

秸秆还田及蚯蚓活动对小麦-玉米 轮作下土壤水分运移的影响

霍蓉蓉, 马莉, 熊丽军

(宝鸡文理学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要:为探讨关中平原小麦-玉米水分高效利用的栽培技术方式,采用田间定点观测方法,研究秸秆还田+接种蚯蚓处理对土壤含水量的影响。设置CK(对照)、S₁(秸秆还田3 000 kg·hm⁻²)、S₂(秸秆还田6 000 kg·hm⁻²)、E(接种蚯蚓)、S₁E(秸秆还田3 000 kg·hm⁻²+接种蚯蚓)、S₂E(秸秆还田6 000 kg·hm⁻²+接种蚯蚓)共6个处理。结果表明:各处理较CK处理均提高了土壤含水量,S₁、S₂、E、S₁E、S₂E处理下土壤含水量分别增加0.21%~27.47%、0.43%~32.85%、1.00%~15.53%、3.25%~36.52%、2.97%~51.24%。CK、S₁、S₂、E、S₁E、S₂E处理下土壤含水量分别为15.51%、17.14%、17.66%、16.33%、17.94%、18.91%;S₂E处理土壤蓄水保水效果最佳,S₂、S₁处理次之,E处理效果最差。由小麦扬花期、收获期到玉米抽雄期、收获期,不同处理下0~100 cm土壤含水量整体呈增长趋势,最大均值在玉米收获期(20.60%),最小均值在玉米抽雄期(8.63%)。相比于CK处理,其余处理均扩大了高含水区范围,且接种蚯蚓处理下土壤高含水区范围大于未接种蚯蚓处理。对小麦-玉米生长期土壤含水量影响因素相关分析结果显示,土壤含水量与>0.25 mm的大团聚体、SOC含量、TN含量呈显著正相关关系($P<0.05$),与0.053~0.25 mm、<0.053 mm的土壤团聚体、pH值、毛管孔隙呈显著负相关关系($P<0.05$)。可见,秸秆还田与蚯蚓活动有利于增加土壤含水量,扩大深层高含水区,提高土壤蓄水能力,进而提高降水利用效率。

关键词:土壤水分运移;小麦-玉米轮作;秸秆还田;蚯蚓活动

中图分类号:S344.13;S152.7;S31 **文献标志码:**A

Effects of straw returning and earthworm activity on soil water transport under wheat-maize rotation

HUO Rongrong, MA Li, XIONG Lijun

(Baoji University of Arts and Sciences, Key Laboratory of Disaster Monitoring and
Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: To explore the cultivation techniques of wheat and maize water efficient utilization in Guanzhong Plain, the method of spot observation in the field was used to study the effect of straw returning and earthworm inoculation on soil water content. The treatments included CK (control), S₁ (straw returned to the field 3 000 kg·hm⁻²), S₂ (straw returned to the field 6 000 kg·hm⁻²), E (inoculated earthworms), S₁E (straw returned to the field 3 000 kg·hm⁻²+ inoculated earthworms), S₂E (straw returned to the field 6 000 kg·hm⁻²+ inoculated earthworms). The results showed that: compared with CK, the soil water contents under S₁, S₂, E, S₁E and S₂E treatments increased by 0.21%~27.47%, 0.43%~32.85%, 1.00%~15.53%, 3.25%~36.52% and 2.97%~51.24%, respectively. The soil water contents under CK, S₁, S₂, E, S₁E, and S₂E treatments were 15.51%, 17.14%, 17.66%, 16.33%, 17.94% and 18.91%, respectively. S₂E treatment had the best water retention effect, followed by S₂ and S₁ treatment, and E treatment had the least obvious effect. From wheat flowering stage and harvest stage to maize despot stage and harvest stage, soil moisture content of 0~100 cm showed an overall increasing trend under different treatments, with the maximum mean value was 20.60% at maize harvest stage and the minimum mean value was 8.63% at maize despot stage. Compared with CK, other treatments expanded the range of high water cut areas, and the range of high water cut areas in soil treated with earthworms was larger than that without

收稿日期:2023-09-21

修回日期:2023-11-02

基金项目:国家自然科学基金(42007006);宝鸡文理学院研究生创新科研项目(YJSCX22YB64)

作者简介:霍蓉蓉(1999-),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为自然地理学。E-mail: huorongrong1999@163.com

通信作者:马莉(1982-),女,陕西延安人,副教授,主要从事土壤生态学研究。E-mail: mali4166@163.com

earthworms. The correlation analysis of factors affecting soil water content in wheat-maize growing period showed that soil water content was significantly positively correlated with large aggregates >0.25 mm, SOC content and TN content ($P<0.05$). It was significantly negatively correlated with soil aggregates, pH and capillary pores of 0.053~0.25 mm and <0.053 mm ($P<0.05$). In conclusion, the joint action of straw returning to field and earthworm activity increased soil water content and expands deep high water cut area.

