

土壤秸秆注孔对土壤含水量及作物生长的影响

李梦琦¹, 肖辉^{1,2}, 张慧¹, 高贤彪¹, 程文娟¹, 董昱辰³, 张余良¹, 陈坤¹

(1.天津市农业科学院, 天津 300384; 2.天津大学 环境科学与
工程学院, 天津 300350; 3.天津亚派绿肥生物科技发展有限公司, 天津 301600)

摘要: [目的] 研究土壤秸秆注孔对土壤含水量及作物生长的影响, 为旱作农田增加雨水蓄集能力及提高水分利用效率提供理论依据。[方法] 开展玉米—小麦轮作田间试验, 设置常规种植(CK)、土壤秸秆注孔 2 孔/m²(T₁), 4 孔/m²(T₂), 8 孔/m²(T₃) 4 个处理。[结果] 秸秆注孔所有处理均提高了整个试验期表层土壤含水量。T₂, T₃ 处理提高了收获期深层土壤含水量, 试验结束时两者底层土壤(60—80 cm)含水量较 CK 分别提高了 29.19% 和 28.18%。秸秆注孔处理提高了作物株高、经济产量和生物量, 以及降水利用效率和水分利用效率, T₂, T₃ 处理的提高效果最明显, 且彼此差异不显著。[结论] 秸秆注孔具有保水性能和增产能力, 根据成本和效果综合考虑, 推荐秸秆注孔 4 孔/m²(T₂) 作为优选处理。

关键词: 土壤秸秆注孔; 土壤含水量; 玉米—小麦轮作; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0050-07

中图分类号: S152.7

文献参数: 李梦琦, 肖辉, 张慧, 等. 土壤秸秆注孔对土壤含水量及作物生长的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 50-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.006; Li Mengqi, Xiao Hui, Zhang Hui, et al. Effects of soil straw hole injection on soil moisture content and crop growth [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 50-56.

Effects of Soil Straw Hole Injection on Soil Moisture Content and Crop Growth

Li Mengqi¹, Xiao Hui^{1,2}, Zhang Hui¹, Gao Xianbiao¹,

Cheng Wenjuan¹, Dong Yuchen³, Zhang Yuliang¹, Chen Kun¹

(1. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

3. Tianjin Yapaiwei Biotechnology Science and Technology Development Company Limited, Tianjin 301600, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil straw hole injection on soil moisture content and crop growth were studied to provide a theoretical basis for increasing rainwater storage capacity and improving water use efficiency in dry farmland. [Methods] A field trial of a maize-wheat rotation was carried out, with four treatments including conventional tillage (CK), and soil straw hole injection of 2 holes/m²(T₁), 4 holes/m²(T₂), and 8 holes/m²(T₃). [Results] All three hole injection treatments increased the surface soil moisture during the entire experimental period. The T₂ and T₃ treatments increased the deep soil moisture content at harvest time, and the moisture content in the 60—80 cm soil layer increased 29.19% and 28.18%, respectively, compared with CK at the end of the experiment. Soil straw hole injection treatments increased plant height, yield, biomass, precipitation use efficiency, and water use efficiency. The T₂ and T₃ treatments had the most obvious effect on soil moisture and crop growth, with no significant difference between them. [Conclusion] Water retention and yield were increased by soil straw hole injection treatments. Considering the cost and effects, soil straw hole injection of 4 holes/m²(T₂) is recommended.

Keywords: soil straw hole injection; soil moisture content; maize-wheat rotation; water use efficiency

收稿日期: 2023-07-12

修回日期: 2023-09-06

资助项目: 国家重点研发计划项目“环渤海盐碱地耕地质量与产能提升技术模式及应用”(2021YFD190090505; 2021YFD190090407); 天津市技术创新引导专项“花苗木(月季)养分高效利用关键技术研究”(21YDTPJC00920); 天津市农业科学院青年科技创新项目“基于秸秆还田的农田固碳增汇技术研究”(2022007)

第一作者: 李梦琦(1993—), 女(汉族), 河北省保定市人, 硕士, 研究实习生, 主要从事植物生态方面的研究。Email: ll4869ll@163.com。

通信作者: 肖辉(1981—), 男(汉族), 山东省泰安市人, 博士, 副研究员, 主要从事盐碱地改良与培肥、水资源综合利用等方面的研究。Email: xiaohui81@163.com。

水资源紧缺是限制农业生产的主要因素之一^[1-3]。土壤缺水会抑制作物生长,导致作物萎蔫甚至死亡,影响产量。将天然降水尽可能多地蓄积于土壤中供作物生长发育之用,对提高旱地作物产量至关重要^[4-5]。

