·作物水肥高效利用·
文章编号：1672 - 3317（2024）01 - 0001 - 08

水分及秸秆覆盖对夏玉米土壤呼吸及碳平衡的影响

张笑培[1,2,3]，常 晓[2]，杨慎骄[1,2]，王和洲[1,2]，周新国[1*]
（1.中国农业科学院农田灌溉研究所，河南 新乡 453002；2.河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站，河南 商丘 476000；3.天津农学院 人文学院，天津 300392）

摘 要：【目的】充分发挥秸秆覆盖与适宜灌溉对作物增产及土壤固碳减排的各自优势及二者协同效应，建立减排增产节水的高效农田管理模式。【方法】以豫东地区夏玉米为研究对象，设置覆盖方式（秸秆覆盖（S）和无覆盖（N））和灌水控制下限（田间持水率（*FC*）的 50%（W1）、60%（W2）、70%（W3）、80%（W4））两因素试验，系统研究水分及秸秆覆盖对土壤碳排放总量、土壤微生物异氧呼吸碳释放量和农田净初级生产力固碳量影响。【结果】秸秆覆盖和灌水增加了土壤呼吸、农田净初级生产力固碳量和土壤微生物异氧呼吸碳释放量，其中 SW4 处理均最高，与 SW3、NW4 处理差异不显著。SW3 处理净生态系统生产力（*NEP*）和碳排放效率均最高，分别较其他处理高 3.99%~245.74%和 2.35%~138.80%。与 SW4 处理相比，SW3 处理在节约灌水的前提下，农田净生态系统生产力提高 2.99%，碳排放效率提高 2.35%。【结论】综合考虑农田净生态系统生产力和碳排放效率，SW3 处理（灌水控制下限为 70%FC+秸秆覆盖）可以作为节水、减排、增产的农田管理模式。

关 键 词：秸秆覆盖；土壤水分；夏玉米；土壤呼吸；碳平衡
中图分类号：S181；S274.1 **文献标志码：**A doi：10.13522/j.cnki.ggps.2021446 OSID：

张笑培，常晓，杨慎骄，等. 水分及秸秆覆盖对夏玉米土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 1-8.
ZHANG Xiaopei, CHANG Xiao, YANG Shenjiao, et al. Effects of water and straw mulching on soil respiration and carbon balance in summer maize farmland[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 1-8.

0 引 言

【研究意义】大气 CO_2 浓度升高导致全球气候变化已受到科学界的广泛关注[1-2]。农田土壤碳库是全球碳库中最为活跃的部分，受人为因素干扰，可在较短时间尺度上调节[3-4]。农田生态系统主要通过土壤呼吸向大气释放 CO_2[5-7]；作物通过光合作用，从大气中吸收 CO_2，提高陆地碳储量[8-9]。通常农田-土壤-作物生态系统表现为大气 CO_2 的汇，农田管理措施可以改变碳汇的程度[10-11]。采取适宜的农田管理措施，减少农田土壤碳排放，增加碳固持，对于农业可持续发展具有重要意义。【研究进展】土壤水分是农田碳循环关键因子，可以影响植物光合作用、土壤 CO_2 排放[12-13]。灌溉措施通过改变农田土壤水热环境，使土壤微生物活性及种群发生变化，直接影响作物生长，改变农田碳平衡[14-15]。在一定土壤含水率范围内，增加灌水量可以促进农田净初级生产力固碳量和土壤呼吸碳排放量[9,15]。秸秆覆盖还田是旱作农田常见的耕作措施，通过调节土壤温度，减缓农田棵间土壤蒸发，增加土壤有机碳输入，直接影响土壤呼吸和作物生长[16-20]。大多研究[17-18]认为秸秆覆盖有较好的蓄水作用，改善土壤透气性、增加表层土壤有机碳量和微生物活性组成，提高作物产量，促进 CO_2 释放；也有研究[16]表明秸秆覆盖对冬小麦生育期内土壤呼吸总量无显著影响。【切入点】节水、减排是中国现代农业发展的主要方向之一，研究旱作农业节水型低碳农业管理模式具有重要现实意义[21-24]。秸秆覆盖与节水灌溉相结合，对降低作物耗水量、提高作物产量、增加农田有机碳量具有互补的效应[23-27]。【拟解决的关键问题】本研究以夏玉米农田为研究对象，系统分析不同管理措施下农田生态系统碳平衡和农田碳排放效率的变化规律，以期为建立节水高产、低碳减排的农田管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 6—9 月在河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站（E 115°34′，N 34°35′）防

收稿日期：2021-09-15 **修回日期：**2023-09-23
基金项目：中国农业科学院基本科研业务费专项（FIRI20210103）；公益性行业（农业）科研专项经费项目（201203077）
作者简介：张笑培（1978-），女。副研究员，主要从事农业资源高效利用研究。E-mail: xiaopeihb@163.com
通信作者：周新国（1970-），男。研究员，主要从事农业排水技术研究。E-mail: frizhouxg@126.com
©《灌溉排水学报》编辑部，开放获取 CC BY-NC-ND 协议

雨棚测坑中进行。每个测坑面积为 6.14 m^2（3.2 m×1.92 m），测坑深度为 2 m，底部铺有 20 cm 的细沙，测坑底部安装有排水管，多余水分可以通过排水管排出坑外。