Keywords: soil water transport; wheat-corn rotation; straw returning to field; earthworm activity

在农业生产中,秸秆作为有机肥料被广泛推广。秸秆本身的有机物质含量高,还入田中后能够促进土壤微生物活动,增加土壤碳、氮、磷、钾等营养元素含量^[1],提高土壤肥力^[2-3],改善土壤结构^[4],提高土壤蓄水保水能力^[5-6],减少地表水分蒸发^[7]。秸秆还田可以降低因长期使用化肥造成的严重土壤污染,也可以减少因焚烧秸秆而引起的大气污染^[8-9],从而起到改善生态环境的作用。李娜娜等^[10]研究认为,免耕与 100% 秸秆还田组合下玉米产量和水分利用效率最高,在秸秆还田下免耕和深松耕作方式对玉米田水分的集蓄保用有良好效果,以免耕秸秆还田效果最佳。宫亮等^[11]研究认为,秸秆还田能够增加土壤有机质含量,降低土壤容重,提高土壤田间持水量和土壤孔隙度,同时能够改善土壤的营养状况。

蚯蚓能够通过取食、排泄、分泌黏液、挖掘洞穴等活动显著改善土壤理化性质^[12],提高土壤通气透水能力和土壤肥力,改善土壤物质循环和能量流动^[13],被称为“生态系统工程师”^[14]。在秸秆还田时辅以蚯蚓处理,可加快秸秆向土壤有机碳的转化^[15]。Shuster 等^[15]在田间接种 100 条·m⁻²蚯蚓的长期定位试验表明蚯蚓能显著提高土壤碳库存量。蚯蚓取食各种 C/N 比的植物残体,并将其转变为较低的 C/N 比,通过这些产物增加微生物和植物可利用的氮,也提高了氮的循环速率。总之,蚯蚓活动主要通过直接或间接作用对土壤物理、化学及生物学性质产生影响。

目前,秸秆还田多与耕作方式相结合,研究其对作物产量及水分分布的影响;蚯蚓活动多与秸秆还田相结合,研究微生物群落或碳氮循环过程的作用机制。本研究将秸秆还田与蚯蚓活动相结合,分析二者互作对土壤含水量时空分布的影响,以期筛选出更适宜区域水分高效利用的农业措施,为关中地区农田管理提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于陕西省咸阳市杨陵区曹新庄农场试验田(34°18'N,108°05'E)进行,试验时间为 2021 年

10 月至 2022 年 10 月。该区域地处关中平原,为暖温带半湿润半干旱气候区,海拔 435~563 m,年均气温 12.9℃,年均日照时数 2 163.8 h,年平均降水量 637.6 mm,无霜期 220 d。土壤为壤土,其有机碳含量为 0.58~6.91 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.43~0.55 g·kg⁻¹。试验期降水与温度变化如图 1 所示。

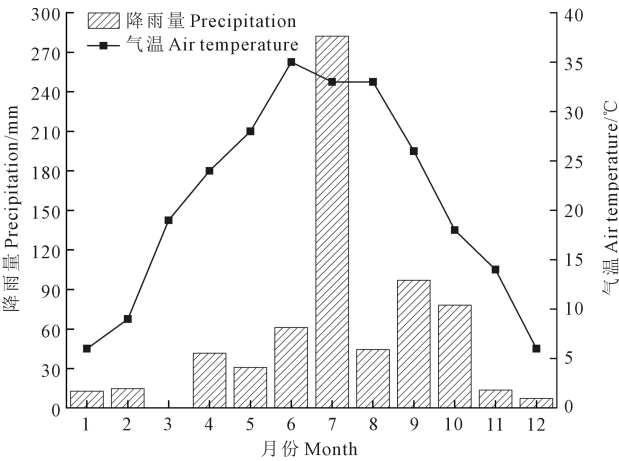


图 1 试验期月平均降水与温度

Fig.1 Average monthly precipitation and temperature during the experiment period

1.2 试验设计

供试小麦品种为‘小偃 22’,玉米品种为‘陕单 650’。小麦 2021 年 10 月 22 日播种,2022 年 6 月 1 日收获;小麦收获后免耕播种玉米,玉米 2022 年 6 月 18 日播种,10 月 22 日收获。小麦播种量为 60 g·m⁻²,行距 20 cm;玉米行距 60 cm,株距 30 cm,种植密度 5 万株·hm⁻²。分别于小麦播种后(2021-10-22)、玉米播种后(2022-06-18)立即将粉碎至 5 cm 的玉米秸秆表施还田。小麦季试验开始时,提前去除地表杂草及秸秆,使地面无覆盖,保证秸秆还田量的准确;接种蚯蚓前用超声波蚯蚓诱捕器移除本小区已有蚯蚓,然后进行人工接种蚯蚓,接种数量为 11 条·m⁻²。玉米季试验布设与小麦季一致。小麦、玉米均施史丹利金比例复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)。试验小区面积为 3 m×3 m,试验设计见表 1,每个处理重复 3 次,小区随机排列。

1.3 测定项目与方法

分别在小麦扬花期(2022-04-23)、小麦收获期(2022-06-10)、玉米抽雄期(2022-08-19)和玉米收获期(2022-10-21)在各个试验小区随机选取 1 个样点进行土壤样品的采集。利用土钻以 10 cm 为间隔采集 0~100 cm 的土壤样品,部分放入铝盒测定土壤含水量,部分放入灭菌自封袋运送至实验室,待其自然风干后用以测定 pH 值、土壤团聚体、土壤有机碳、土壤全氮含量。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理代码 Processing code	试验处理 Test treatment
CK	对照 Control
S ₁	秸秆还田 3000 kg · hm ⁻² Straw returned to the field 3000 kg · hm ⁻²
S ₂	秸秆还田 6000 kg · hm ⁻² Straw returned to the field 6000 kg · hm ⁻²
E	接种蚯蚓 Inoculated earthworms
S ₁ E	秸秆还田 3000 kg · hm ⁻² +接种蚯蚓 Straw returned to the field 3000 kg · hm ⁻² + inoculated earthworms
S ₂ E	秸秆还田 6000 kg · hm ⁻² +接种蚯蚓 Straw returned to the field 6000 kg · hm ⁻² + inoculated earthworms

