

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.025

不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究

陈绍民 杨硕欢 张保成 王 丽 胡田田

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 农田生态系统碳平衡取决于农作物固定碳量和土壤异养呼吸排放碳量。为揭示水肥用量对农田生态系统碳平衡的综合影响,设置3个灌水水平:高水、中水和低水(W1、W0.85、W0.7 夏玉米季分别为90、76.5、63 mm,冬小麦季分别为140、119、98 mm),4个施氮水平:高氮、中氮、低氮和不施氮(N1、N0.85、N0.7、N0 夏玉米季分别为300、255、210、0 kg/hm²,冬小麦季分别为210、178.5、147、0 kg/hm²),4个施磷水平:高磷、中磷、低磷和不施磷(P1、P0.85、P0.7和P0 夏玉米季分别为90、76.5、63、0 kg/hm²,冬小麦季分别为150、127.5、105、0 kg/hm²)进行了田间试验。结果表明:不同水肥处理下夏玉米/冬小麦农田生态系统表现为碳汇,夏玉米季净生态系统生产力固碳量(C_{NEP})为6 805~7 233 kg/hm²,冬小麦季C_{NEP}为5 842~6 434 kg/hm²,夏玉米C_{NEP}高于冬小麦。在高、中、低肥水平下,增加灌水量,夏玉米/冬小麦周年净初级生产力固碳量(C_{NPP})提高2.48%~5.96%,土壤微生物异养呼吸碳释放量(C_{Rm})增加2.15%~15.20%,净生态系统生产力固碳量(C_{NEP})增加1.16%~6.47%。在高、中、低供水水平下,增加施肥量,夏玉米/冬小麦周年C_{NPP}增加2.95%~3.43%,土壤C_{Rm}增加5.23%~18.67%,C_{NEP}增加0.93%~2.79%,C_{NEP}增加比例与供水水平呈负相关。在低水条件下,氮磷肥配施处理夏玉米/冬小麦农田周年C_{NEP}较单施氮、磷肥分别增加4.86%、7.34%,且氮磷肥交互作用显著(P<0.05),水肥供应水平相差15%时对冬小麦农田C_{NEP}有显著的正交互作用。氮磷肥配施、水肥协调供应均有助于促进夏玉米/冬小麦农田生态系统的净碳输入,在节水节肥原则下,夏玉米和冬小麦分别在W0.85N0.85P0.85和W0.7N0.85P0.85水肥供应条件下有利于增加农田C_{NEP}。

关键词: 夏玉米/冬小麦; 灌水量; 施肥量; 水肥交互作用; 碳平衡

中图分类号: S181; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0229-10

OSID:



Carbon Balance in Summer Maize/Winter Wheat Farmland Ecosystem under Different Water and Fertilizer Conditions

CHEN Shaomin YANG Shuohuan ZHANG Baocheng WANG Li HU Tian Tian

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The carbon balance of the farmland ecosystem depends on the fixed carbon content of crops and carbon emissions from soil heterotrophic respiration. In order to reveal the comprehensive effects of water and fertilizer levels on carbon balance in farmland ecosystems, a field experiment of summer maize/winter wheat rotation cycle in Yangling District of Shaanxi Province was conducted during 2015—2016. Three irrigation levels: high, medium and low (W1, W0.85 and W0.7 meant 90 mm, 76.5 mm and 63 mm in summer maize season and 140 mm, 119 mm and 98 mm in winter wheat season), four nitrogen fertilizer levels: high, medium, low and no nitrogen (N1, N0.85, N0.7 and N0 meant N 300 kg/hm², 255 kg/hm², 210 kg/hm² and 0 kg/hm² in summer maize season and 210 kg/hm², 178.5 kg/hm², 147 kg/hm² and 0 kg/hm² in winter wheat season) and four phosphate fertilizer levels: high, medium, low and no phosphate (P1, P0.85, P0.7 and P0 meant P₂O₅ 90 kg/hm², 76.5 kg/hm², 63 kg/hm² and 0 kg/hm² in summer maize season and 150 kg/hm², 127.5 kg/hm², 105 kg/hm² and 0 kg/hm² in winter wheat season) were designed. CO₂ flux measurements were performed, using the static opaque chamber and chromatography method, and aboveground biomass and yield were measured. The net primary

收稿日期: 2020-08-13 修回日期: 2020-09-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503124)

作者简介: 陈绍民(1989—),男,博士生,主要从事节水节肥理论与农田生态环境效应研究,E-mail: shaomin_ly24@126.com

通信作者: 胡田田(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

productivity carbon fixation (C_{NEP}) and soil microorganisms heterotrophic respiratory carbon release (C_{Rm}) were also calculated to evaluate net ecosystem productivity carbon fixation (C_{NEP}). The results showed that the summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer treatments performed as carbon sink. The range of C_{NEP} in summer maize and winter wheat seasons were 6 805 ~ 7 233 kg/hm² and 5 842 ~ 6 434 kg/hm², respectively. At high, medium and low fertilizer levels, with the increase of irrigation amount, the C_{NPP} of summer maize/winter wheat rotation cycle was increased by 2.48% ~ 5.96%, the C_{Rm} of soil was increased by 2.15% ~ 15.20%, and the C_{NEP} was increased by 1.16% ~ 6.47%, respectively. Under the high, medium and low water supply levels, with the increase of fertilization amount, the C_{NPP} of summer maize/winter wheat rotation cycle was increased by 2.95% ~ 3.43%, the C_{Rm} of soil was increased by 5.23% ~ 18.67%, and the C_{NEP} was increased by 0.93% ~ 2.79%, respectively. The increase of C_{NEP} was negatively correlated with amount of irrigation. Under low water condition, compared with single application of nitrogen or phosphate fertilizer, combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers, the C_{NEP} of summer maize/winter wheat rotation cycle was increased by 4.86% and 7.34%, respectively. Variance analysis of the interaction of water and fertilizer was significant for the C_{NEP} of summer maize/winter wheat rotation cycle. While water and fertilizer supply differed by 15% had a significant positive interaction with C_{NEP} in winter wheat farmland. Combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers and the coordinated supply of water and fertilizer were helpful to promote C_{NEP} of summer maize/winter wheat ecosystem. Based on the principle of water and fertilizer saving, summer maize and winter wheat were beneficial to increase C_{NEP} accumulation under W0.85N0.85P0.85 and W0.7N0.85P0.85 treatments, respectively.