采用合理的耕作措施,可蓄水保墒,提高土壤贮水能力,增加作物对水分的利用效率,提高产量。相关研究表明,通过深松打破犁底层,能改善土壤通透性,促进根系生长,增加土壤接纳降雨的能力,提高产量^[6-7]。但是在实际生产中,深松作业成本高、能耗大,且目前国内的深松机械存在容易堵塞、耕作质量不高等问题^[8]。深耕增加了土壤与外界环境的接触,使土壤能够容纳更多的雨水并增加土壤的储水能力^[9-10]。但是频繁翻耕会破坏土壤团聚体,并加速土壤微生物对有机质的消耗,导致土壤有机碳含量降低^[11-12]。秸秆常规还田可降低土壤容重^[13],促进大团聚体形成^[14-15],提高土壤含水量,提高水分利用效率^[16]。但是长期秸秆浅旋会导致犁底层上升、耕层变浅,水分下渗能力受到限制,影响土壤养分供应和作物根系的生长,进而影响产量^[17-18],并且常规还田在实际生产中秸秆粉碎质量差、还田时耕翻深度低,还会导致耕层秸秆比例高且难腐解,会影响作物出苗,影响产量和品质^[19]。

本研究拟提出一种新的蓄水保墒的秸秆还田方式——土壤秸秆注孔。土壤秸秆注孔能在减少土壤扰动的前提下,打破犁底层,同时可以实现秸秆资源化利用,预计可以提高土壤蓄水保肥能力,提高土壤地力,改善作物生长环境,提高作物产量,提高水分利用效率。本试验通过研究土壤秸秆注孔对土壤含水量及作物生长的影响,明确土壤秸秆注孔的保水增产能力,为旱作农田增加雨水蓄集能力及提高水分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在天津滨海新区大港农场(38°44'15"N, 117°13'48"E)。该地区属温带大陆性季风气候,滨海冲积平原,全年平均气温 12℃,无霜期 7 个月。年均降雨量 570~690 mm,但分布不均,70%集中在 6—8 月,年均蒸发量 1 100 mm。土壤类型属盐化潮土,试验前耕层土壤基本性状为:有机质含量为 14.96 g/kg,全氮含量为 1.06 g/kg,水解氮含量为 95.55 mg/kg,有效磷含量为 4.80 mg/kg,速效钾为 199.0 mg/kg,水溶性盐总量 2.11 g/kg, pH 值为 8.45。试验前土壤 0—20 cm 土层含水量为 12.88%, 20—40 cm 土层含水量为 15.57%, 40—60 cm 土层含水量为 20.11%,

60—80 cm 土层含水量为 20.04%。

1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理:①CK:常规种植。②T₁:秸秆注孔 2 孔/m²(钻孔孔距 1.0 m×0.5 m)。③T₂:秸秆注孔 4 孔/m²(钻孔孔距 0.5 m×0.5 m)。④T₃:秸秆注孔 8 孔/m²(钻孔孔距 0.25 m×0.5 m)。每个处理占地面积 40 m²(4 m×10 m),重复 3 次,随机区组排列。土壤秸秆注孔是在田间利用打孔设备进行垂直打孔,打穿犁地层,然后将粉碎的秸秆填充在孔中、压实,再进行正常耕种。考虑到秸秆填充的方便程度、犁底层深和渗水速度等,根据前期预试验,确定本试验秸秆注孔的打孔深度为 40 cm,直径 2.5 cm,仅在最初玉米季打孔。秸秆用粉碎机粉碎,粒径 0.5 cm 以下,每孔填充秸秆 0.11 kg(干基),40 cm 全部填充。作物种植时不考虑作物与注孔之间的位置关系,作物常规种植。施肥、播种等日常管理同农民习惯,玉米季和小麦季施肥量均为 600 kg/hm²,玉米季供试肥料为新洋丰复合肥(含 N 24%, P₂O₅ 10%, K₂O 14%),小麦季供试肥料为鲁化复合肥(含 N 25%, P₂O₅ 8%, K₂O 10%)。

试验时间为 2019 年 6 月至 2020 年 6 月。2019 年 6 月 3 日土壤秸秆注孔,2019 年 6 月 5 日播种玉米,玉米品种为郑单 958,密度 60000 株/hm²,2019 年 10 月 10 日收获;2019 年 10 月 20 日播种冬小麦,冬小麦品种为津农 6 号,播种量 300 kg/hm²,2020 年 6 月 5 日收获。