测坑内土壤为砂质壤土，0~40 cm 土层平均干体积质量为 1.33 g/cm^3，平均田间持水率为 0.30 cm^3/cm^3，土壤有机质量为 7.2 g/kg，碱解氮、速效磷、速效钾量分别为 48.09、10.08、93.38 mg/kg。

试验区属暖温带亚湿润季风性气候，多年平均降水量 708 mm，平均气温 13.9 ℃。2013 年夏玉米生长季 6—9 月平均气温 26.6 ℃，平均最低气温、最高气温分别为 22.3 ℃和 31.7 ℃，生育期降水量 328 mm，占全年降水量的 59.4%。

1.2 试验设计

试验为二因素裂区试验，主区为覆盖处理（N：秸秆不覆盖，冬小麦收获后将地表秸秆和根茬全部清除；S：秸秆全量覆盖，冬小麦收获后，将地表秸秆和根茬全部移出并粉碎，整地后播种夏玉米，夏玉米出苗后将粉碎后的小麦秸秆（长度 5~10 cm）全部均匀覆盖还田（还田量为 9 000 kg/hm^2）；副区为水分处理（灌水控制下限分别为田间持水率（*FC*）的 50%（W1）、60%（W2）、70%（W3）、80%（W4））。夏玉米拔节前、拔节到抽雄期和抽雄期后的灌水计划土壤湿润层深度分别为 40、60、80 cm。采用二因素完全组合，共 8 个处理，每个处理 3 次重复。

灌溉方式采用地面畦灌，灌溉水源为地下水。每个测坑设计独立的灌溉单元，分别安装阀门、水表和直径为 3 cm 的软水管。当计划湿润层土壤含水率达到或接近灌水控制下限时进行灌溉。灌水定额为设定水平+20%田间持水率。在夏玉米关键生育期测定土壤含水率并计算灌水量。

供试夏玉米品种为郑单 958，等行距点播种植，行距 50 cm，株距 25 cm。6 月 6 日播种，9 月 26 日收获。全生育期施纯氮 300 kg/hm^2，在拔节期和大喇叭口期按 3∶7 分期开沟追施，拔节期施用复合肥（N-P_2O_5-K_2O：30-6-0），大喇叭口期追施尿素（总氮≥46.4%），其他管理同一般大田。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤含水率测定

采用 TRIME（TRIME-FM,IMKO, Ettlingen, DE, Germany）土壤水分测定仪结合烘干法分层（20 cm）测定夏玉米农田 0~80 cm 土层土壤体积含水率。依据式（1）计算水分处理阶段灌水量（mm）。因测坑填土上下基本一致，土壤水分计算用 0~40 cm 土壤平均田间持水率。

$$M=10\times(0.30\times(Xi+20\%)-\theta_0)\times h, \quad (1)$$

式中：*M* 为灌水量（mm）；*h* 为土层厚度（cm）；0.30 为土壤平均田间持水率（cm^3/cm^3）；*Xi* 为设置的土壤水分控制水平（*Xi*=50%，60%，70%，80%）；θ_0 为灌水前计划湿润层平均土壤含水率（cm^3/cm^3）[23]。

1.3.2 土壤呼吸

采用 LI-6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 土壤呼吸室测定土壤呼吸速率。测定基座放置在相邻 2 行的 4 棵玉米之间，插入土壤深度为 2 cm，作为气室连接 Li-6400 的呼吸探头，测定时仪器直接输出结果[8]。在夏玉米拔节期、开花期、灌浆期、成熟期分别选取典型日测定土壤呼吸。测定时间统一为 09:30—11:00，此时土壤呼吸速率最为接近 24 h 均值[14]。

1.3.3 作物生物量及籽粒产量测定及计算

在夏玉米成熟期选取长势均匀一致的 10 株植物样，将玉米穗和秸秆分离，秸秆部分在干燥箱中 105 ℃杀青 30 min 后，75 ℃烘干至恒质量，用电子天平称量质量；将玉米穗进行考种，晒干脱粒，计算籽粒产量[9]。最后计算不同处理夏玉米地上部生物量。根系生物量采用参数计算，夏玉米根系生物量按收获籽粒生物量的 34%计算[24]。

1.3.4 土壤碳累积排放量

土壤碳累积排放量计算式[18-19]为：

$$C_R=\sum\left[\frac{(R_i+R_{i+1})}{2}\right]\times 3\,600\times 24\times 12\times 10^{-5}\times n, \quad (2)$$

式中：C_R为土壤碳累积排放量（kg/hm^2）；R_i和R_{i+1}为第*i*次和第*i*+1次测定的土壤呼吸速率（μmol/（m^2 s））；*n*为相邻2次测定间隔时间（d）；3 600×24表示将秒转化为天；12为C的摩尔质量；10^{-5}表示将μg/m^2转化为kg/hm^2。

1.3.5 农田生态系统碳平衡计算

用净生态系统生产力 *NEP* 表示农田生态系统碳平衡[28-30]，*NEP* 计算式为：

$$NEP=C_{NPP}-C_{Rm}, \quad (3)$$

式中：C_{NPP} 表示净初级生产力固碳量；将作物地上部与根系的生物量作为 *NPP*。作物地上部和根的含碳量均取 45%（据相关研究结果估算，作物光合过程合成 1 g 有机质需要吸收 0.45 g C）[28]。