Key words: summer maize/winter wheat; irrigation amount; fertilizer amount; water-nutrient interaction; carbon balance

0 引言

农田生态系统既是重要的 CO₂ 排放源,也是重要的碳汇^[1]。农田生态系统是全球碳库中最为活跃的部分,受各类田间措施的影响极大^[2-5],可在较短时间尺度上调节碳库^[6]。诸多研究表明,农田生态系统可以从大气中吸收大量碳,从而提高陆地碳储量^[7],进而降低温室气体排放,降低大气 CO₂ 浓度^[8-10]。固碳减排是未来可持续农业生产过程中重要的生态目标之一。

通常情况下农田土壤-植物系统表现为大气 CO₂ 的汇,不同耕作措施只是改变了汇的程度^[7, 11-14]。在干旱与半干旱地区,灌水是获得农业高产稳产的重要手段之一。土壤水分是农田碳循环(植物光合作用、土壤 CO₂ 及 CH₄ 排放)的关键因子^[5],在一定变化范围内,灌水量与农田净初级生产力固碳量^[15-17]和土壤 CO₂ 排放量具有显著的相关性^[18-19]。刘晶晶等^[2]研究表明,灌溉促进了关中原冬小麦/夏玉米轮作系统作物产量和 CO₂ 排放总量,而轮作系统固碳量与灌水量没有明显的关系。肥料在农业生产中具有重要的地位。魏廷邦等^[20]研究表明,低水情况下施肥对夏玉米干物质积累量和产量具有明显的调控作用。乔云发等^[21]研究发现,在化肥有机肥配施条件下黑土上夏玉米生长期土壤呼吸速率最高,其次是氮磷钾配施。可见,施肥对土壤 CO₂ 排放量有显著影响,且不同类型的

肥料对作物的固碳能力不同^[22]。此外,秸秆还田被认为是极具潜力的农田固碳减排措施之一^[23-24],因其显著增加的土壤有机碳固持量远大于土壤呼吸 CO₂ 排放增加量^[25-26]。

单一措施对农田生态系统固碳作用的影响已受到普遍关注,但关于农田生态系统碳平衡对水肥供应和肥料配施响应的研究却鲜见报道。本文通过夏玉米/冬小麦田间试验,采用静态箱法和生物量取样法进行碳平衡分析^[13, 27],研究秸秆还田条件下不同灌水量、施氮量和施磷量对农田生态系统碳平衡的影响,为农田生态系统碳循环和碳平衡的深入研究提供基础数据,明确干旱、半干旱地区夏玉米/冬小麦轮作农田碳汇潜力,为制定更加详细的碳排放清单及寻找增加农田生态系统固碳量的水肥管理措施奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 6 月—2016 年 6 月在陕西省杨凌区西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°20' N, 108°24' E, 海拔 524.7 m)进行,试验站内设有国家一般气象观测站。该地区属于暖温带季风半湿润气候区,年平均气温为 12.9℃,多年平均降水量 632 mm(主要集中在 7、8、9 月,图 1),年平均蒸发量 1 500 mm。该试验区土壤质地为重壤土,2 m 土层内平均土壤干容重为 1.38 g/cm³。供试土壤基本理化

性状为:pH 值为 8.14,有机质质量比 12.02 g/kg,全氮质量比 0.89 g/kg,速效磷质量比 8.18 mg/kg,速效钾质量比 209.46 mg/kg,碱解氮质量比 55.30 mg/kg。

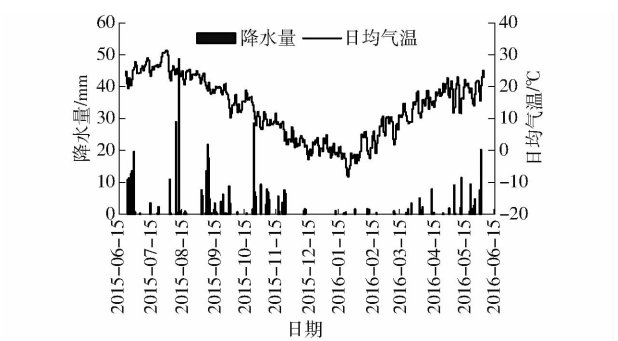


图 1 夏玉米/冬小麦生育期降水量及日均气温
Fig.1 Precipitation and daily average temperature during summer maize/winter wheat growth period

1.2 试验设计

试验设 3 水平灌水量(W)、4 水平施氮量(N)及 4 水平施磷量(P),分别为:当地习惯灌水量(夏玉米季为 90 mm,冬小麦季为 140 mm)的 1、0.85、0.7 倍(分别简称高、中、低水平);当地习惯施氮量(N 施用量夏玉米季为 300 kg/hm²,冬小麦季为 210 kg/hm²)和施磷量(P₂O₅施用量夏玉米季为 90 kg/hm²,冬小麦季为 150 kg/hm²)的 1、0.85、0.7、0 倍。研究按照复因素不完全实施方案设计规则对 3 个灌水量、4 个施氮量和 4 个施磷量设置试验处理,使试验方案局部均衡,减少试验处理且能分析各个试验因子的单因素效应及其交互效应,共 10 个处理(表 1,表中 F 代表施肥量;1、0.85、0.7、0 代表当地习惯水肥用量的倍数,F1 即 N1P1,以此类推)。

表 1 试验方案

Tab.1 Experimental design

处理	夏玉米			冬小麦		
	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)	施磷量/(kg·hm ⁻²)	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)	施磷量/(kg·hm ⁻²)
W1F1	90.0	300	90.0	140	210.0	150.0
W0.7F1	63.0	300	90.0	98	210.0	150.0
W0.85F0.85	76.5	255	76.5	119	178.5	127.5
W0.7F0.85	63.0	255	76.5	98	178.5	127.5
W1F0.7	90.0	210	63.0	140	147.0	105.0
W0.85F0.7	76.5	210	63.0	119	147.0	105.0
W0.7F0.7	63.0	210	63.0	98	147.0	105.0
W0.7N0.7P0	63.0	210	0	98	147.0	0
W0.7N0P0.7	63.0	0	63.0	98	0	105.0
W0.7F0	63.0	0	0	98	0	0