1.3 测定项目与方法

试验期间分别在 2019 年 6 月 24 日、8 月 28 日、10 月 10 日、2020 年 4 月 28 日、6 月 5 日,采集表层土壤(0—20 cm),并在作物收获期分 4 层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm)采集土壤样品。采用“S”形取样法,用土钻取土。每个小区设置 4 个采样点,将同小区同土层的土样混合后带回。采集样品各自混匀后用烘干法测定土壤含水量。

2019 年 10 月 10 日收获玉米,每个小区选取具有代表性的玉米植株 8 株,测量株高,晾干后称重,记录籽粒干重和秸秆干重。将 8 株玉米的籽粒干重用种植密度折算,即为该小区玉米的经济产量,将籽粒和秸秆的总干重用种植密度折算,即为其生物量。2020 年 6 月 5 日收获冬小麦,每个小区设置 1 m×1 m 的样方,在样方中选取具代表性的小麦 10 株测量株高,将样方内小麦全部收割,晾干后称重,记录籽粒干重和秸秆干重。将 1 m²小麦的籽粒干重按小区面积折算,即为该小区小麦的经济产量,将籽粒和秸秆的总干重按小区面积折算,即为其生物量。

根据作物经济产量、生育期降水量和耗水量计算降水利用效率和水分利用效率。公式分别为：

$$PUE=Y/P \quad (1)$$

$$WUE=Y/ET \quad (2)$$

式中：PUE 为降水利用效率 [kg/(hm²·mm)]；WUE 为水分利用效率 [kg/(hm²·mm)]；Y 为作物经济产量 (kg/hm²)；P 为生育期降水量 (mm)；ET 为生育期耗水量 (mm)。

生育期耗水量为作物整个生长期的灌溉水量、降水量、土壤贮水量的变化量的总和。玉米季末灌溉，小麦季于返青拔节期灌溉一次，灌溉水量 60.0 mm。玉米季降水量 371.6 mm，小麦季降水量 195.1 mm。土壤贮水量计算公式为：

$$W=w \times \rho_s \times h \quad (3)$$

式中：W 为土壤贮水量 (mm)；w 为土壤含水量 (%)；ρ_s 为土壤容重 (g/cm³)；h 为土层深度 (mm)。

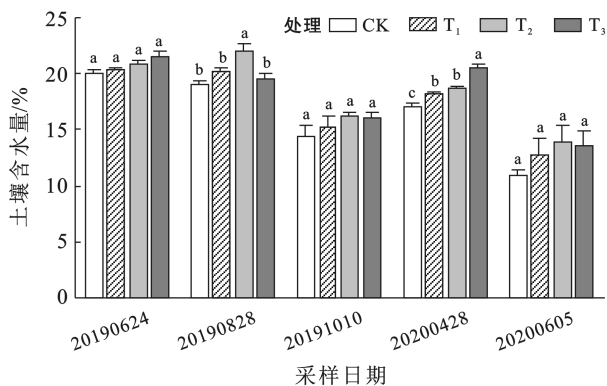
1.4 数据处理

试验采用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析，采用 Duncan 法进行多重比较，使用 Excel 2020 制图。

2 结果与分析

2.1 秸秆注孔对不同时期表层土壤含水量的影响

在不同时期，秸秆注孔均提高了表层土壤含水量 (图 1)。试验结束时，T₁、T₂、T₃ 处理表层含水量与 CK 相比分别提高了 16.39%、23.19% 及 18.20%。在 2019 年 6 月 24 日和 2020 年 4 月 28 日，土壤表层含水量随注孔密度的增加而增加。在 2019 年 8 月 28 日、10 月 10 日和 2020 年 6 月 5 日，均为 T₂ 处理表层土壤含水量最高，较 CK 分别提高了 15.39%、12.24%、23.19%。在不同时期均为 T₂ 或 T₃ 处理土壤含水量最高。说明对于表层土壤，秸秆注孔能提高土壤保水能力，并且 T₂、T₃ 处理的保水效果最好。



注：不同小写字母表示同一采样时间不同处理组间的差异具有统计学意义， $p < 0.05$ 。下同。

图 1 不同时期表层土壤含水量

Fig.1 Surface soil moisture in different periods

2.2 秸秆注孔对深层土壤含水量的影响

玉米季收获时，各处理土壤含水量均随土层深度的加深而逐渐增加，秸秆注孔 T₁、T₂、T₃ 处理在 0—60 cm 土层中土壤含水量要高于 CK，在 60—80 cm，仅有 T₂ 高于 CK (图 2)。在 40—60 cm 土层 T₂ 处理也有很高的含水量。这说明在玉米季秸秆注孔能提高土壤储水量，T₂ 处理的储水能力最强。