C_{Rm}为土壤微生物异氧呼吸碳释放量，计算式为：

$$C_{Rm}=\alpha C_R, \quad (4)$$

式中：α为土壤微生物异氧呼吸对土壤呼吸碳释放量的贡献率，本文α取 47%[9]。

1.3.6 农田碳排放效率

农田碳排放效率（*CE*）指作物生长期间土壤每排放1 kg碳所产生的籽粒产量[19]，计算式为：

$$CE=Y/C_R, \quad (5)$$

式中：*Y*为作物籽粒产量（kg/hm^2）。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 整理汇总，用 SPSS17.0 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤呼吸动态变化

夏玉米土壤呼吸速率随生育期推进逐渐增加，至开花期达到峰值，随后开始下降（图 1 中同一生育期不同字母表示处理间有显著差异（P<0.05））。夏玉米生育期内土壤呼吸介于 3.16~6.08 μmol/（m^2·s）。比较各处理全生育期土壤呼吸速率均值可知，夏玉米生育期内各处理土壤呼吸速率表现为NW1 处理<SW1 处理<NW2 处理<SW2 处理<NW3 处理<SW3 处理<NW4 处理<SW4 处理。相同灌水条件下，与无覆盖处理相比，拔节期、开花期、灌浆期、成熟期秸秆覆盖处理土壤呼吸速率分别增加了 2.14%~4.76%、1.55%~3.92%、0.30%~0.66%、0.49%~2.19%。相同覆盖处理下，拔节期、开花期、灌浆期、成熟期 SW2、SW3、SW4 处理土壤呼吸速率较 SW1 处理增加 5.90%~10.42%、5.96%~16.16%、7.45%~12.99%、6.80%~15.14%；NW2、NW3、NW4 处理较 NW1 处理分别增加 4.96%~11.75%、5.67%~13.70%、7.46%~13.25%、5.72%~15.30%。

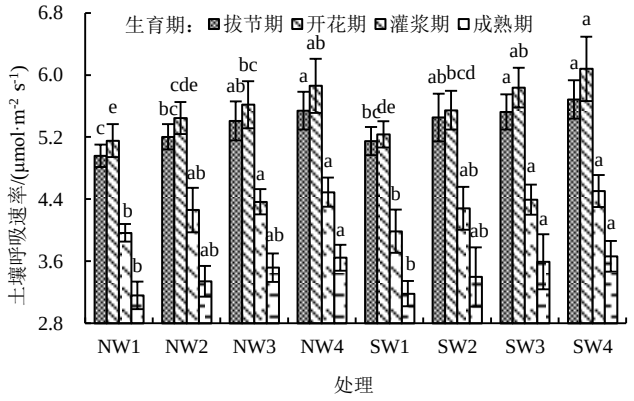

图 1 不同处理土壤呼吸速率

Fig.1　Soil respiration rate of different treatment

对不同生育时期各处理土壤呼吸速率进行方差分析（表 1），结果表明，除拔节期秸秆覆盖处理土壤呼吸速率显著高于无覆盖处理（P<0.05），其他 3 个生育时期秸秆覆盖处理与未覆盖处理之间差异未达到显著水平；在各生育时期 W4 处理土壤呼吸速率均最高，除与 W3 处理差异不显著外，显著高于其他处理（P<0.05）。说明秸秆覆盖可以提高土壤呼吸速率，且在夏玉米生育前期增加效果显著，生育后期增加效果减弱；增加灌水可以显著提高土壤呼吸速率，但灌水量达到 W3 水平后，增加效果减弱。

表 1 土壤呼吸速率方差分析

Tab.1　Variance analysis of soil respiration rate　μmol/(m^2·s)

处理		拔节期	开花期	灌浆期	成熟期
W	W1	5.05c	5.19c	3.98c	3.17c
	W2	5.33b	5.50b	4.27b	3.37bc
	W3	5.47ab	5.73ab	4.38ab	3.56ab
	W4	5.61a	5.97a	4.50a	3.66a
GZ	N	5.28b	5.52a	4.27a	3.42a
	S	5.45a	5.67a	4.29a	3.46a
F 值	W	*	ns	ns	ns
	GZ	**	**	**	**
	W×GZ	ns	ns	ns	ns

注　W：灌水处理；GZ：覆盖方式。同列不同小写字母表示处理间在 P<5%水平上显著差异；*和**分别表示在 P<5%和 P<1%水平上差异显著，ns 表示差异不显著。在 W 处理中显示的数据为 2 种覆盖方式的平均值；在 GZ 处理中显示的数据是 4 种灌水处理的平均值。下同。

2.2 夏玉米农田系统作物固碳特征

夏玉米不同部位固碳量表现为秸秆>籽粒>根系（图 2 中同一作物部位上不同字母表示各处理间有显著差异（P<0.05））。表 2 为各处理夏玉米不同部位固碳量方差分析结果。由表 2 可知，秸秆覆盖和灌水均显著提高了夏玉米秸秆、籽粒、根系固碳量，其中秸秆覆盖处理显著高于无覆盖处理（P<0.05），W4、W3 处理显著高于 W2、W1 处理，但 W3、W4 处理间差异不显著。夏玉米各部位含碳量均以 SW4 处理最高，但与 SW3、NW4 处理差异不显著（P>0.05）。说明增加灌水量增加了夏玉米的固碳量，配合秸秆覆盖后固碳量增加，尤其是在低灌水水平下差异明显。