每个处理 3 次重复,每个小区面积为 26.25 m² (3.5 m×7.5 m)。

前茬冬小麦高留茬收割后,旋耕机旋地两遍。夏玉米于 2015 年 6 月 22 日播种,品种为郑单 958,种植夏玉米 5 行,行距 60 cm,株距 23.5 cm,10 月 13 日收获。夏玉米收获后,秸秆用粉碎机粉碎后覆盖于地表,于播前人工翻入土中约 20 cm。冬小麦于 2015 年 10 月 20 日播种,品种为西农 979,种植冬小麦 17 行,行距 20 cm,播种量为 225 kg/hm²,2016 年 6 月 6 日收获。夏玉米季和冬小麦季磷肥用含 P₂O₅ 12% 的普通过磷酸钙,分别于播前 2015 年 6 月 20 日和 2015 年 10 月 19 日一次性施入后翻耕入土。氮肥用含 N 46.67% 的尿素,夏玉米季采用沟施方式,于五叶期(7 月 16 日)和喇叭口期(8 月 16 日)分两次施入,各占 50%,冬小麦季 50% 于播前基施,另外 50% 于拔节后(2016 年 4 月 14 日)追施。灌水采用畦灌方式,夏玉米于 2015 年 7 月 20 日灌溉;冬小麦于 2016 年 1 月 8 日冬灌,于 2016 年 4 月 14 日灌拔节水,冬灌和拔节水灌水量比例为 3:4。其他管理同当地农业生产。

1.3 测试项目及方法

1.3.1 土壤 CO₂排放量

采用静态暗箱-气象色谱法测定夏玉米和冬小麦生长季不同水肥处理下土壤 CO₂排放通量。静态暗箱由不透明的 PVC 板制成,长×高×宽为 0.5 m×0.5 m×0.5 m。为了防止取样期间因为阳光照射导致箱体内温度的剧烈变化,外表包裹隔热材料;为了保证箱体内气体均匀,箱体内顶部安装有搅拌空气的小风扇;气体采样口设置于侧壁。静态箱底座于播前埋设于小区中央以便减少对土壤的干扰。底座上端附有 5 cm 深的凹槽用以放置静态箱体,取样前注水密封隔绝箱内外气体交换^[28]。

夏玉米吐丝期前采样间隔为 7 d,吐丝期后采样间隔为 14 d;灌水施肥后加测,每隔 3 d 采样 1 次。夏玉米季共采样 15 次。冬小麦苗期和拔节至抽穗阶段每隔 7 d 采样 1 次,越冬期采样间隔为 30 d,其余时期每隔 14 d 采样 1 次;施肥、灌水或降雨后则增加采样频率,每隔 3 d 采样 1 次。冬小麦季共采样 20 次。于北京时间 10:00—11:00 进行 CO₂ 气体样品采集,分别在静态箱密封 0、10、20、30 min 后利用

带有三通阀的 50 mL 注射器进行 4 次气体采集,每次采样 40 mL,并于当天进行 CO₂ 气体浓度分析。此外,采集样品同时刻箱顶部电子温度计(TA288 型)所测箱内温度,用以计算土壤 CO₂ 排放通量。土壤 CO₂ 排放通量及全生育期土壤 CO₂ 排放总量计算式为

$$F=\rho h\frac{273}{273+T}\frac{dc}{dt}\tag{1}$$

$$M=\sum_{i=1}^n\frac{24(F_{i+1}+F_i)(t_{i+1}-t_i)}{2\times100}\tag{2}$$

式中 F ——CO₂ 气体排放通量,mg/(m²·h)
 ρ ——标准状态下气体密度,取 1.964 g/cm³
 h ——采样箱高度,取 0.5 m
 T ——采样时箱内温度,℃
 dc/dt ——箱内气体浓度随时间的变化率,
μL/(m³·h),根据 0、10、20、30 min
4 个时刻采集的气体浓度的线性回
归斜率分析得出
 M ——土壤 CO₂ 排放总量,kg/hm²
 n ——生育期内采样总次数
 t ——采样时间,d

1.3.2 生物量测定

分别于夏玉米收获期采集 30 株植物样品,冬小麦收获期采集 1 m² 范围内植物样品,将夏玉米和冬小麦籽粒和秸秆部分分离,在干燥箱中 105℃ 杀青 30 min 后,75℃ 干燥至质量恒定,用精度 0.01 g 电子天平称量,折算不同水肥处理夏玉米和冬小麦地上部和根系生物量。

1.4 农田生态系统碳平衡计算

通常用净生态系统生产力(Net ecosystem productivity,NEP)固碳量(C_{NEP})来表示农田生态系统的碳平衡^[11,29],它等于净初级生产力(Net primary productivity,NPP)固碳量(C_{NPP})与土壤微生物异养呼吸(Heterotrophic respiration of soil microorganisms,Rm)碳释放量(C_{Rm})之差,即 $C_{NEP}=C_{NPP}-C_{Rm}$ 。当 C_{NEP} 为正值时,表示该系统是大气 CO₂ 的吸收汇,反之为大气 CO₂ 的排放源。固碳量计算方法主要采用生物量法,即根据生物量在植物各器官的分配比例、植物各器官的平均含碳量等参数计算。本文将作物地上部与根系的生物量作为 NPP,作物地上部和根的碳含量均取 45% (据估算,作物光合过程中需要吸收 0.45 g C 才能合成 1 g 有机质)^[30],由此可计算出 C_{NPP} 。由于根系生物量难以测算,可根据产量和地上部生物量采用参数法计算。夏玉米和冬小麦根系生物量分别按收获籽粒生物量的 34% 和 32%^[31] 计算。作物生长季土壤呼吸释放总碳量 C_{RS} 根据前期测定的土壤 CO₂ 排放总量计算获得, $C_{RS}=12M/$

44。依据相关研究结果,夏玉米和冬小麦土壤微生物异养呼吸对土壤呼吸碳释放量的贡献率 α 分别为 47%^[32-34] 和 69%^[35],采用 $C_{Rm}=\alpha C_{RS}$ 进行计算。