小麦季收获时，表层土壤含水量秸秆注孔各处理均高于 CK，在 20—80 cm 土层，T₂、T₃ 处理含水量均明显高于 CK (图 2)，底层土壤 (60—80 cm) 含水量与 CK 相比分别提高了 29.19% 和 28.18%。T₂、T₃ 处理随着土层深度加深土壤含水量不断提高，且两者之间差异不显著。说明对于小麦季，秸秆注孔 T₂、T₃ 处理能有效提高土壤储水量。

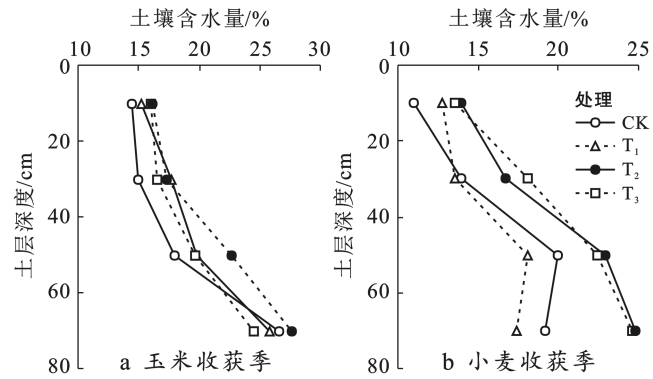


图 2 不同土层土壤含水量

Fig.2 Soil moisture content in different soil layers

2.3 秸秆注孔对玉米、小麦株高的影响

秸秆注孔增加了玉米、小麦的株高，并且随着注孔密度的增加，株高逐渐增加 (图 3)。秸秆注孔对小麦株高的提高效果比玉米更明显。玉米季秸秆注孔 T₁、T₂、T₃ 处理相对 CK 分别提高株高 2.35%、3.58% 和 6.19%，T₃ 处理株高显著高于 CK。小麦季秸秆注孔 T₁、T₂、T₃ 处理相对 CK 分别提高株高 20.53%、32.11%、35.26%，各处理株高均显著高于 CK。说明秸秆注孔能有效促进作物生长，提高作物株高。

2.4 秸秆注孔对玉米、小麦经济产量和生物量的影响

秸秆注孔提高了玉米的经济产量 (表 1)，T₁、T₂、T₃ 与 CK 相比，分别提高玉米产量 4.24%、9.70% 及 8.53%。T₂、T₃ 的玉米经济产量显著高于 CK，但 T₂、T₃ 之间差异不显著。T₂、T₃ 处理提高了玉米的生物量，T₁ 相对 CK 略有降低，但差异不显著。T₂、T₃ 玉米生物量较 CK 分别提高了 5.94% 和 4.68%。说明在玉米季，秸秆注孔 T₂、T₃ 处理能有效提高作物的经济产量和生物量，T₂ 处理的增产效果是最高的。

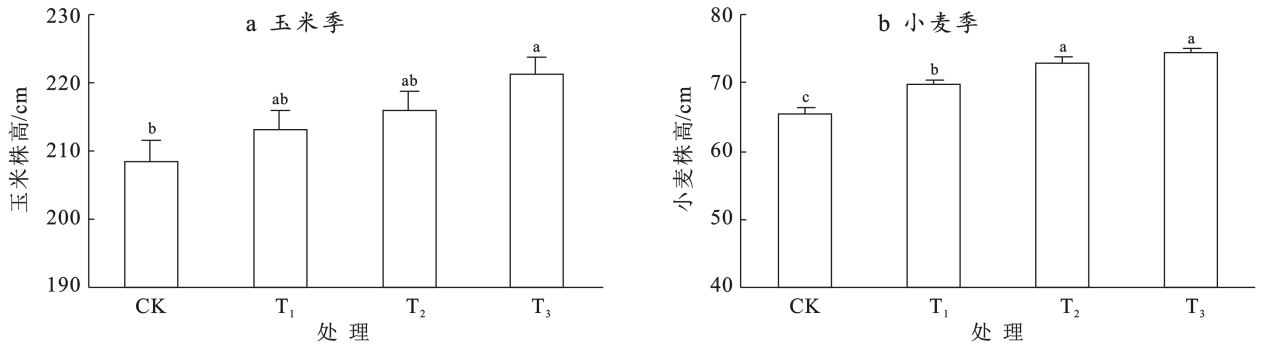


图 3 作物收获时株高

Fig.3 Plant height at harvest time

秸秆注孔提高了小麦的经济产量和生物量,并且注孔密度越大提高效果越明显(表 1)。T₁, T₂, T₃ 与 CK 相比分别提高小麦经济产量 4.44%, 27.79% 和 29.17%, T₁ 与 CK 差异不显著,但 T₂, T₃ 均显著高