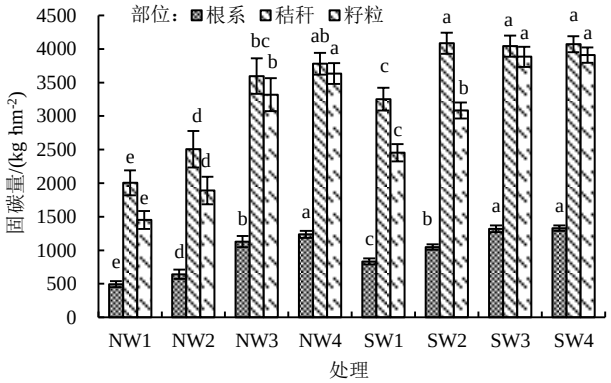

图 2 夏玉米农田生态系统作物固碳量

Fig.2　Amount of carbon sequestration of summer maize farmland ecosystem

夏玉米净初级生产力固碳量（C_{NPP}）总和为 3 948.79~9 310.18 kg/hm^2（表 3）。覆盖方式和灌水对夏玉米净初级生产力固碳量影响显著（P<0.05）（表 2）。同一灌水水平，秸秆覆盖处理净初级生产力固碳量较不覆盖处理增加 2.87%~92.73%。除 SW4 处理与 NW4 处理间无显著差异外，其他 3 个水分处理下秸秆覆盖处理均显著高于无覆盖处理。增加灌水对夏玉米净初

级生产力固碳量具有显著促进作用。同一覆盖方式下，随着灌水量增加，夏玉米净初级生产力固碳量增加，W4 处理除与 W3 处理差异不显著外，显著高于 W1、W2 处理（表 2）。SW4 处理净初级生产力固碳量最高，与 SW3、NW4 处理差异不显著，但显著高于其他处理，NW1 处理显著低于其他处理（P<0.05）（表 3）。说明秸秆覆盖和增加灌水可以促进夏玉米净初级生产力固碳量提高，但灌水量达到一定程度后增加效果减弱。

表 2 夏玉米固碳量方差分析

Tab.2 Variance analysis of carbon sequestration of summer maize kg/hm^2

处理		根系	秸秆	籽粒	C_{NPP}
W	W1	663.64c	2 627.55c	1 951.88c	5 243.06c
	W2	845.33b	3 295.73b	2 486.25b	6 627.30b
	W3	1 224.38a	3 818.67a	3 601.13a	8 644.17a
	W4	1 282.52a	3 926.09a	3 772.13a	8 980.74a
GZ	N	874.97b	2 971.71b	2 573.44b	6 420.12b
	S	1 132.97a	3 862.31a	3 332.25a	8 327.52a
F 值	W	**	**	**	**
	GZ	**	**	**	**
	W×GZ	**	**	**	**

2.3 农田土壤碳累积排放量、微生物异氧呼吸碳释放量及碳平衡

表 3 为不同处理土壤碳累积排放量和土壤微生物异氧呼吸碳释放量方差分析结果。由表 3 可知，土壤碳累积排放量和土壤微生物异氧呼吸碳释放量均表现为秸秆覆盖处理显著高于不覆盖处理（P<0.05）；不同灌水量间差异显著（P<0.05），W4、W3、W2 处理均显著高于 W1 处理，说明秸秆覆盖和增加灌水量可以显著提高农田土壤碳排放总量和土壤微生物异氧呼吸碳释放量。

不同处理土壤碳累积排放量表现为 SW4 处理>NW4 处理>SW3 处理>NW3 处理>SW2 处理>NW2 处理>SW1 处理>NW1 处理，SW4、NW4、SW3、NW3、SW2、NW2、SW1 处理分别较 NW1 处理高 5.87%、9.48%、13.06%、2.00%、8.50%、12.07%、15.60%，除 SW1 处理与 NW1 处理差异不显著外，其他处理均显著高于 NW1 处理（P<0.05）。其中，SW4 处理土壤碳累积排放量最高，但与 SW3、NW4 处理差异不显著（P>0.05）。

秸秆覆盖和灌水均增加了农田土壤微生物异氧呼吸碳释放量（表 3）。其中 SW4 处理最高，为 2 179.99 kg/hm^2，但与 SW3、NW4 处理差异不显著。相同灌水水平下，SW1、SW2、SW3、SW4 处理比 NW1、NW2、NW3、NW4 处理分别增加 2.00%、2.48%、2.37% 和 2.24%。无覆盖和秸秆覆盖条件下，W2、W3、W4 处理分别比 W1 处理增加了 5.87%~13.06% 和 6.37%~13.33%。说明灌水和秸秆覆盖均促进了夏玉米农田土壤微生物异氧呼吸碳释放量。

表 3 夏玉米农田生态系统碳平衡 kg/hm^2

Tab.3 Carbon balance of summer maize farmland ecosystem

处理	C_{NPP}	C_R	C_{Rm}	*NEP*
NW1	3 948.78 e	4 012.51 e	1 885.88 e	2 062.90 e
NW2	5 037.95 d	4 248.15d	1 996.63 d	3 041.32 d
NW3	8 042.44 b	4 392.88 bcd	2 064.65 bcd	5 977.78 b
NW4	8 651.29 ab	4 536.43 ab	2 132.12 ab	6 519.17 ab
SW1	6 537.34 c	4 092.79 e	1 923.61 e	4 613.73 c
SW2	8 216.65 b	4 353.44 cd	2 046.11cd	6 170.54 b
SW3	9 245.90 a	4 496.97 abc	2 113.58 abc	7 132.32 a
SW4	9 310.18 a	4 638.27 a	2 179.99 a	7 130.19 a