土壤含水量测定(SWC)采用烘干法;pH 值测定采用电位法,水土比为 2.5 : 1;土壤团聚体测定采用干筛法,土壤有机碳含量(SOC)测定采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮含量(TN)测定采用凯氏定氮法。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理与分析,采用 Origin 2021 绘图。采用单因素方差分析(One-way ANO)和最小显著差异法(LSD)检验不同土层深度、不同处理的土壤含水量、土壤结构、土壤孔隙和土壤养分之间的差异($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田及蚯蚓活动下土壤含水量的变化特征

小麦-玉米生育期 0~100 cm 土壤含水量变化见图 2。各生育期不同处理 0~100 cm 土壤含水量呈先增加后减少趋势,最大值均出现在 S₂E 处理。土壤含水量由大到小依次为:小麦扬花表现为 S₂E>S₂>S₁>S₁E>E>CK;小麦收获期表现为 S₂E>S₁E>S₂>E>S₁>CK;玉米抽雄期表现为 S₂>S₂E>S₁>S₁E>E>CK;玉米收获期表现为 S₂E>S₂>S₁E>S₁>E>CK。

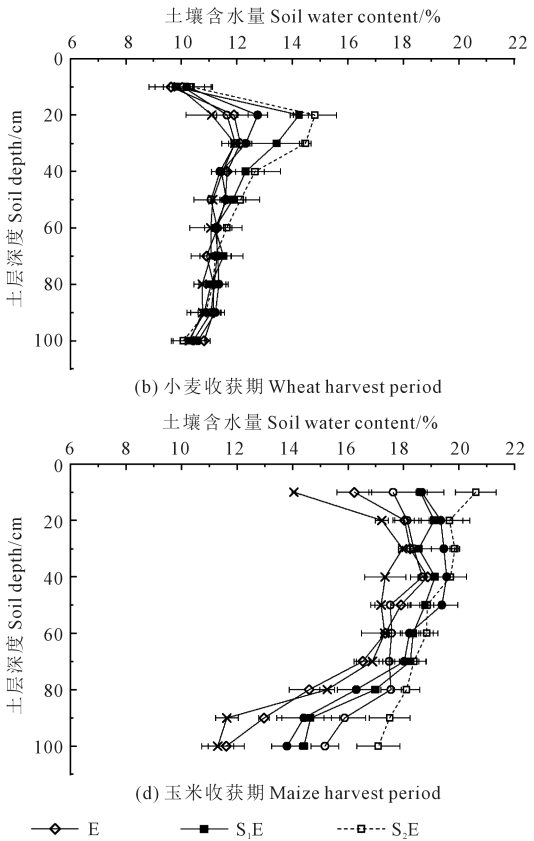
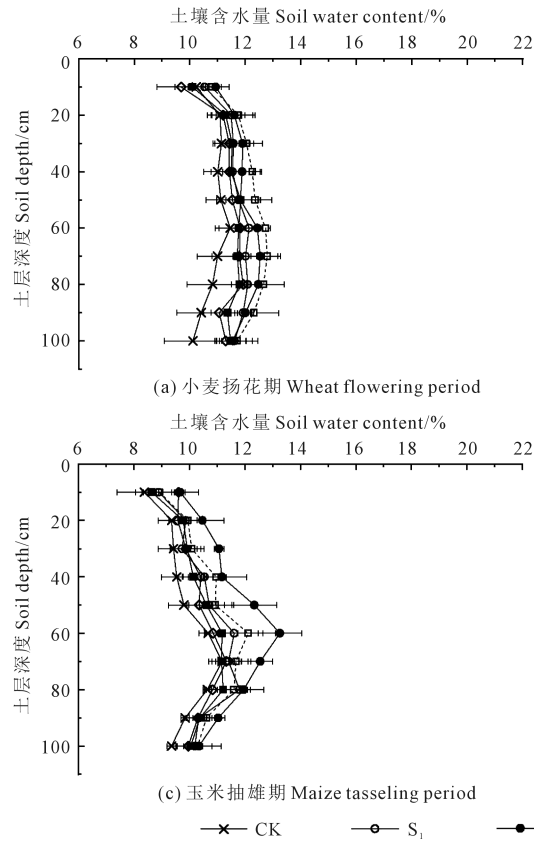


图 2 不同处理 0~100 cm 深度土壤含水量变化曲线

Fig.2 Variation curve of soil water content in 0~100 cm depth under different treatments

与 CK 相比, S_1 、 S_2 、E、 S_1E 、 S_2E 处理下, 小麦扬花期土壤含水量分别提高 1.85%~13.34%、4.67%~15.32%、1.00%~11.72%、3.63%~14.82%、5.96%~18.23%, 各处理间无显著差异 ($P>0.05$); 小麦收获期土壤含水量分别提高 0.21%~5.26%、0.43%~14.89%、1.40%~8.56%、3.63%~14.82%、2.97%~33.53%, 各处理在 10~40 cm 和 80~90 cm 土层深度存在显著差异 ($P<0.05$); 玉米抽雄期土壤含水量分别提高 1.42%~8.31%、6.13%~14.90%、1.87%~14.70%、3.70%~10.93%、10.53%~25.87%, 各处理在 40~60 cm 和 80~90 cm 土层深度存在显著差异 ($P<0.05$); 玉米收获期土壤含水量分别提高 1.49%~27.47%、5.18%~32.85%、0.18%~15.53%、3.25%~36.52%、8.82%~51.24%, 除 30~60 cm 土层外, 各处理在其余深度存在显著差异 ($P<0.05$)。