于 CK。T₁, T₂, T₃ 与 CK 相比分别提高小麦生物量 16.41%, 35.29% 和 43.31%, T₂, T₃ 显著高于 CK。说明在小麦季秸秆注孔也能实现作物增产, T₂, T₃ 处理的增产效果更明显。

表 1 作物经济产量和生物量

Table 1 Crop economic yield and biomass

处理	玉米		小麦	
	经济产量/(kg · hm ⁻²)	生物量/(kg · hm ⁻²)	经济产量/(kg · hm ⁻²)	生物量/(kg · hm ⁻²)
CK	9 073.9 ± 188.9 ^c	16 703.1 ± 196.5 ^b	7 278.3 ± 317.4 ^b	14 584.0 ± 1 267.4 ^b
T ₁	9 458.7 ± 84.1 ^{bc}	16 692.5 ± 119.2 ^{ab}	7 600.9 ± 621.3 ^b	16 977.4 ± 562.9 ^b
T ₂	9 953.8 ± 69.9 ^a	17 696.0 ± 100.4 ^a	9 300.8 ± 131.5 ^a	19 730.9 ± 263.5 ^a
T ₃	9 848.0 ± 135.2 ^{ab}	17 484.8 ± 18.2 ^{ab}	9 400.9 ± 519.2 ^a	20 900.9 ± 427.3 ^a

2.5 秸秆注孔对降水利用效率和水分利用效率的影响

玉米季各处理耗水量均略低于 CK(表 2)。玉米季降水利用效率和水分利用效率 T₁, T₂, T₃ 均高于 CK。T₁, T₂, T₃ 的降水利用效率较 CK 分别提高 4.24%, 9.70% 和 8.53%。T₁, T₂, T₃ 的水分利用效率较 CK 分别提高 4.88%, 11.12% 和 9.80%。降水利用效率和水分利用效率均为 T₂ > T₃ > T₁ > CK。说明玉米季秸秆注孔能提高降水利用效率和水分利用效率,其中 T₂, T₃ 处理的效果最好。

小麦季 T₂, T₃ 处理的耗水量均低于 CK(表 2), 较 CK 分别降低了 4.53% 和 11.62%。小麦季降水利用效率各秸秆注孔处理均高于 CK, 且随着注孔密度的增加降水利用效率增加。T₁, T₂, T₃ 的降水利用效率较 CK 分别提高 4.43%, 27.79% 和 29.16%。水分利用效率 T₁ 略低于 CK 但差异不显著, T₂, T₃ 明显高于 CK, 分别提高了 33.85% 和 46.15%。说明小麦季秸秆注孔 T₂, T₃ 处理能很好提高降水利用效率和水分利用效率。

表 2 作物降水利用效率和水分利用效率

Table 2 Crop precipitation use efficiency and water use efficiency of maize

作物	处理	降水量/mm	耗水量/mm	降水利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
玉米	CK	371.6	387.3 ± 2.6 ^a	24.42 ± 0.51 ^a	23.43 ± 0.49 ^a
	T ₁	371.6	384.9 ± 2.7 ^a	25.45 ± 0.23 ^a	24.57 ± 0.22 ^a
	T ₂	371.6	382.3 ± 0.8 ^a	26.79 ± 0.19 ^a	26.03 ± 0.18 ^a
	T ₃	371.6	382.8 ± 1.6 ^a	26.50 ± 0.36 ^a	25.73 ± 0.35 ^a
小麦	CK	195.1	282.8 ± 6.3 ^{ab}	37.29 ± 1.63 ^b	25.73 ± 1.12 ^b
	T ₁	195.1	301.9 ± 4.2 ^a	38.95 ± 3.18 ^b	25.17 ± 2.06 ^b
	T ₂	195.1	270.0 ± 10.8 ^{bc}	47.66 ± 0.67 ^a	34.45 ± 0.49 ^a
	T ₃	195.1	249.9 ± 6.4 ^c	48.17 ± 2.66 ^a	37.61 ± 2.08 ^a