1.5 数据分析

数据处理和统计分析采用 Excel 2003 和 SPSS 23.0 软件,处理间的多重比较采用最小显著性差异法(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 灌水量对夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡的影响

不同水肥条件下夏玉米和冬小麦农田生态系统碳平衡计算结果表明,夏玉米 C_{NPP} 为 7 449 ~ 8 011 kg/hm²,平均为 7 742 kg/hm²;冬小麦 C_{NPP} 为 6 891 ~ 7 631 kg/hm²,平均为 7 300 kg/hm²,夏玉米平均固碳量高于冬小麦;夏玉米季 C_{Rm} 为 644 ~ 856 kg/hm²,冬小麦季 C_{Rm} 为 1 009 ~ 1 293 kg/hm²,夏玉米季 C_{Rm} 低于冬小麦季,这与冬小麦的生育期较长有关(冬小麦 230 d,夏玉米 113 d);夏玉米农田 C_{NEP} 变化范围为 6 805 ~ 7 233 kg/hm²,冬小麦农田 C_{NEP} 变化范围为 5 842 ~ 6 434 kg/hm²,夏玉米农田 C_{NEP} 高于冬小麦(表 2)。可见,各处理 C_{NPP} 均大于 C_{Rm} ,即 C_{NEP} 为正值,夏玉米/冬小麦农田生态系统为大气 CO₂ 的汇。

夏玉米 C_{NPP} 在 F1 施肥水平下,W1 处理比 W0.7 处理增加 2.37%,差异不显著($P>0.05$);F0.85 施肥水平下,W0.85 处理比 W0.7 处理显著增加 6.54% ($P<0.05$);F0.7 施肥水平下,与 W0.7 处理相比,W1 和 W0.85 处理分别增加 4.33% ($P<0.05$) 和 2.18% ($P>0.05$)。冬小麦 C_{NPP} 在 F1 施肥水平下,W1 处理比 W0.7 处理显著增加 9.72% ($P<0.05$);F0.85 施肥水平下,W0.85 处理与 W0.7 处理间差异不显著($P>0.05$);F0.7 施肥水平下,与 W0.7 处理相比,W1 和 W0.85 处理分别显著增加 7.71% 和 5.72% ($P<0.05$)。表明灌水对夏玉米/冬小麦周年 C_{NPP} 累积均有显著促进作用,在高肥和低肥水平下,W1 处理比 W0.7 可分别增加 5.83% 和 5.96%;中肥水平下,W0.85 比 W0.7 增加 2.48%。

夏玉米季土壤 C_{Rm} 在 F1 施肥水平下,W1 比 W0.7 显著增加 21.67% ($P<0.05$);F0.85 施肥水平下,W0.85 比 W0.7 显著增加 13.37% ($P<0.05$);F0.7 施肥水平下,W1 比 W0.7 显著增加 11.88% ($P<0.05$),W0.85 比 W0.7 增加 1.59% ($P>0.05$)。冬小麦季土壤 C_{Rm} 在 F1 施肥水平下,W1 比 W0.7 显著增加 10.97% ($P<0.05$);F0.85

施肥水平下, W0.85 比 W0.7 显著增加 10.98% ($P < 0.05$); F0.7 施肥水平下, W1、W0.85 与 W0.7 无显著差异 ($P > 0.05$)。表明灌水会促进夏玉米/冬小麦周年土壤 C_{rm} , 在高肥和低肥水平下, W1 处理比 W0.7 可分别增加 15.20% 和 2.15%。灌水量的影响随供肥水平升高显著增加, 且在高肥条件的增幅远大于低肥。

夏玉米农田 C_{NEP} 在 F1 施肥水平下, W1 比 W0.7 增加 0.46% ($P > 0.05$); F0.85 施肥水平下, W0.85 比 W0.7 显著增加 5.86% ($P < 0.05$); F0.7

施肥水平下, W1 比 W0.85 和 W0.7 分别增加 1.35% ($P > 0.05$) 和 3.61% ($P < 0.05$)。冬小麦农田 C_{NEP} 在 F1 施肥水平下, W1 比 W0.7 显著增加 9.49% ($P < 0.05$); F0.85 施肥水平下, W0.85 比 W0.7 降低 3.90% ($P > 0.05$); F0.7 施肥水平下, W1 和 W0.85 分别比 W0.7 显著增加 9.78% ($P < 0.05$) 和 5.89% ($P < 0.05$)。表明增加灌水可以增加夏玉米/冬小麦农田生态系统周年 C_{NEP} , 在高肥和低肥水平下, W1 处理比 W0.7 可分别增加 4.55% 和 6.47%; 中肥水平下, W0.85 比 W0.7 增加 1.16%。