各生育期不同处理 0~100 cm 土壤含水量拐点出现在不同土层深度。小麦扬花期拐点出现在 S_2E 处理下的 70 cm 土层, 拐点土壤含水量为 12.79%; 小麦收获期拐点出现在 S_2E 处理下 30 cm 土层, 为 14.82%; 玉米抽雄期拐点出现在 S_2E 处理下 60 cm 土层, 为 13.26%; 玉米收获期拐点出现在 S_2E 处理下 30 cm 土层, 为 19.85%。

2.2 秸秆还田及蚯蚓活动下小麦-玉米生育期土壤含水量运移特征

图 3 为小麦-玉米生育期 0~100 cm 土壤含水量的时空分布图。不同处理下土壤含水量随月份推进整体呈增长趋势, 0~100 cm 土壤含水量的最大均值在玉米收获期 (20.60%), 最小均值在玉米抽雄期 (8.63%)。小麦-玉米生育期 0~100 cm 土层, CK、 S_1 、 S_2 、E、 S_1E 、 S_2E 处理下土壤含水量的最大均值依次为 17.96%、18.68%、19.55%、18.87%、19.14%、20.60%, 最小均值依次为 8.38%、8.63%、8.92%、9.61%、8.89%、9.66%, 与 CK 处理相比, 其余处理均提高了土壤含水量。

土壤含水量<12%的区域为低含水区, >12%的区域视为高含水区。各处理均在玉米抽雄期至收获期出现高含水区, 在小麦扬花期至收获期出现低含水区。在小麦扬花期, CK、 S_1 、E 处理无高含水区, S_2 、 S_1E 、 S_2E 处理的高含水区分别分布于 53~90、55~87、28~95 cm 深度; 在小麦收获期, CK、 S_1 、 S_2 、E、 S_1E 处理无高含水区, S_2E 处理的高含水区分布于 20~40 cm 深度; 在玉米抽雄期, CK、 S_1 、 S_2 、E、 S_1E 、 S_2E 处理的高含水区分别分布于 20~90、15~90、0~90、15~95、0~100、0~100 cm 深度; 在玉米收获期, 土壤含水量>16%的区域分布土层深度不同,

CK 处理为 20~70 cm, S_1 处理为 0~80 cm, S_2 处理为 0~80 cm, E 处理为 0~75 cm, S_1E 处理为 0~85 cm, S_2E 处理为 0~100 cm。对比 CK 处理, 各处理扩大了高含水区范围, 且 S_2E 处理的作用效果最明显。

2.3 秸秆还田及蚯蚓活动下土壤含水量运移的影响因素

在小麦收获期, 各粒径团聚体含量在不同处理表现出相似规律, 即团聚体主要集中在>0.25 mm 的大团聚体部分 (84.09%~91.11%); 0.053~0.25 mm 的微团聚体含量次之 (7.82%~13.17%); <0.053 mm 的黏砂砾含量最少 (1.07%~2.2%)。相比于 CK 处理, S_1 、 S_2 、E、 S_1E 、 S_2E 处理的大团聚体 (>0.25 mm) 含量分别提高 6.39%、1.86%、2.83%、8.35%、6.26%, 微团聚体含量 (0.25~0.053 mm) 分别减少 33.11%、7.15%、16.5%、42.9%、32.9%, 黏砂砾 (<0.053 mm) 含量分别减少 38.18%、26.82%、5.5%、51.4%、33.6%; 土壤容重分别降低了 4.84%、5.65%、1.61%、6.45%、16.13%; 土壤毛管孔隙含量减少 10.85%、11.31%、6.07%、12.70%、23.45%, 非毛管孔隙含量增加 10.84%、0.63%、14.10%、19.86%、36.02%。

在玉米收获期, >0.25 mm 的大团聚体含量最高 (95.05%~97.44%); 0.053~0.25 mm 的微团聚体含量次之 (1.66%~3.41%); <0.053 mm 的黏砂砾含量最少 (0.90%~1.54%)。相比于 CK 处理, S_1 、 S_2 、E、 S_1E 、 S_2E 处理的大团聚体含量分别提高 1.37%、0.84%、0.56%、2.17%、2.51%, 微团聚体含量分别减少 31.67%、23.17%、10.56%、51.32%、51.32%, 黏砂砾含量分别减少 14.29%、0.65%、11.69%、20.13%、41.56%; 土壤容重分别降低 1.35%、10.14%、14.19%、14.86%、16.22%; 土壤毛管孔隙含量减少 5.87%、7.40%、4.17%、6.89%、11.08%; 非毛管孔隙含量增加 20.98%、6.70%、18.29%、28.74%、48.28%。

秸秆还田+接种蚯蚓处理对大团聚体形成起积极作用, 对微团聚体及黏砂砾形成起抑制作用, 增加了非毛管孔隙含量, 减少毛管孔隙及总孔隙含量。

从图 4(a) 可知, 土壤含水量主要与>0.25 mm 的大团聚体、SOC 含量、TN 含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与 0.053~0.25 mm、<0.053 mm 的土壤团聚体呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。土壤含水量与土壤容重、非毛管孔隙含量、生育期气温与降水量呈正相关关系, 与 pH 值、毛管孔隙含量呈负相关关系, 但对土壤含水量的影响均未达到显著水平 ($P>0.05$)。