3 讨论

华北地区长期土壤的浅旋耕造成了土壤耕层变浅、犁底层加厚等土壤质量问题^[20]。犁底层过厚、坚实,不仅阻碍作物根系的穿插,同时阻碍了耕作层与心土层之间水、肥、气、热的连通性^[21],降低土壤保水保肥能力,抑制作物生长和养分吸收^[22-23],影响作物产量。徐萍等^[24]的研究说明,深松可以打破犁底层,提高小麦籽粒产量,提高水分利用效率。赵亚丽等^[25]的研究表明,深耕可以有效打破犁底层,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤渗水速度,并且增加土壤蓄水容量。花伟东等^[26]的研究指出,对于东北半干旱地区坡耕地,局部打破犁底层后水分稳定入渗率提高,产流时间延长,径流和泥沙明显减少。高建胜等^[27]的研究表明,部分破除犁底层后,夏玉米的株高、叶面积、净光合速率、地上/地下干物质重、产量均随犁底层破除程度的增加而呈增加趋势,但完全破除犁底层,并不利于作物产量等指标的进一步提升,甚至有小幅降低。

本研究采用的秸秆注孔处理,可以在尽量减少土壤扰动的前提下,打破犁底层的阻隔,贯通土壤上下层。试验结果表明,在不同时期,秸秆注孔均提高了表层土壤含水量,秸秆注孔能提高耕层土壤保水能力,并且 T_2 、 T_3 处理的效果最好。土壤表层含水量的提高就是因为秸秆注孔打通了耕层与下层之间的连接,使得上下层的水分得以连通。玉米收获时秸秆注孔各处理在 0—60 cm 土层中土壤含水量要高于 CK,体现秸秆注孔较好的蓄积水分的能力;在 60—80 cm 土层 T_1 处理与 CK 没有显著性差异, T_2 略高于 CK,而 T_3 土壤含水量显著低于 CK,可能是由于注孔密度过大,底层水分随蒸发上移,致使深层含水量下降; T_2 处理表现出良好的蓄水和耕层供水能力。小麦收获时, T_2 、 T_3 处理在各土层的土壤含水量均明显高于 CK,表现出良好的储水效果。 T_1 处理可能由于孔密度过低,对土壤保水性能的改善并不明显, T_2 、 T_3 处理有比较好的保水效果。

本试验结果表明秸秆注孔能增加玉米、小麦的株高,体现了其在促进作物生长方面的作用。在玉米季和小麦季,秸秆注孔 T_2 、 T_3 处理均能有效提高作物的经济产量和生物量,有良好的增产效果。秸秆注孔 T_2 、 T_3 处理在促进作物生长方面有很好的表现,一方面可能是因为打破犁底层,实现了上下层水、肥、气、热的连通,土壤水热条件改善,土壤保水保肥能力增强,提高了水分蓄集及利用效率;另一方面可能是因为秸秆在还田后腐解,向土壤中释放了有机质和氮、

磷、钾等养分。

水分利用效率是作物产量、蒸腾耗水和地表蒸发之间相互消长关系的具体表现。通过研究水分利用效率,可以了解不同处理对土壤水分的利用状况^[28]。本试验结果表明,在玉米季和小麦季,秸秆注孔均能提高降水利用效率和水分利用效率,且 T_2 、 T_3 处理的提高效果更明显。植物对土壤水分的利用效率主要取决于土层中根系分布特征值和吸水速率。根系分布特征值主要取决于根系形态和构型,根系吸水速率主要取决于土壤水分、温度和通气状况等^[29]。犁底层的存在使根系下扎困难,通过深松等措施破坏犁底层后土壤中根系分布有明显的下移趋势^[30-31]。秸秆注孔能提高作物对水分的利用,一方面可能是因为促进了根系的生长和下扎,影响了水肥利用效率;另一方面增加了雨水入渗,提高了土壤贮水能力,可以为作物持续提供水分供应,改善了土壤水热状况,提高了根系的吸水速率。

土壤秸秆注孔技术在保水和增产方面表现了良好的效果,在干旱缺水地区、旱作农业区具有较广的适用性。但该技术还存在一些不足,打孔参数(深度、孔径大小)还需进一步优化。土壤秸秆注孔超过 1 a 的保水效应还在进一步的观察中,最佳的注孔周期也还需进一步优化。另外在水分迁移规律、与作物根系、土壤微生物互作机制等方面还需进一步研究。

4 结论

(1) 秸秆注孔处理能显著提高土壤蓄水保水的能力。

(2) 秸秆注孔处理可以提高作物株高、经济产量和生物量,以及降水利用效率和水分利用效率。 T_2 、 T_3 处理促进作物生长的效果最好且差异不显著。

(3) 秸秆注孔 T_2 和 T_3 处理明显增加了土壤含水量、作物株高、经济产量、生物量、水分利用效率和降水利用效率,体现了秸秆注孔的保水性能和增产性能,根据成本和效果综合考虑,推荐 T_2 (秸秆注孔 4 孔/ m^2) 作为优选处理。

[参 考 文 献]

[1] 杨永辉,武继承,张洁梅,等.不同保墒耕作措施对小麦、玉米耗水特征及周年水分利用的影响[J].华北农学报, 2017,32(3):103-110.