表 2 夏玉米、冬小麦农田生态系统碳平衡

Tab.2 Carbon balance of summer maize and winter wheat farmland ecosystem							kg/hm ²	
试验处理	地上部生物量	根系生物量	NPP 固碳量	土壤 CO ₂ 排放量	土壤碳释 放总量	异养呼吸碳释 放量	农田系统的 净碳输入量	
夏玉米	W1F1	(15 425 ± 103) ^a	(2 377 ± 50) ^a	(8 011 ± 96) ^a	(6 674 ± 184) ^a	(1 820 ± 50) ^a	(856 ± 24) ^a	(7 156 ± 62) ^{ab}
	W0.7F1	(15 068 ± 98) ^{ab}	(2 323 ± 94) ^{ab}	(7 826 ± 207) ^{ab}	(5 485 ± 153) ^{cd}	(1 496 ± 42) ^{cd}	(703 ± 20) ^{cd}	(7 123 ± 214) ^{ab}
	W0.85F0.85	(15 422 ± 79) ^a	(2 378 ± 104) ^a	(8 010 ± 42) ^a	(6 056 ± 133) ^b	(1 652 ± 36) ^b	(776 ± 17) ^b	(7 233 ± 49) ^a
	W0.7F0.85	(14 599 ± 80) ^{cd}	(2 108 ± 95) ^d	(7 518 ± 67) ^d	(5 342 ± 61) ^{de}	(1 457 ± 17) ^{de}	(685 ± 8) ^{de}	(6 833 ± 55) ^{cd}
	W1F0.7	(14 964 ± 104) ^{bc}	(2 307 ± 72) ^{bc}	(7 772 ± 183) ^{bc}	(5 620 ± 89) ^c	(1 533 ± 24) ^c	(720 ± 11) ^c	(7 051 ± 166) ^{abc}
	W0.85F0.7	(14 655 ± 134) ^{bcd}	(2 258 ± 67) ^c	(7 611 ± 161) ^{cd}	(5 103 ± 71) ^{ef}	(1 392 ± 20) ^{ef}	(654 ± 9) ^{ef}	(6 957 ± 170) ^{bcd}
	W0.7F0.7	(14 342 ± 131) ^d	(2 211 ± 89) ^c	(7 449 ± 63) ^d	(5 023 ± 223) ^f	(1 370 ± 61) ^f	(644 ± 29) ^f	(6 805 ± 113) ^d
冬小麦	W1F1	(14 694 ± 84) ^a	(2 264 ± 79) ^b	(7 631 ± 84) ^a	(6 362 ± 223) ^b	(1 735 ± 61) ^b	(1 197 ± 42) ^b	(6 434 ± 91) ^a
	W0.7F1	(13 392 ± 91) ^d	(2 064 ± 53) ^d	(6 955 ± 266) ^c	(5 733 ± 201) ^d	(1 564 ± 55) ^d	(1 079 ± 38) ^d	(5 876 ± 283) ^c
	W0.85F0.85	(14 244 ± 88) ^b	(2 196 ± 65) ^{bc}	(7 398 ± 114) ^{ab}	(6 871 ± 169) ^a	(1 874 ± 46) ^a	(1 293 ± 32) ^a	(6 105 ± 130) ^{bc}
	W0.7F0.85	(14 259 ± 78) ^b	(2 448 ± 57) ^a	(7 518 ± 67) ^{ab}	(6 191 ± 152) ^{bc}	(1 689 ± 41) ^{bc}	(1 165 ± 29) ^{bc}	(6 353 ± 95) ^{ab}
	W1F0.7	(14 290 ± 91) ^b	(2 203 ± 55) ^{bc}	(7 422 ± 91) ^{ab}	(5 363 ± 234) ^e	(1 463 ± 64) ^e	(1 009 ± 44) ^e	(6 413 ± 131) ^a
	W0.85F0.7	(14 027 ± 79) ^c	(2 162 ± 47) ^c	(7 285 ± 146) ^b	(5 845 ± 193) ^{cd}	(1 594 ± 53) ^{cd}	(1 100 ± 36) ^{cd}	(6 185 ± 101) ^{ab}
	W0.7F0.7	(13 267 ± 92) ^d	(2 046 ± 35) ^d	(6 891 ± 219) ^c	(5 576 ± 115) ^{de}	(1 521 ± 31) ^{de}	(1 049 ± 22) ^{de}	(5 842 ± 193) ^c

注:同一列数值后不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2 施肥量对夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡的影响

夏玉米 C_{NPP} 在 W1 供水水平下, F1 比 F0.7 显著增加 3.08% ($P < 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 显著增加 5.23% ($P < 0.05$); 在 W0.7 供水水平下, F1 比 F0.7 显著增加 5.06% ($P < 0.05$), 增幅大于 W1 供水水平。冬小麦 C_{NPP} 在 W1 水平下, F1 比 F0.7 增加 2.82%, 差异不显著 ($P > 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 增加 1.55%, 差异不显著 ($P > 0.05$); 在 W0.7 供水水平下, F1 比 F0.7 增加 0.93%, 差异不显著 ($P > 0.05$), 而 F0.85 比 F0.7 显著增加 9.10% ($P < 0.05$)。表明施肥可以促进夏玉米/冬小麦周年 C_{NPP} 的累积, 在高水和低水条件下, F1 比 F0.7 可分别增加 2.95% 和 3.08%; 中水条件下, F0.85 比 F0.7 增加 3.43%。

夏玉米季土壤 C_{rm} 在 W1 供水水平下, F1 比 F0.7 显著增加 18.74% ($P < 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 显著增加 18.68% ($P < 0.05$); W0.7 供水水平下, F1 和 F0.85 分别比 F0.7 增加 9.19% 和 6.35%, 差异均显著 ($P < 0.05$)。冬

小麦季土壤 C_{rm} 在 W1 供水水平下, F1 比 F0.7 显著增加 18.62% ($P < 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 显著增加 17.55% ($P < 0.05$); 在 W0.7 供水水平下, F1 比 F0.7 增加 2.82%, 无显著差异 ($P > 0.05$), F0.85 比 F0.7 显著增加 11.04% ($P < 0.05$)。可见, 施肥可显著促进夏玉米/冬小麦周年土壤 C_{rm} , 在高水和低水条件下, F1 比 F0.7 可分别增加 18.67% 和 5.23%; 中水条件下, F0.85 比 F0.7 增加 17.97%。

夏玉米农田 C_{NEP} 在 W1 供水水平下, F1 比 F0.7 增加 1.48% ($P > 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 显著增加 3.97% ($P < 0.05$); 在 W0.7 供水水平下, F1 比 F0.7 显著增加 4.67% ($P < 0.05$), F0.85 比 F0.7 增加 0.41% ($P > 0.05$)。冬小麦农田 C_{NEP} 在 W1 供水水平下, F1 比 F0.7 增加 0.33% ($P > 0.05$); 在 W0.85 供水水平下, F0.85 比 F0.7 降低 1.30% ($P > 0.05$); 在 W0.7 供水水平下, F1 比 F0.7 增加 0.60% ($P > 0.05$), F0.85 比 F0.7 显著增加 8.75% ($P < 0.05$)。表明夏玉米/冬小麦农田生态系统作为大气 CO₂ 的汇, 在高水和低

水条件下,F1 相对于 F0.7 夏玉米/冬小麦农田生态系统周年 C_{NEP} 增加率为 0.93% 和 2.79%;中水条件下,F0.85 比 F0.7 增加 1.49%。