从图 4(b) 可知, 土壤含水量主要与>0.25 mm 的大团聚体、SOC 含量、TN 含量呈显著正相关关系

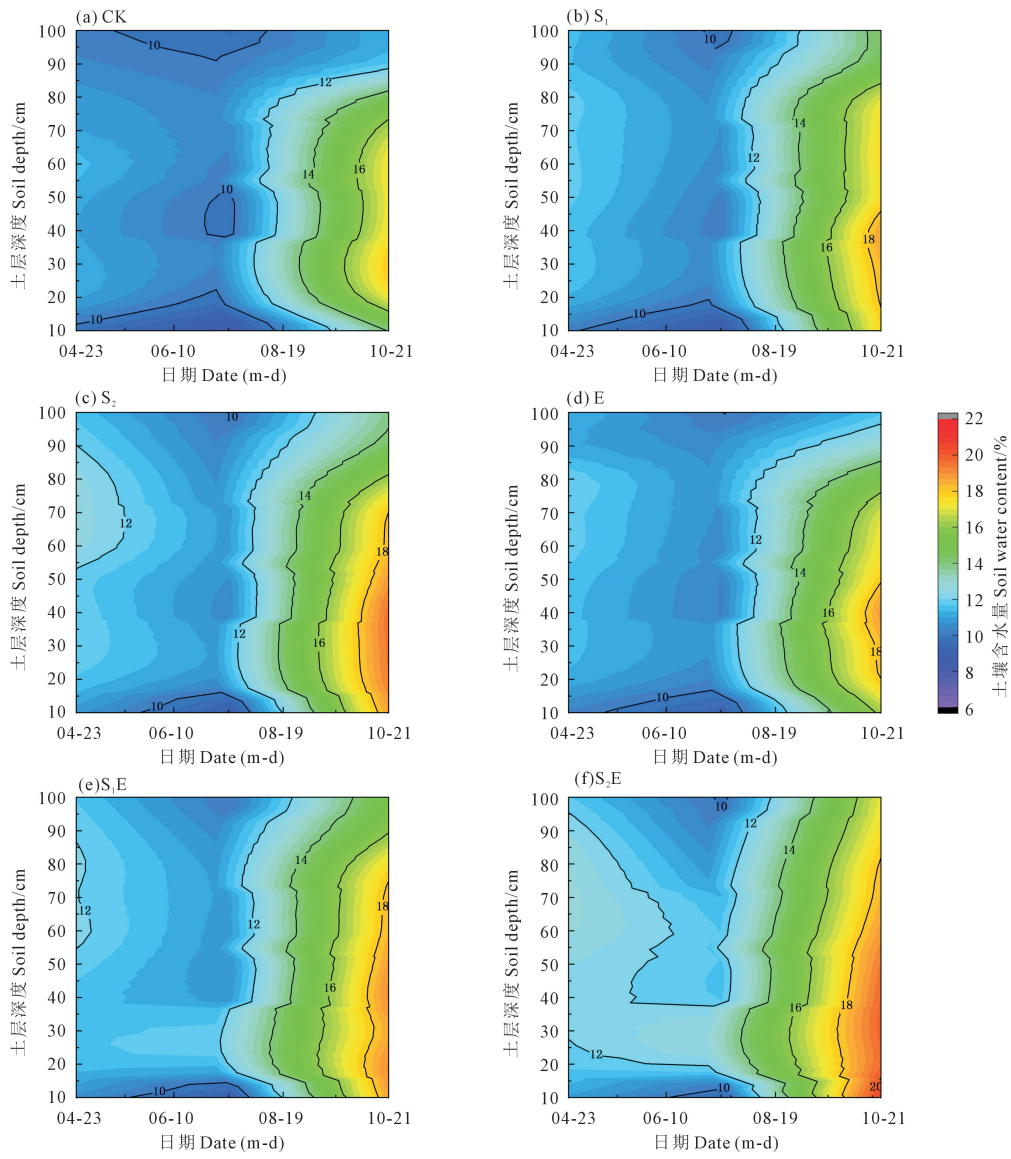
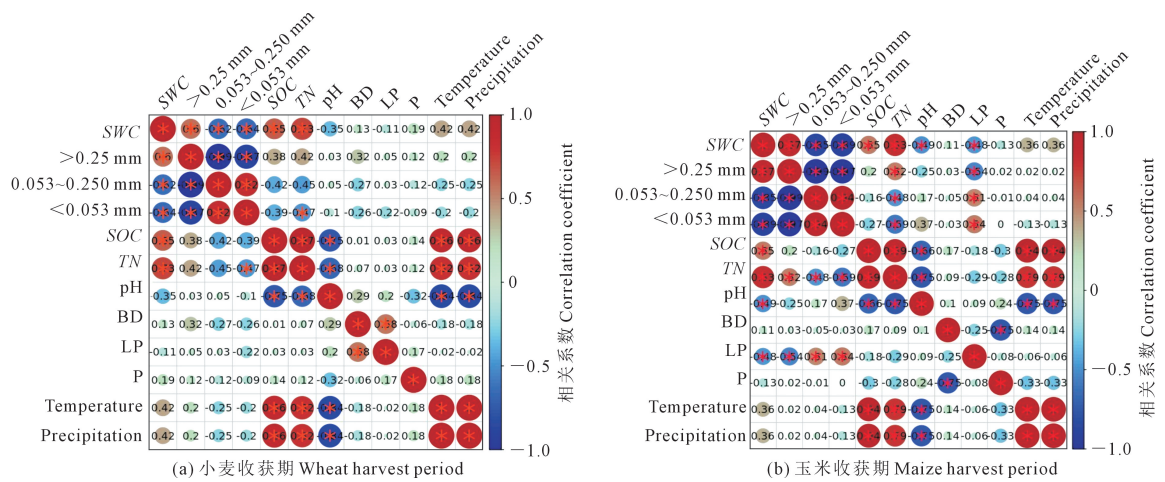