Yang Yonghui, Wu Jicheng, Zhang Jiemei, et al. Effects of different tillage measures maintaining soil moisture on water consumption characteristics and anniversary water utilization for wheat and maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(3):103-110.

- [2] Xie Yingxin, Zhang Hui, Zhu Yunji, et al. Grain yield and water use of winter wheat as affected by water and sulfur supply in the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017,16(3):614-625.
- [3] Zhou Xuan, Wang Ruoshui, Gao Fei, et al. Apple and maize physiological characteristics and water-use efficiency in an alley cropping system under water and fertilizer coupling in Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,221:1-12.
- [4] 李巧珍,李玉中,郭家选,等.覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(2):25-30.
- Li Qiaozhen, Li Yuzhong, Guo Jiakuan, et al. Effects of field rainwater harvesting by plastic mulch and complementary irrigation on soil water and yield of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010,26(2):25-30.
- [5] Zhang Guangxin, Mo Fei, Shah F, et al. Ridge-furrow configuration significantly improves soil water availability, crop water use efficiency, and grain yield in dryland agroecosystems of the Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,245:106657.
- [6] Yan Weiping, Bian Shaofeng, Tan Guobo, et al. Effect of deep loosening on soil structure and maize root activity [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016,17(11):2539-2542.
- [7] 戴第伟,韩巍,依艳丽.辽西干旱半干旱区免耕行间深松培土对土壤水分及玉米产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2021,39(1):1-8.
- Dai Diwei, Han Wei, Yi Yanli. Effect of no-tillage with subsoiling in planting row on soil moisture and yield of spring corn in arid and semi-arid area in the Western Liaoning Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021,39(1):1-8.
- [8] 田艳博,马洪亮,魏淑艳,等.分层深松整地机的设计及试验的研究[J].*农机化研究*,2017,39(11):85-88.
- Tian Yanbo, Ma Hongliang, Wei Shuyan, et al. Design and experiment of layered subsoiling cultivator [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017,39(11):85-88.
- [9] Iqbal M, Anwarul H, Ibrahim M. Effects of tillage systems and mulch on soil physical quality parameters and maize (*Zea mays* L.) yield in Semi-arid Pakistan [J]. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2008,25(4):311-325.
- [10] 姜春霞,单宇茜,杜宇昕,等.不同耕作方式下玉米抗旱保苗及土壤蓄水保墒效应的层次递进分析[J].*山西农业科学*,2022,50(8):1184-1189.
- Jiang Chunxia, Shan Yuqian, Du Yuxin, et al. Hierarchical progressive analysis of the effects of seedling preservation, drought resistance, soil water storage, and moisture conservation of maize under different tillage methods [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022,50(8):1184-1189.
- [11] Hamilton G J, Bakker D, Akbar G, et al. Deep blade loosening increases root growth, organic carbon, aeration, drainage, lateral infiltration and productivity [J]. *Geoderma*, 2019,345:72-92.
- [12] Mahajan G R, Das B, Manivannan S, et al. Soil and water conservation measures improve soil carbon sequestration and soil quality under cashews [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021,36(2):190-206.
- [13] 王红梅,顾建芹,相家英,等.稻麦轮作下连续秸秆还田对作物产量及土壤肥力的影响[J].*浙江农业科学*,2022,63(2):250-255.
- Wang Hongmei, Gu Jianqin, Xiang Jiaying, et al. Effect of continuous straw returning on crop yield and soil fertility in rice-wheat rotation field [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022,63(2):250-255.
- [14] Annabi M, Raclot D, Bahri H, et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia [J]. *Catena*, 2017,153:157-167.
- [15] 范围,吴景贵,李建明,等.秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J].*土壤学报*,2018,55(4):835-846.
- Fan Wei, Wu Jinggui, Li Jianming, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in Northeast China and maize yield therein [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018,55(4):835-846.
- [16] 杨育川,郑月兰,何智宏,等.不同秸秆还田方式及施肥对春小麦复种小油菜产量和资源利用率的影响[J].*中国农学通报*,2016,32(9):20-26.
- Yang Yuchuan, Zheng Yuelan, He Zhihong, et al. Effect of straw returning and fertilization on yields of wheat-rape multiple cropping and resource use efficiency [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016,32(9):20-26.
- [17] 杨雪,逢焕成,李轶冰,等.深旋松耕作法对华北缺水区域壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J].*中国农业科学*,2013,46(16):3401-3412.
- Yang Xue, Pang Huancheng, Li Yibing, et al. Effects of deep rotary sub-soiling tillage on the physical properties and crop growth of the sticky loamy soil in North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013,46(16):3401-3412.
- [18] 孔达,王立权,董文财,等.犁底层及作物根系影响下壤中流形成机理研究[J].*节水灌溉*,2017(6):1-5.
- Kong Da, Wang Liqun, Dong Wencai, et al. Study on the formation mechanism of interflow under the influence of plough pan and root system [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(6):1-5.