夏玉米农田碳平衡用净生态系统生产力（*NEP*）表示。由表 3 可知，各处理均表现为碳汇。与 NW1 处理相比，NW2、NW3、NW4、SW1、SW2、SW3、SW4 处理碳汇总量分别较 NW1 处理增加 47.43%、189.78%、216.02%、123.65%、199.12%、245.74%、245.64%。对各处理 *NEP* 进行方差分析，结果表明，秸秆覆盖和灌水显著增加了农田 *NEP*（P<0.05）。SW3 处理 *NEP* 最高，为 7 132.32 kg/hm^2，除与 SW4、NW4 处理差异未达到显著外，显著高于其他处理。NW1 处理最低，显著低于其他处理（P<0.05）。

相同灌水处理间比较，SW1、SW2、SW3、SW4 处理农田 *NEP* 分别比 NW1、NW2、NW3、NW4 处理对应增加 123.65%、102.89%、19.31%、9.37%。除 SW4 处理与 NW4 处理间差异不显著外，其他 3 个水分梯度下，秸秆覆盖处理均显著高于未覆盖处理。说明秸秆覆盖可以增加 *NEP*，尤其是在 W1、W2 水分处理条件下增加效果显著。相同覆盖条件下比较，NW3、NW4 处理 *NEP* 显著高于 NW2、NW1 处理，但 NW3、NW4 处理间无显著差异；SW3、SW4 处理 NEP 显著高于 SW1、SW2 处理，但 SW3、SW4 处理间差异不显著。说明增加灌水显著增加 *NEP*，在达到 W3 灌水水平后继续增加灌水量，*NEP* 增加效果减弱。

2.4 夏玉米农田碳排放效率

农田碳排放效率表示作物生育期内土壤排放每千克碳所能生产籽粒质量，可以反映农田经济-环境效益。除农田土壤碳排放总量，作物籽粒产量是影响农田碳排放效率的重要因素。将夏玉米籽粒产量进行方差分析，结果如图 3 所示。秸秆覆盖显著提高了夏玉米籽粒产量。增加灌水量，夏玉米籽粒产量呈增加趋势，但 W3 处理和 W4 处理差异不显著。说明在一定范围内增加灌水可以提高夏玉米籽粒产量，但增加到一定程度后（W3）增产效果减弱。

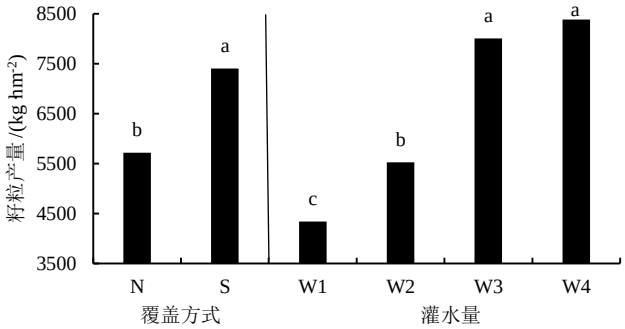

图 3 夏玉米籽粒产量方差分析

Fig.3　Grain yield of summer maize

秸秆覆盖和灌水均有利于提高夏玉米农田土壤碳排放效率（图 4）。其中 SW3 处理最高，除与 SW4 处理差异不显著外，显著高于其他处理；NW1 处理最低，显著低于其他处理（P<0.05）。

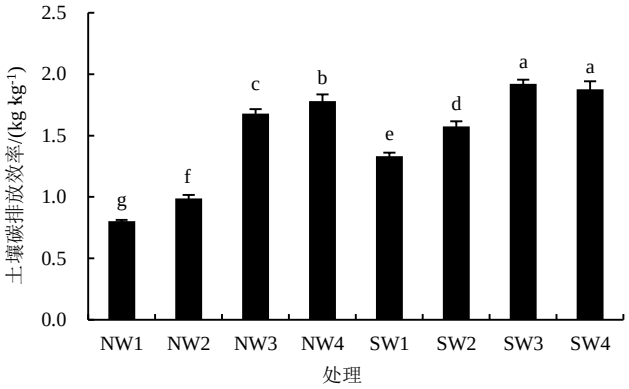

图 4 土壤碳排放效率

Fig.4　Soil carbon emission effective

相同灌水水平相比，SW1、SW2、SW3、SW4 处理土壤碳排放效率分别比 NW1、NW2、NW3、NW4 处理分别提高了 65.72%、59.15%、14.29%、5.28%。说明秸秆覆盖虽然增加了夏玉米农田土壤碳排放量，但是因为作物籽粒产量的增加，最终显著提高了土壤碳排放效率，尤其在低灌水条件下增加效果显著。

相同覆盖条件不同水分处理间农田碳排放效率比较，NW2、NW3、NW4 处理分别比 NW1 处理提高 23.66%、109.94%、122.67%，SW2、SW3、SW4 处理分别比 SW1 处理提高 18.38%、44.33%、41.01%。说明增加灌水可以显著提高农田碳排放效率，但达到一定灌水量后（W3）增加效果减弱。综合考虑农田碳排放效率，SW3 处理为最优组合。