图 3 2022 年小麦各生育期土壤含水量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of soil water content in different growth stages of wheat in 2022



注：* 表示差异显著 ($P<0.05$)。BD:容重;LP:毛管孔隙;P:非毛管孔隙。
Note: * indicates significant differences ($P<0.05$). BD: Bulk density; LP: Lary porosity; P: Porosity.

图 4 不同时期 0~100 cm S_2E 处理下土壤含水量与其影响因子的相关性

Fig.4 Correlation between soil water content and its influencing factors under 0~100 cm S_2E treatment at different periods

($P<0.05$),与 0.053~0.25 mm、 <0.053 mm 的土壤团聚体、pH 值、毛管孔隙呈显著负相关关系($P<0.05$)。土壤含水量与土壤容重、生育期气温和降雨量呈正相关关系,与非毛管孔隙呈负相关关系,但对土壤含水量的影响未达到显著水平($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 秸秆还田下蚯蚓活动对土壤水分运移的影响机理

关中平原地区降水量年际变化大,而降水分布不均,是限制农业发展的重要因素。如何促进降水入渗,减少土壤水分蒸发对该地区农作物丰产意义重大。本研究发现,在小麦-玉米生育期,0~100 cm 土层深度,各处理较 CK 均增加了土壤含水量, S_1 处理下土壤含水量增加了 0.21%~32.85%, E 处理增加了 1.00%~15.53%, S_1E 处理增加了 3.25%~36.52%, S_2E 处理增加了 2.97%~51.24%。 S_1 、 S_2 处理下土壤含水量高于 E 处理,分析认为秸秆通过隔断土壤与外界联系来大幅降低土壤水分的无效蒸发,达到蓄水保墒的效果^[15],但蚯蚓通过掘穴等活动增加土壤大孔隙数量及连通性等^[16],使深层土壤向表面开放,造成土壤水分的无效蒸发。 SE 处理下土壤含水量高于 E 处理,可能是因为秸秆表施,为土壤提供众多外源有机质,外源有机质的矿化分解是土壤有机碳的重要来源之一^[17]。蚯蚓将土壤表面的凋落物残体混入土壤中,增加土壤有机碳含量,促进土壤团聚体的形成,增加土壤有机碳稳定性^[18]。陈浩等^[19]研究表明,种植作物与施肥有利于蚯蚓的生长繁殖。土壤生物种群的结构、大小和活动受作物残渣输入的影响^[20],作物残渣较多的农田能支持更多的蚯蚓种群^[21],秸秆还田为蚯蚓活动提供了足够的营养物质。

本研究发现,相比于 CK 处理,各处理均扩大了高含水率范围,且 S_2E 处理的作用最明显,可能是秸秆覆盖于地表形成物理阻隔层的同时便于雨水入渗,形成良好的增墒效果。对比 S_1 、 S_2 、 E 处理发现, S 处理高含水率范围更大;对比 CK 与 E 处理、 S_1 与 S_1E 处理、 S_2 与 S_2E 处理发现, E 、 S_1E 、 S_2E 处理高含水率范围更大。蚯蚓排出大量蚓粪,具有调和水汽的作用,且蚓粪覆盖对土壤水分蒸发有一定的抑制作用^[22]。蚯蚓活动增加了土壤孔隙,形成水分输送通道,产生入渗优先流,提高土壤含水量,增加水分入渗深度。农田土壤含水量垂直变化与蚯蚓活动、秸秆还田及当年降水量分布密切相关。小麦扬花期拐点出现深度较深可能是因为 4 月份温度适宜,

蚯蚓活动频繁,形成大量孔隙,利于水分渗入土体。玉米抽雄期拐点出现深度较深可能是因为 8 月份降水充足,大量地表水渗入地下。总之,在土壤中添加蚯蚓能够减少土壤水分蒸发,且相较于单施加秸秆或单接种蚯蚓而言,秸秆与蚯蚓共同作用下土壤含水量的增加更为明显,这与赵萍等^[23]的研究结果一致。