2.3 氮磷肥用量对夏玉米/冬小麦农田碳平衡的影响

夏玉米 C_{NPP} 氮磷肥配施(N 施用量210 kg/hm², P₂O₅ 施用量 63 kg/hm²)、单施氮肥(N 施用量 210 kg/hm²) 和单施磷肥(P₂O₅施用量 63 kg/hm²) 较不施肥(0 kg/hm²) 分别增加 6.23% ($P < 0.05$)、2.58% ($P > 0.05$) 和 3.07% ($P > 0.05$) (表 3),表明施肥可提高夏玉米 C_{NPP} 的累积,且氮磷肥配施的效果优于单施氮、磷肥。冬小麦 C_{NPP} 氮磷肥配施(N

施用量 147 kg/hm², P₂O₅施用量 105 kg/hm²)、单施氮肥(N 施用量 147 kg/hm²) 较不施肥(0 kg/hm²) 显著增加 10.44%、7.43% ($P < 0.05$),单施磷肥(P₂O₅ 施用量 105 kg/hm²) 较不施肥(0 kg/hm²) 增加 0.99% ($P > 0.05$) (表 3)。表明施肥可提高冬小麦 C_{NPP} 的累积,增幅由大到小依次为氮磷配施、单施氮肥、单施磷肥。方差分析表明,氮、磷单因子对夏玉米 C_{NPP} 累积效应均达极显著水平($P < 0.01$),但交互作用不显著($P > 0.05$);氮单因子对冬小麦 C_{NPP} 累积效应达极显著水平($P < 0.01$),磷单因子和氮磷交互作用均不显著($P > 0.05$)。

表 3 氮磷肥用量对夏玉米、冬小麦农田 C_{NEP} 影响的方差分析

Tab.3 ANOVA of summer maize and winter wheat C_{NEP} on nitrogen and phosphate fertilizer application

试验处理	夏玉米			冬小麦		
	NPP 固碳量/ (kg·hm ⁻²)	异养呼吸碳释 放量/(kg·hm ⁻²)	农田系统的净碳输 入量/(kg·hm ⁻²)	NPP 固碳量/ (kg·hm ⁻²)	异养呼吸碳释 放量/(kg·hm ⁻²)	农田系统的净碳输 入量/(kg·hm ⁻²)
W0.7F0.7	(7 449 ± 63) ^a	(644 ± 29) ^c	(6 805 ± 113) ^a	(6 891 ± 219) ^a	(1 049 ± 22) ^b	(5 842 ± 193) ^a
W0.7N0.7P0	(7 212 ± 138) ^{ab}	(709 ± 57) ^a	(6 503 ± 82) ^b	(6 703 ± 525) ^a	(1 145 ± 57) ^a	(5 558 ± 268) ^{ab}
W0.7N0P0.7	(7 227 ± 230) ^{ab}	(682 ± 48) ^b	(6 545 ± 183) ^b	(6 301 ± 278) ^b	(1 064 ± 33) ^{ab}	(5 237 ± 245) ^b
W0.7F0	(7 012 ± 201) ^b	(573 ± 34) ^d	(6 439 ± 167) ^b	(6 239 ± 247) ^b	(947 ± 44) ^c	(5 292 ± 203) ^b
氮肥	0.008	0.001	0.026	0.003	0.013	0.016
磷肥	0.003	0.028	0.031	0.315	0.704	0.414
氮肥 × 磷肥	0.400	0.006	0.045	0.493	0.007	0.131

夏玉米季土壤 C_{Rm} 氮磷肥配施、单施氮肥和单施磷肥比不施肥处理均显著增加 12.30%、23.70% 和 19.00% ($P < 0.05$) (表 3), C_{Rm} 增幅由大到小依次为单施氮肥、单施磷肥、氮磷肥配施。冬小麦季土壤 C_{Rm} 氮磷肥配施、单施氮肥和单施磷肥比不施肥处理均显著增加 10.79%、20.92% 和 12.36% ($P < 0.05$) (表 3), C_{Rm} 增幅由大到小依次为单施氮肥、单施磷肥、氮磷肥配施。方差分析表明,氮单因子和氮磷交互作用对夏玉米 C_{Rm} 累积效应达极显著水平($P < 0.01$),磷单因子效应显著($P < 0.05$);氮单因子对冬小麦 C_{Rm} 累积效应达显著水平($P < 0.05$),磷单因子效应不显著($P > 0.05$),氮磷交互作用极显著($P < 0.01$)。冬小麦季这一现状可能是由于适量施用化肥可提高土壤微生物数量进而提高对碳源的利用效率,但施肥过多使土壤微生物生物量降低,抑制了土壤 CO₂ 排放。

W0.7 供水水平下,夏玉米农田 C_{NEP} 氮磷肥配施处理较单施氮肥或单施磷肥分别增加 4.65% 和 3.97%,差异显著($P < 0.05$) (表 3)。不施磷条件下,N0.7 处理 C_{NEP} 比 N0 增加 0.99% ($P > 0.05$);在施磷条件下,N0.7 比 N0 增加 3.97%,差异显著($P < 0.05$)。可见,施氮对 C_{NEP} 的影响因磷肥施用而增大。W0.7 供水水平下,与不施肥处理相比,氮磷肥

配施冬小麦农田 C_{NEP} 显著增加 10.38% ($P < 0.05$),单施氮肥增加 5.01% ($P > 0.05$),单施磷肥降低 1.04% (表 3)。氮磷肥配施处理夏玉米/冬小麦周年 C_{NEP} 较单施氮肥或单施磷肥分别增加 4.86% 和 7.34%。方差分析表明,氮、磷肥单因子和氮磷肥交互作用对夏玉米季农田 C_{NEP} 的影响显著($P < 0.05$);磷单因子和氮磷交互作用对冬小麦季农田 C_{NEP} 的影响不显著($P > 0.05$),氮单因子的影响显著($P < 0.05$)。

2.4 水肥交互作用下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡

方差分析表明,水肥交互作用对夏玉米/冬小麦农田 C_{NEP} 的影响与供应水平有关(表 4)。水肥供应水平相差 30% 时,灌水对夏玉米季农田 C_{NEP} 的影响未达到显著水平($P > 0.05$),施肥对 C_{NEP} 的影响显著($P < 0.05$),而水肥交互作用不显著;水肥供应水平相差 15% 时,灌水影响极显著($P < 0.01$),施肥处理影响显著($P < 0.05$),灌水与施肥交互作用不显著。水肥供应水平相差 30% 时,灌水对冬小麦季农田 C_{NEP} 的影响极显著($P < 0.01$),而施肥单因子和灌水与施肥交互作用影响不显著($P > 0.05$);水肥供应水平相差 15% 时,灌水单因子影响不显著($P > 0.05$),施肥单因子效应显著($P < 0.05$),灌水与施肥交互作用影响极显著($P < 0.01$)。

