力,从而提高土壤水分利用效率。本研究结果表明,在常量施氮 250 kg/hm^2 的基础上减量至 200 kg/hm^2 ,可提高 WUE 2.67%~3.13%,这与郑利芳等^[32]研究结果一

致。秸秆深埋配合减量施氮的春玉米水分利用效率在不同处理中最高,4 年平均值为 $33.16\text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。在黄土旱塬区秸秆深埋配合减量施氮至 200 kg/hm^2 是提高水分利用的有效措施。

4 结论

(1) 秸秆深埋处理提高旱塬春玉米产量 9.8%~10.43%;传统施氮量减至 200 kg/hm^2 并不减少春玉米产量;秸秆深埋配合秸秆深埋处理(CR2)显著提高春玉米产量。

(2) 旱塬春玉米土壤耗水量波动主要发生在 100—200 cm 土层,0—100 cm 土层土壤耗水达到动态平衡;秸秆深埋显著降低土壤总耗水量($p < 0.05$)。

(3) 旱塬春玉米水分利用效率表现为 $\text{CR2} > \text{CON2} > \text{CR1} > \text{CON1}$,秸秆深埋配合减量施氮处理(200 kg/hm^2 + 秸秆)水分利用效率最高为 $33.16\text{ kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。

参考文献:

- [1] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(20):91-101.
- [2] 杨磊,卫伟,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J].地理研究,2012,31(1):71-81.
- [3] 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.
- [4] Zhong Y Q W, Shangguan Z P. Water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat under long-term nitrogen fertilization regimes in North-west China[J].PLoS One,2014,9(6):e98850.
- [5] 徐莹莹,王宇先,刘玉涛,等.黑龙江省不同生态区秸秆还田模式对土壤指标及玉米生长的影响[J].黑龙江农业科学,2022(4):1-7.
- [6] 韩锦泽,匡恩俊,迟凤琴,等.秸秆深还田对土壤微生物特征及其影响因素的研究[J].土壤通报,2016,47(5):1154-1161.
- [7] 黄毅,毕素艳,邹洪涛,等.秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响[J].玉米科学,2013,21(5):109-112.
- [8] 曾莉,张鑫,张水清,等.不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J].植物营养与肥料学报,2020,26(9):1565-1577.
- [9] 刘耀权,王林林,李玲玲,等.施氮促进旱作覆膜玉米产量和水分利用效率的生理机制[J].云南农业大学学报(自然科学版),2022,37(2):193-202.
- [10] 李荣,侯贤清,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):289-298.
- [11] 谢洪宝,于贺,陈一民,等.秸秆深埋对不同氮肥水平土壤蔗糖酶活性的影响[J].中国农学通报,2021,37(24):79-83.
- [12] 周珂,王晓军,李华芝,等.秸秆深埋条件下不同施氮水平对玉米产量和氮吸收利用的影响[J].中国农学通报,2019,35(33):6-11.

- 社,2010.
- [20] 环境保护部.中华人民共和国国家环境保护标准《HJ802—2016—土壤电导率的测定电极法》[S].北京:中国环境科学出版社,2016.
- [21] Victoria N, Tobias R, Dries H, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J].*Soil Biol and Biochemistry*,2012,55:20-27.
- [22] 唐行灿,陈金林.生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展[J].*生态科学*,2018,37(1):192-199.
- [23] Robertson S J, Rutherford P M, López-Gutiérrez J C, et al. Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils[J].*Canadian Journal of Soil Science*,2012,92(2):329-340.
- [24] 张清敏,刘曼,周湘婷.微生物肥料在土壤生态修复中的作用[J].*农业环境科学学报*,2006,25(增刊 1):283-284.
- [25] 毛晓曦,管培彬,马理,等.有机物料配施菌剂对设施次生盐渍化土壤的修复效果[J].*中国农学通报*,2021,37(26):80-87.
- [26] Yang X, Post W M, Thornton P E, et al. The distribution of soil phosphorus for global biogeochemical modeling [J].*Biogeosciences*,2013,10(4):2525-2537.
- [27] Hatzinger P B, Alexander M. Relationship between the number of bacteria added to soil or seeds and their abundance and distribution in the rhizosphere of alfalfa [J].*Plant and Soil*,1994,158(2):211-222.
- [28] 程扬,刘子丹,沈启斌,等.秸秆生物炭施用对玉米根际和非根际土壤微生物群落结构的影响[J].*生态环境学报*,2018,27(10):1870-1877.
- [29] 陈昕,李奇,陈懂懂,等.三江源国家公园不同草地土壤微生物功能基因的差异性分析[J].*生态环境学报*,2020,29(3):472-482.
- [30] 吴希慧,王蕊,高长青,等.土地利用驱动的土壤性状变化影响微生物群落结构和功能[J].*生态学报*.2021,41(20):7989-8002.
- [31] 褚义红,崔世茂,付崇毅,等.不同微生物菌肥对生菜生长及品质的影响[J].*蔬菜*,2014(3):20-24.
- (上接第 344 页)
- [13] 杨忠浩,党廷辉,路远,等.黄土塬区春玉米氮肥—水分—产量关系研究[J].*水土保持学报*,2020,34(4):237-240,248.
- [14] 王兵,刘文兆,党廷辉,等.长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J].*植物营养与肥料学报*,2007,13(3):411-416.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 王珍,冯浩,吴普特,等.土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2009,25(11):114-119.
- [17] 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.
- [18] 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):161-165,188.
- [19] 颜晓元,夏龙龙,遆超普.面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J].*中国科学院院刊*,2018,33(2):177-183.
- [20] 张亮.关中麦玉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].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [21] 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.
- [22] 郭胜利,吴金水,郝明德,等.长期施肥对 NO_3^- -N 深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J].*应用生态学报*,2003,14(1):75-78.
- [23] 易彩琼,王胜,樊军.黄土高原坡地退耕恢复草地的土壤水分动态[J].*草地学报*,2015,23(6):1182-1189.
- [24] 姚小英,王莺,王兴,等.黄土高原旱塬区玉米田土壤水分变化特征及对产量的影响[J].*江苏农业科学*,2020,48(12):292-297.
- [25] 高洪军,朱平,彭畅,等.不同施肥方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(4):195-200.
- [26] 胡锦涛,樊军,付威,等.不同管理措施对黄土塬区农田土壤水分调控和硝态氮淋溶累积的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2019,25(2):213-222.
- [27] 韩云良,胡迎春,张宁宁,等.覆膜时期和方式对黄土高原春玉米耗水特性和产量的影响[J].*西北农业学报*,2018,27(3):362-371.
- [28] 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.
- [29] 李波,陈天助,姚名泽,等.东北半湿润地区深埋秸秆周围土壤水分的动态变化[J].*灌溉排水学报*,2016,35(9):51-55.
- [30] 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].*农业机械学报*,2014,45(10):116-123.
- [31] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].*中国农业科学*,2014,47(17):3359-3371.
- [32] 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.