3.2 土壤水分运移的主要影响因素分析

小麦-玉米生长期土壤含水量与土壤结构及土壤养分的相关分析显示,土壤含水量主要与 >0.25 mm 的大团聚体、SOC 含量、TN 含量呈显著正相关关系,与 0.053~0.25 mm、 <0.053 mm 的土壤团聚体、pH 值、毛管孔隙呈显著负相关关系($P<0.05$)。一方面,蚯蚓通过掘穴等活动增加土壤非毛管孔隙,减少土壤毛管孔隙,形成水分入渗通道,影响土壤含水量的运移。MA 等^[24]测定了土壤孔隙空间分布特征,认为蚯蚓孔洞主要集中在土壤表层。蚯蚓活动增加了土壤大孔隙度、孔隙直径和孔隙连通性等,使深层土壤向表面开放,增加了水汽输送通道,有利于水分传输^[25]。蚯蚓活动也会产生大量蚯蚓粪,蚯蚓粪是保水性能良好的大团聚体,能提高土壤渗透率和保水性,增加土壤含水量^[22]。本研究结果显示,在玉米收获期,高含水率最为明显。原因可能在于土壤水分影响蚯蚓活性,土壤水分含量较低时,蚯蚓活性减小,蚯蚓活动对土壤性质影响减弱;反之,土壤性质的影响作用相应增强^[26]。关中地区 10 月份降水量大,且温度相对于小麦收获期与玉米抽雄期有所下降,适宜的温度使蚯蚓活动更剧烈,形成大量水分入渗通道,也于地表产生蚯蚓粪,形成结皮层,加上地表秸秆覆盖处理,阻止了水分无效蒸发的同时保留了大量水汽,促进了 50~70 cm 土层土壤含水量的增加。

蚯蚓主要以凋落物和土壤中的有机物质为食物来源^[27],秸秆还田提供了大量的作物残渣,蚯蚓活动加速作物残渣分解,有机质含量增加,为蚯蚓活动提供能量来源,使蚯蚓活动更加剧烈。蚯蚓也会通过取食、混合土壤及调节有机质等活动,使土壤有机碳含量增加^[28];蚯蚓可显著促进氮矿化,并提高土壤有效态氮的含量^[29];富含有机碳与全氮的土壤肥力较高,蚯蚓活动频繁,形成大量孔隙。本试验结果显示,接种蚯蚓与秸秆还田均是提高土壤含水量的有效措施,关中地区作为雨养农业区,土壤含水量的适当提高,必将增加小麦、玉米的产量。陈宣伊等^[30]研究也表明,滴灌水处理可在增加土壤贮水量的同时使玉米显著增产。郑凤君等^[31]的研

究也显示免耕覆盖可改善土壤团聚体结构,增加土壤水分含量,提高小麦水分利用效率,从而实现作物增产效应。

4 结 论

1)在小麦-玉米生育期,各处理较 CK 均增加了 0~100 cm 土层土壤含水量,S 处理使土壤含水量增加了 0.21%~32.85%,E 处理增加了 1.0%~15.53%,S₁E 处理增加了 3.25%~36.52%,S₂E 处理增加了 2.97%~51.24%。不同小麦、玉米生育期均显示,S₂E 处理下的土壤含水量高于其他处理,蓄水保水效果最佳。

2)不同处理下土壤含水量随月份推进整体呈增长趋势,0~100 cm 土壤含水量的最大均值在玉米收获期,为 20.60%,最小均值在玉米抽雄期,为 8.63%。相比于 CK 处理,各处理均扩大了高含水范围。其中,接种蚯蚓后(E、S₁E、S₂E)与未接种蚯蚓(CK、S₁、S₂)处理对比,接种蚯蚓后所提高的土壤高含水范围更大。

3)对小麦-玉米生长期土壤含水量影响因素的相关分析显示,土壤含水量与>0.25 mm 的大团聚体、SOC 含量、TN 含量呈显著正相关关系($P<0.05$),与 0.053~0.25 mm、<0.053 mm 的土壤团聚体、pH 值、毛管孔隙呈显著负相关关系($P<0.05$)。在秸秆+蚯蚓处理下,蚯蚓通过改变土壤团聚体组成、土壤孔隙和肥力,进而影响了土壤水分含量。可见,在关中平原地区小麦、玉米轮作中,接种蚯蚓+秸秆覆盖可作为一种提高土壤水分的生态耕作方式,实现提质增产。

参 考 文 献:

[1] 陈云峰,夏贤格,杨利,等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 299-307.
CHEN Y F, XIA X G, YANG L, et al. Straw return is the realistic way of straw resource utilization[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (6): 299-307.

[2] 邹洪涛, 关松, 凌尧, 等. 秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1398-1402.
ZOU H T, GUAN S, LING Y, et al. Effect of different straw return years on humus composition of soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1398-1402.

[3] 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.

[4] 赵伟, 陈雅君, 王宏燕, 等. 不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和

物理性状的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 98-102.
ZHAO W, CHEN Y J, WANG H Y, et al. Impact of different straw return systems on nitrogen and physical characters in blacksoil [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(6): 98-102.

[5] 蔡太义, 贾志宽, 黄耀威, 等. 不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 238-243.
CAI T Y, JIA Z K, HUANG Y W, et al. Effects of different straw mulch rates on soil water conservation and water-saving benefits in spring maize field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S1): 238-243.

[6] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 299-306.
ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 299-306.

[7] 柏会子, 王洋, 石海, 等. 秸秆不同还田方式对土壤蒸发特性影响[J]. 土壤与作物, 2012, 1(4): 241-247.
BAI H Z, WANG Y, SHI H, et al. Influence of different straw-returning approaches on soil evaporation characteristics[J]. Soil and Crop, 2012, 1(4): 241-247.

[8] LI R F, RUAN X H, BAI Y, et al. Effect of wheat-maize straw return on the fate of nitrate in groundwater in the Huaihe River Basin, China [J]. The Science of the Total Environment, 2017, 592: 78-85.