表 4 水肥供应水平相差 30% 和 15% 时对夏玉米、冬小麦 C_{NEP} 影响的方差分析

Tab. 4 ANOVA of summer maize and winter wheat C_{NEP} on coupling effect of water and fertilizer amount

处理	水肥供应相差 30% 时 $C_{NEP}/(kg \cdot hm^{-2})$		处理	水肥供应相差 15% 时 $C_{NEP}/(kg \cdot hm^{-2})$	
	夏玉米	冬小麦		夏玉米	冬小麦
W1F1	(7 156 ± 62) ^a	(6 434 ± 91) ^a	W0. 85F0. 85	(7 233 ± 49) ^a	(6 105 ± 130) ^a
W1F0. 7	(7 051 ± 166) ^a	(6 413 ± 131) ^a	W0. 85F0. 7	(6 957 ± 170) ^{bc}	(6 185 ± 101) ^a
W0. 7F1	(7 123 ± 214) ^a	(5 876 ± 283) ^b	W0. 7F0. 85	(6 833 ± 55) ^{bc}	(6 353 ± 95) ^a
W0. 7F0. 7	(6 805 ± 113) ^b	(5 842 ± 193) ^b	W0. 7F0. 7	(6 805 ± 113) ^c	(5 842 ± 193) ^b
灌水	0. 145	0. 001	灌水	0. 002	0. 555
施肥	0. 041	0. 803	施肥	0. 041	0. 025
灌水 × 施肥	0. 253	0. 952	灌水 × 施肥	0. 083	0. 005

3 讨论

3.1 不同水肥条件对农田碳汇强度的影响

夏玉米农田净生态系统生产力固碳量 (C_{NEP}) 变化范围为 6 805 ~ 7 233 kg/hm², 冬小麦农田 C_{NEP} 变化范围为 5 842 ~ 6 434 kg/hm², 夏玉米 C_{NEP} 均值 (7 023 kg/hm²) 高于冬小麦 (6 173 kg/hm²) (表 2)。这与前人作物生长季碳平衡研究 C_{NEP} 基本一致^[36-37]。说明夏玉米/冬小麦农田为大气 CO₂ 的汇, 作物净初级生产力固碳量 (C_{NPP}) 大于土壤异养呼吸释放碳量 (C_{Rm})。不同水肥条件下碳汇强度存在差异, 夏玉米季 W1F1、W0. 7F1 和 W0. 85F0. 85 3 个处理农田 C_{NEP} 较大, 且无显著性差异。原因可能在于, 尽管 W1F1 和 W0. 85F0. 85 处理 C_{Rm} 较大, 但其 C_{NPP} 也较高; 而低水高肥一方面降低土壤 C_{Rm} ^[28], 另一方面施肥弥补了低灌水量造成的 C_{NPP} 降低^[38]。冬小麦季 W1F1、W1F0. 7 和 W0. 7F0. 85 处理农田 C_{NEP} 较大, 且无显著性差异。冬小麦季高肥、高水促进 C_{NPP} , 土壤 C_{Rm} 由大到小表现为 W1F1、W0. 7F0. 85、W1F0. 7, 因为土壤 C_{Rm} 受施肥作用影响大于灌水^[2, 39-40]。

3.2 灌水与夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡的关系

增加施肥或灌水情况下, 农田 C_{NEP} 变化趋势并不一致, 是由于施肥、灌溉等农田措施对净初级生产力固碳量 (C_{NPP}) 和土壤微生物异养呼吸碳释放量 (C_{Rm}) 增加或抑制程度不同而造成的^[41]。就灌水对农田 C_{NEP} 的影响而言, 夏玉米在中肥水平下, 中水处理比低水显著增加 5. 86%, 主要是由于增加灌水对夏玉米生物量增加显著^[2], 且增加幅度大于土壤微生物异养呼吸碳释放量 (C_{Rm}), 相应地增加了农田生态系统的固碳量。和夏玉米农田 C_{NEP} 表现相反, 冬小麦在中水处理下比低水降低 3. 90% ($P > 0. 05$), 因为增加灌水量并未增加冬小麦 C_{NPP} , 但冬小麦季土壤 C_{Rm} 释放量显著增加。相同灌水量差异在不同施肥水平下对夏玉米农田 C_{NEP} 的影响存在差

异 ($P > 0. 05$)。主要原因是高肥水平下灌水量从 W0. 7 增加至 W1 夏玉米 C_{NPP} 增幅较小, 灌水量不是影响夏玉米 C_{NPP} 的主要因子^[38], 但显著增加了 C_{Rm} ; 而低肥水平下, W1 处理相比于 W0. 7 显著增加夏玉米 C_{NPP} , 同时增加土壤 C_{Rm} ^[42]。冬小麦季高肥条件下, 高水较低水增加农田 C_{NEP} 9. 49%, 差异显著 ($P < 0. 05$), 因为灌溉增加冬小麦 C_{NPP} ^[2], 而抑制了土壤呼吸^[43]。低肥水平下, 高水、中水和低水间冬小麦农田 C_{NEP} 差异均显著 ($P < 0. 05$), 可能由于施肥水平较低情况下, 水分的作用增强。