3 讨 论

3.1 土壤水分和秸秆覆盖对土壤呼吸的影响

土壤水分通过影响植物根系分布深度、根系呼吸及土壤微生物活动影响土壤呼吸强度[31]。秸秆覆盖在为土壤提供养分的同时也对土壤微生物活性产生影响，促进土壤有机质矿化，进而引起土壤呼吸的变化[32]。旱作农田秸秆覆盖显著增加了土壤 CO_2 排放，并且土壤水分是影响土壤呼吸的重要因素[29]，土壤呼吸总量一般随灌水量增加呈先升高后降低的趋势[15]，这与本研究结果相似。本研究中秸秆覆盖结合中高灌水处理的夏玉米生育期土壤平均呼吸速率和呼吸总量高于无秸秆覆盖低灌水处理。随着灌水量的增加，土壤呼吸有增加趋势，但灌水量达到 W3 后，增加效果减弱。这说明在秸秆覆盖的基础上增加适宜的灌水量，有利于加速秸秆的腐解，增加土壤中有机质量，为土壤微生物提供更适宜的生存环境和较多的呼吸底物，促进了作物根系生长和微生物繁殖，土壤微生物活性增强，促进土壤有机质的矿化，引起土壤呼吸的变化[28-29]。

本研究中夏玉米生育前期同一灌水水平下秸秆覆盖处理土壤呼吸速率较无覆盖处理增加量较多，生育后期差异缩小。可能是因为生育前期气温较高，土壤微生物活动旺盛，秸秆腐解及根系生长的共同作用导致土壤呼吸速率和呼吸总量增加，生育后期土壤温度降低，作物根系代谢活动减弱，秸秆腐解为土壤微生物提供的底物减少所致。

3.2 土壤水分与秸秆覆盖对农田碳平衡的影响

净生态系统生产力（*NEP*）是评估农田生态系统碳平衡的主要指标，*NEP* 为正时，农田系统为碳汇，净固定碳；*NEP* 为负时，农田生态系统为碳源，净排放碳。秸秆覆盖和灌水均能调节农田生态系统碳汇能力[33-37]。本研究表明，夏玉米农田 *NEP* 介于 2 062.90~7 132.32 kg/hm^2，说明净初级生产力固碳量大于土壤微生物异氧呼吸碳释放量，夏玉米农田为大气 CO_2 的汇。其中 SW3 处理 NEP 最高，说明秸秆覆盖结合适宜灌水可以提高土壤有机碳量和作物生物量，增加农田生态系统的碳输入，并且其增加幅度大于土壤微生物异氧呼吸碳释放量，最终提高了夏玉米农田生态系统的固碳量，但当灌水量增加到一定程度后（W3）继续增加灌水量，碳汇效应增加效果减弱。

3.3 土壤水分与秸秆覆盖对碳排放效率的影响

碳排放效率受作物籽粒产量和土壤碳排放量的共同影响[18-19]。在全球气候变暖的背景下，农田管理措施不仅要考虑作物增产稳产，还要兼顾作物生长季的经济-环境效益[18]。有研究[12-13]表明适宜灌水可以增加作物产量，同时也提高了土壤呼吸速率，增加了土壤碳损失；也有研究[15]表明土壤呼吸速率与土壤含水率无相关性，但土壤呼吸总量随灌水量增加呈先升高后降低趋势。秸秆覆盖还田引起土壤呼吸及作物产量差异，最终影响土壤碳排放效率[17-19]。本研究表明，秸秆覆盖和增加灌水可以显著提高夏玉米籽粒产量，且增加幅度大于土壤碳排放总量，最终显著提高夏玉

米土壤碳排放效率。其中 SW3 处理获得较高的籽粒产量、较高的土壤碳排放总量和最高的碳排放效率。可能是因为秸秆覆盖在夏玉米生长季起到调节土壤温度，减缓土壤蒸发的作用，改善土壤透气性[20-21]，结合适宜的灌水措施和生长季较高的气温，加速了还田秸秆腐解，增加了表层土壤有机碳量和微生物活性[27]，促进了夏玉米生长，最终获得较高的籽粒产量，进一步说明秸秆覆盖与适宜灌水可以提高了农田经济-环境效益[15-19]。

本试验在不考虑降水影响的条件下，对秸秆覆盖及不同水分控制条件下夏玉米季农田碳平衡及碳排放效率进行初步研究探讨，相关结论还有待于进一步研究验证。今后加强对不同降水年型背景下农田碳平衡变化规律研究，以期为黄淮地区农田碳循环相关理论及制定节水减排的农田管理模式提供理论依据和技术支撑。

4 结 论

1）与无覆盖低灌水量相比，SW3 处理产量增加了 167.60%，碳排放总量增加 12.07%，净初级生产力固碳量增加了 245.74%，碳排放效率提高了 138.80%，处理间差异显著。

2）与秸秆覆盖处理高灌水处理（SW4）相比，SW3 处理在节约用水的前提下，净初级生产力固碳量和碳排放效率分别提高了 3.00%和 2.35%。

3）综合考虑作物产量、灌水量投入以及碳排放效率，本试验条件下 SW3 处理（秸秆覆盖条件下灌水控制下限为 70%*FC*）是适宜于当地夏玉米生产的理想管理模式。

（作者声明本文无实际或潜在利益冲突）

参考文献：

[1] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. A global database of soil respiration data[J]. Biogeosciences, 2010, 7(6): 1 915-1 926.