[9] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(Part 2): 2695-2702.

[10] 李娜娜, 李志强, 黄学芳, 等. 不同耕作方式下秸秆还田对晋中玉米田水分时空分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 312-319.
LI N N, LI Z Q, HUANG X F, et al. Effects of straw returning on spatio-temporal distribution of water and maize yield under different tillage methods in Jinzhong [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 312-319.

[11] 宫亮, 孙文涛, 王聪翔, 等. 玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 122-124, 130.
GONG L, SUN W T, WANG C X, et al. Effects of application maize straw on soil physical characteristics and yield [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2): 122-124, 130.

[12] 陈平, 赵博, 杨璐, 等. 接种蚯蚓和添加凋落物对油松人工林土壤养分和微生物量及活性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 63-71.
CHEN P, ZHAO B, YANG L, et al. Effects of earthworm and litter application on soil nutrients and soil microbial biomass and activities in Pinus tabulaeformis plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 63-71.

[13] CUNHA L, BROWN G G, STANTON D W G, et al. Soil animals and pedogenesis the role of earthworms in anthropogenic soils [J]. Soil Science, 2016, 181(3/4): 110-125.

[14] 卢明珠, 吕宪国, 管强, 等. 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1209-1225.
LU M Z, LV X G, GUAN Q, et al. Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism

- [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1209-1225.
- [15] SHUSTER W D, SUBLER S, MCCOY E L. Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 983-996.
- [16] 程思远, 李欢, 梅慧玲, 等. 接种蚯蚓与添加有机物料对茶园土壤结构的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 259-268.
- CHENG S Y, LI H, MEI H L, et al. Effects of earthworms and organic materials on soil structure in tea plantation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 259-268.
- [17] 于建光. 蚯蚓活动对农田土壤有机碳转化的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- YU J G. Effects of earthworm activities on turnover of soil organic carbon in agro-ecosystem[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [18] 袁新田, 焦加国, 朱玲, 等. 不同秸秆施用方式下接种蚯蚓对土壤团聚体及其中碳分布的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 968-974.
- YUAN X T, JIAO J G, ZHU L, et al. Effects of earthworm activity on soil aggregates' stability and organic carbon distribution under different manipulations of corn straw[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 968-974.
- [19] 陈浩, 肖庆亮, 李治模, 等. 蚯蚓对植烟黄壤长期种植施肥模式和土壤肥力变化的响应[J]. *山地农业生物学报*, 2023, 42(1): 1-7.
- CHEN H, XIAO Q L, LI Z M, et al. Response of soil earthworms to long-term cropping and fertilization patterns in a tobacco-grown yellow soil[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2023, 42(1): 1-7.
- [20] SAUVADET M, CHAUVAT M, CLUZEAU D, et al. The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 262-274.
- [21] LAVELLE P. Biology and ecology of earthworms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1997, 64(1): 78-79.
- [22] 李彦霁, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪覆盖对降雨后黄土区土壤水分影响的室内模拟研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(1): 89-95.
- LI Y P, SHAO M A, WANG J A. Laboratory simulation for the effects of earthworm cast mulching on soil moisture in the loess area after rainfall[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(1): 89-95.
- [23] 赵萍, 李瑞英, 杨晨, 等. 蚯蚓和玉米秸秆分解过程中土壤含水量的变化特征[J]. *农村经济与科技*, 2021, 32(16): 37-39.
- ZHAO P, LI R Y, YANG C, et al. Changes of soil water content during the decomposition of earthworms and corn stalks[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2021, 32(16): 37-39.
- [24] MA L, SHAO M A, FAN J, et al. Effects of earthworm (*Metaphire guillelmi*) density on soil macropore and soil water content in typical Anthrosol soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 311: 107338.
- [25] 吴继强, 张建丰, 高瑞. 不同大孔隙深度对土壤水分入渗特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 91-95.
- WU J Q, ZHANG J F, GAO R. The effect of the infiltration characteristics under the different macropores' depth in the soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 91-95.
- [26] 李东升, 周为华, 范佳, 等. 秸秆还田对土壤特性和作物生产的影响[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(15): 158-161.
- LI D S, ZHOU W H, FAN J, et al. Effects of straw returning on soil characteristics and crop production[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(15): 158-161.
- [27] 董振洁, 张东宏, 杨圆圆, 等. 蚯蚓活动对秦岭天然林林地土壤养分的影响[J]. *西南林业大学学报*, 2020, 40(5): 100-107.
- DONG Z J, ZHANG D H, YANG Y Y, et al. Effects of earthworm activities on soil nutrients in forest lands of the Qinling Mountains[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2020, 40(5): 100-107.
- [28] DEGENS B P. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, 35(3): 431-460.
- [29] 张珂珂, 宋晓, 郭斗斗, 等. 长期施肥措施下潮土土壤碳氮及小麦产量稳定性的变化特征[J]. *华北农学报*, 2021, 36(3): 142-149.
- ZHANG K K, SONG X, GUO D D, et al. Variation characteristics of soil organic carbon, nitrogen and the stability of wheat yield in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3): 142-149.
- [30] 陈宣伊, 师晶晶, 张向前, 等. 滴灌水量对土壤水分变化特征和玉米水分利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(9): 38-48.
- CHEN X Y, SHI J J, ZHANG X Q, et al. Effects of drip irrigation amount on water variation characteristics of soil and water use efficiency of maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 38-48.
- [31] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 596-607.
- ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 596-607.