- [19] 董印丽,李振峰,王若伦,等.华北地区小麦、玉米两季秸秆还田存在问题及对策研究[J].中国土壤与肥料,2018(1):159-163.
Dong Yinli, Li Zhenfeng, Wang Ruolun, et al. Study on the problems and countermeasures of returning wheat and corn stalks into the soil in North China [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(1):159-163.
- [20] 张玉铭,胡春胜,陈素英,等.耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1558-1570.
Zhang Yuming, Hu Chunsheng, Chen Suying, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021,29(9):1558-1570.
- [21] 翟振,李玉义,逢焕成,等.黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.
Zhai Zhen, Li Yuyi, Pang Huancheng, et al. Study on present situation and characteristics of plow pan in the northern region of Huang Huai Hai Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016,49(12):2322-2332.
- [22] Liu Xiwei, Zhang Xiyang, Chen Suying, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat [J]. Agricultural Water Management, 2015,154:59-67.
- [23] Li Yuyi, Zhai Zhen, Cong Ping, et al. Effect of plow pan thickness on crop growth parameters, nitrogen uptake and greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions in a wheat-maize double-crop rotation in the Northern China Plain: A one-year study [J]. Agricultural Water Management, 2019,213:534-545.
- [24] 徐萍,杨宪杰,冯佐龙,等.华北平原小麦新型耕作施肥播种方式增产增效研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(5):831-841.
Xu Ping, Yang Xianjie, Feng Zuolong, et al. Yield-and efficiency-increasing effect of new tillage-fertilization-sowing method on wheat in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2022,30(5):831-841.
- [25] 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.
Zhao Yali, Xue Zhiwei, Guo Haibin, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014,47(17):3359-3371.
- [26] 花伟东,郭亚芬,张忠学.坡耕地局部打破犁底层对水分入渗的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):213-216.
Hua Weidong, Guo Yafen, Zhang Zhongxue. Influence of plow pan on broke partially slope farmland to moisture content infiltration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(5):213-216.
- [27] 高建胜,郭建军,崔慧妮,等.黄淮海北部农田犁底层不同破除程度对夏玉米农艺性状及产量的影响[J].山东农业科学,2018,50(3):36-40.
Gao Jiansheng, Guo Jianjun, Cui Huini, et al. Effects of breaking plow pan thoroughly or partially on agronomic traits and yield of summer maize in the northern region of Huang-Huai-Hai plain [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018,50(3):36-40.
- [28] 路文涛,贾志宽,高飞,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(1):93-99.
Lu Wentao, Jia Zhikuan, Gao Fei, et al. Effects of straw returning on soil water and crop productivity in the rainfed area of Southern Ningxia, China [J]. Journal of Agro-environment Science, 2011,30(1):93-99.
- [29] 李富春,王琦,张登奎,等.沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤水分和玉米根系分布的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):33-40.
Li Fuchun, Wang Qi, Zhang Dengkui, et al. Effects of furrow-mulching materials on soil moisture and maize root distribution in ridge-furrow rainwater harvesting system [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017,35(1):33-40.
- [30] 齐华,刘明,张卫建,等.深松方式对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J].华北农学报,2012,27(4):191-196.
Qi Hua, Liu Ming, Zhang Weijian, et al. Effect of deep loosening mode on soil physical characteristics and maize root distribution [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012,27(4):191-196.
- [31] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等.深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(5):78-84.
Zhang Ruifu, Yang Hengshan, Gao Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(5):78-84.