[2] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.

[3] NAYAK D, SAETNAN E, CHENG K, et al. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 209: 108-124.

[4] WANG W Y, AKHTAR K, REN G X, et al. Impact of straw management on seasonal soil carbon dioxide emissions, soil water content, and temperature in a semi-arid region of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 471-482.

[5] DOSSOU-YOVO E R, BRÜGGEMANN N, JESSE N, et al. Reducing soil CO_2 emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in Northern Benin[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 44-53.

[6] WU J P, XIAO K, ZHAO C, et al. Ridge-furrow cropping of maize reduces soil carbon emissions and enhances carbon use efficiency[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 256: 153-162.

[7] CHEN H X, LIU J J, ZHANG A F, et al. Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: A field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 814-824.

[8] 熊瑛，王龙昌，赵琳璐，等. 保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸、碳平衡及经济-环境效益特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1 653-1 662.
XIONG Ying, WANG Longchang, ZHAO Linlu, et al. Soil respiration, carbon balance, and economic and environmental benefits of triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1 653-1 662.

[9] 陈绍民，杨硕欢，张保成，等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 229-238.
CHEN Shaomin, YANG Shuohuan, ZHANG Baocheng, et al. Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 229-238.

[10] GUO L L, WANG X J, WANG S B, et al. Tillage and irrigation effects on carbon emissions and water use of summer maize in North China Plains[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105 729.

[11] 张前兵，杨玲，王进，等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2 420-2 430.
ZHANG Qianbing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(12): 2 420-2 430.

[12] 吕国红，温日红，谢艳兵，等. 不同土壤水分控制对东北地区玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 76-81.
LYU Guohong, WEN Rihong, XIE Yanbing, et al. Effects of water controls at different levels on soil respiration characteristics of maize farmland in Northeast China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(5): 76-81.

[13] 骆亦其，周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京：高等教育出版社, 2007.
LUO Yiqi, ZHOU Xuhui. Soil respiration and the environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

[14] 杨凡，侯会静，蔡焕杰，等. 不同灌溉水平对夏玉米地土壤 CO_2 排放的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 98-103.
YANG Fan, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Effects of different irrigation levels on CO_2 emission from soils of summer maize field[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11): 98-103.

[15] 王风姣，王振华，李文昊. 灌水量及可降解膜覆盖对滴灌玉米土壤呼吸及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 1-8, 21.
WANG Fengjiao, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effects of irrigation amount and degradable membrane mulching on soil respiration and yield of drip-irrigated corn[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 1-8, 21.

[16] 涂纯，王俊，官情，等. 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济环境效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 931-937.
TU Chun, WANG Jun, GUAN Qing, et al. Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy-environment benefit in rainfed winter wheat fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 931-937.

[17] 李晓莎，武宁，刘玲，等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1 765-1 771.
LI Xiaosha, WU Ning, LIU Ling, et al. Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1 765-1 771.

[18] 张莉, 王婧, 逄焕成, 等. 短期秸秆颗粒还田对小麦-玉米系统作物产量与土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 565-572.
ZHANG Li, WANG Jing, PANG Huancheng, et al. Effects of short-term granulated straw incorporation on grain yield and soil respiration in awinter wheat-summer maize cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 565-572.

[19] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 120-131.
HU Falong, CHAI Qiang, GAN Yantai, et al. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(1): 120-131.

[20] 马建辉, 黄培新, 姜丽娜, 等. 不同秸秆还田方式配施氮肥对麦田碳平衡的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(11): 62-69.
MA Jianhui, HUANG Peixin, JIANG Lina, et al. Effect of combination of different straw returning methods with N application on carbon balance of wheat field[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(11): 62-69.

[21] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1 381-1 392.
ZHANG Yeye, MO Fei, HAN Juan, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1 381-1 392.

[22] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 133-140.
LIANG Yao, CAI Hongguang, YANG Li, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 133-140.

[23] 李小艳. 秸秆覆盖对不同水分条件下冬小麦—夏玉米农田蒸散规律及调控效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
LI Xiaoyan. Effect of straw returning on evapotranspiration and its regulation effect in winter wheat-summer maize cropping system under different water supply[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.

[24] CAI Z C, QIN S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, 136(3/4): 708-715.

[25] 陈盛, 黄达, 张力, 等. 秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 1-11.
CHEN Sheng, HUANG Da, ZHANG Li, et al. The effects of straw incorporation on physicochemical properties of soil: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 1-11.

[26] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 626-633.
NAN Xiongxiong, TIAN Xiaohong, ZHANG Lin, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 626-633.

[27] 周桂香, 陈林, 张丛志, 等. 温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 911-918.
ZHOU Guixiang, CHEN Lin, ZHANG Congzhi, et al. Effects of temperature and moisture on microbial community function responsible for straw decomposition[J]. Soils, 2015, 47(5): 911-918.

[28] KUZYAKOV Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: A comparison of four methods[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1 621-1 631.

[29] 雷宏军, 李保国, 白由路, 等. 黄淮海平原区不同农作措施下耕层土壤有机质矿化与 CO_2 排放估算[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2 035-2 042.
LEI Hongjun, LI Baoguo, BAI Youlu, et al. Estimation of soil organic matter mineralization in the plough layer and CO_2 emission under different farming practices in China's Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(10): 2 035-2 042.

[30] 殷文, 史倩倩, 郭瑶, 等. 秸秆还田、一膜两年用及间作对农田碳排放的短期效应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 716-724.
YIN Wen, SHI Qianqian, GUO Yao, et al. Short-term response of farmland carbon emission to straw return, two-year plastic film mulching and intercropping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 716-724.

[31] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1 698-1 705.
HAN Guangxuan, ZHOU Guangsheng, XU Zhenzhu. Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1 698-1 705.

[32] 沈会涛, 张万军, 赵艳霞, 等. 秸秆覆盖对冀北山区夏玉米土壤呼吸的影响[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(2): 131-136.
SHEN Huitao, ZHANG Wanjun, ZHAO Yanxia, et al. Effect of straw mulching on soil respiration of maize cropland in the mountain area of Hebei Province[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(2): 131-136.

[33] 宋娟娟, 高晓东, 蔡耀辉, 等. 灌溉方式对旱区农田温室气体排放影响的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 63-72.
SONG Juanjuan, GAO Xiaodong, CAI Yaohui, et al. Effects of irrigation methods on greenhouse gas emissions from arid farmlands: A meta-analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 63-72.

[34] 李倩, 高阳, 王洪博, 等. 温度升高和干旱对农田生态系统水碳交换动态影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 110-118.
LI Qian, GAO Yang, WANG Hongbo, et al. Changes in water and carbon in farmland ecosystems due to the combined impact of temperature rise and drought: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 110-118.

[35] 米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 农田管理措施对滨海盐渍化土壤碳平衡的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 85-88.
MI Yingbin, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of different farmland managements on carbon balance in coastal saline soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 85-88.

[36] 夏旭, 李银坤, 陈敏鹏, 等. 碳氮水添加对华北小麦-玉米双季轮作系统碳平衡的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 250-260.
XIA Xu, LI Yinkun, CHEN Minpeng, et al. Effects of carbon, nitrogen and water addition on carbon balance of wheat-maize double rotation systemin North China Plain[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 250-260.

[37] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 301-308.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 301-308.

Effects of water and straw mulching on soil respiration and carbon balance in summer maize farmland

ZHANG Xiaopei[1,2,3], CHANG Xiao[2], YANG Shenjiao[1,2], WANG Hezhou[1,2], ZHOU Xinguo[1*]

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu, Shangqiu 476000, China;

3. College of Humanities, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: 【Objective】The purpose of this paper is to give full play to the respective advantages and synergistic effects of straw mulching and suitable irrigation on crop yield and soil carbon sequestration and emission reduction, establish an efficient farmland management mode of emission reduction, increase, and water saving.【Method】Taking summer maize in Western Henan as the research object, the mulching method and the lower limit of irrigation water were tested. The mulching method was straw mulching (S) and no mulching (N). The lower limit of irrigation water was set at four levels: 50% (W1), 60% (W2), 70% (W3) and 80% (W4) of field water holding capacity. Soil respiration, crop biomass and grain yield under different treatments were systematically studied. The total amount of soil carbon emission, the amount of soil microbial isooxygen respiration carbon release and the amount of carbon sequestration of farmland net primary productivity were calculated. Farmland net ecosystem productivity (*NEP*) was calculated as the carbon sequestration of farmland net primary productivity and the carbon release of soil microbial iso-respiration. Carbon emission efficiency (*CE*) calculated from crop yields and soil carbon emissions reflected the economic and environmental benefits of farmland. *NEP* and *CE* were used to objectively evaluate the effects of straw mulching and different irrigation lower limits on crop yield and carbon sequestration. 【Result】The soil respiration rate of SW4 treatment was the highest and that of NW1 treatment was the lowest. Soil respiration rate of SW4 treatment reached the highest value at anthesis stage 6.08 μmol/(m^2 s^1), and there was no significant difference between SW3 treatment and NW4 treatment. Compared with NW1 treatment, straw mulching and irrigation increased the amount of carbon sequestration in farmland net primary productivity and the amount of soil microbial iso-respiratory carbon release, and that of SW4 treatment was the highest, with no significant difference compared with SW3 treatment and NW4 treatment. SW3 treatment had the highest *NEP* which was 3.99%-245.74% higher than that of other treatments and the highest *CE* which were 2.35%-138.80% higher than that of other treatments. Compared with SW4 treatment, *NEP* of SW3 treatment increased by 2.99% and *CE* of SW3 treatment increased by 2.35% under the premise of saving irrigation.【Conclusion】The lower limit of irrigation water is 70%*FC* and straw mulching (SW3) treatment, which can effectively coordinate the yield and carbon emission efficiency of summer maize farmland system, promote higher crop yield, achieve higher net ecosystem productivity and carbon emission efficiency, and reduce the carbon emission generated in the production process under the condition of higher irrigation amount. Achieve carbon sequestration and emission reduction and water utilization system promotion. Considering net ecosystem productivity and carbon emission efficiency of farmland, SW3 treatment can be used as a farmland management mode for water saving, emission reduction and yield increase.

Key words: straw mulching; soil moisture; summer maize; soil respiration; carbon balance

责任编辑：赵宇龙