3.3 施肥与夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡的关系

不同施肥量管理影响作物固定 CO₂ 的能力和数量。研究表明水分适中情况下, 适量施肥可提高作物的固碳量^[44-45]。中水水平下, 中肥比低肥可显著增加夏玉米农田 C_{NEP} ($P < 0. 05$) (表 2); 夏玉米季高水和低水水平下, 施肥量从 F0. 7 增加至 F1 对农田生态系统固碳量的影响不同, 原因可能在于, 高灌水量减弱了施肥效应, 而低灌水情况下施肥效应增强。低水水平下, 中肥与低肥无显著性差异 ($P > 0. 05$), 原因在于, 施肥增加土壤 CO₂ 排放的总碳量^[46], 同时肥料通过促进夏玉米生长同化了更多的 CO₂^[20]。就冬小麦季施肥而言, 高水和低水条件下, 施肥量从 F0. 7 增加至 F1 对冬小麦农田生态系统碳输入影响不显著, 因为增加施肥虽增加土壤碳排放但同时也增加植物固碳量。低水水平下, 中肥比低肥显著增加 8. 75% ($P < 0. 05$), 因为低水条件下施肥增加碳排放增幅小于植物固碳量增幅。氮磷肥配施、单施氮肥或磷肥和不施肥的农田生态系统均为大气 CO₂ 的汇, 氮磷肥配施的 C_{NEP} 最大, 且与单施氮肥、磷肥和不施肥处理间差异显著 ($P < 0. 05$) (表 3)。原因在于, 均衡施用化肥有助于促进作物同化更多的 CO₂, 且增幅远高于土壤 CO₂ 排放量增幅, 进而显著增加 C_{NEP} ^[7, 41], 另一方面氮磷肥配施抑制土壤微生物数量^[47], 减少农田 C_{Rm} ^[48]。

3.4 水肥耦合对农田系统碳平衡的影响

水肥供应水平相差 15% 对冬小麦农田 C_{NEP} 的影响存在明显正交互作用,而对夏玉米农田 C_{NEP} 的影响不显著;供应水平相差 30% 对夏玉米和冬小麦农田 C_{NEP} 交互作用均不显著(表 4)。当水肥供应提高 30%,显著促进土壤 C_{Rm} ,但作物 C_{NPP} 的增加幅度不大(表 2),对于农田 C_{NEP} 累积的提升并不显著。可能是由于前期土壤墒情及养分状况限制了增加水肥供应的交互作用^[49],并且单次大幅增加灌水量会减小施肥尤其是氮肥的效应^[50]。可见,农田生态系统碳输入不仅与施肥量、供水量有关,而且与水肥供应的时机有关,综合影响还有待于进一步研究。

4 结论

(1)不同水肥处理下夏玉米/冬小麦农田生态系统均表现为碳汇,农田净生态系统生产固碳量(C_{NEP})表现为夏玉米高于冬小麦,平均值分别为 7 023、6 173 kg/hm²。在节水节肥原则下,夏玉米灌水 76.5 mm、施氮 255 kg/hm²、施磷 76.5 kg/hm²,冬小麦灌水 98 mm、施氮 178.5 kg/hm²、施磷 127.5 kg/hm²,有利于增加农田 C_{NEP} 。

(2)灌水对夏玉米、冬小麦农田 C_{NEP} 的影响有所不同。夏玉米在高肥条件下,高水较低水增加 0.46%,差异不显著,在低肥条件下,高水较低水增加 3.61%,差异显著;而冬小麦在高肥条件下,高水较低水增加 9.49%,差异显著,在低肥条件下,高水

较低水增加 9.78%,差异显著。夏玉米在中肥条件下,中水比低水显著增加 5.86%;而冬小麦在中肥条件下,中水比低水降低 3.90%。夏玉米/冬小麦农田生态系统周年内各施肥水平下增加灌水均促进农田 C_{NEP} 累积,高肥和低肥条件下的增幅大于中肥。

(3)施肥对夏玉米、冬小麦农田 C_{NEP} 的影响并不一致。夏玉米在高水条件下,高肥较低肥增加 1.48%,差异不显著;在中水条件下,中肥较低肥显著增加 3.97%;在低水条件下,高肥较低肥显著增加 4.67%。冬小麦在高水条件下,高肥较低肥增加 0.33%,差异不显著;在中水条件下,中肥较低肥降低 1.30%;在低水条件下,高肥较低肥增加 0.60%,差异不显著。夏玉米/冬小麦农田生态系统周年内各供水水平下增加施肥均促进农田 C_{NEP} 累积, C_{NEP} 增加比例与灌水量呈负相关。

(4)在低水条件下,与单施氮肥(N 施用量 210 kg/hm²)、磷肥(P₂O₅施用量 63 kg/hm²)相比,夏玉米氮磷肥配施处理(N 施用量 210 kg/hm²,P₂O₅施用量 63 kg/hm²)农田 C_{NEP} 显著增加,且氮磷肥交互作用显著。冬小麦氮磷肥配施处理(N 施用量 147 kg/hm²,P₂O₅施用量 105 kg/hm²)较不施肥处理 C_{NEP} 显著增加 10.38%,氮磷交互作用不显著。

(5)水肥供应水平相差 15% 和 30% 时,灌水与施肥交互作用对夏玉米农田 C_{NEP} 影响均不显著;水肥供应水平相差 15% 时,灌水与施肥对冬小麦农田 C_{NEP} 有显著的正交互作用。

参 考 文 献

[1] 刘昱,陈敏鹏,陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9.
LIU Yu, CHEN Minpeng, CHEN Jining. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 1-9. (in Chinese)

[2] 刘晶晶,张阿凤,冯浩,等. 不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 169-179.
LIU Jingjing, ZHANG Afeng, FENG Hao, et al. Influences of different irrigation amounts on carbon sequestration in wheat-maize rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 169-179. (in Chinese)

[3] 牛灵安,郝晋珉,张宝忠,等. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1054-1060.
NIU Ling'an, HAO Jinmin, ZHANG Baozhong, et al. Soil respiration and carbon balance in farmland ecosystems on North China Plains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1054-1060. (in Chinese)

[4] 张恒恒,严昌荣,张燕卿,等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240-247.
ZHANG Hengheng, YAN Changrong, ZHANG Yanqing, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 240-247. (in Chinese)

[5] 王冬林,冯浩,李毅,等. 砾石覆盖条件下土壤水热效应对冬小麦田 CO₂ 排放的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):223-230.
WANG Donglin, FENG Hao, LI Yi, et al. Impacts of soil water and temperature effects on CO₂ emissions in winter wheat field under gravel mulching condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):223-230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170928&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.028. (in Chinese)

[6] 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第 236 次香山科学会议侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 587-590.

[7] 金琳,李玉娥,高清竹,等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 734-743.
JIN Lin, LI Yu'e, GAO Qingzu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. Scientia

- Agricultura Sinica, 2008, 41(3): 734–743. (in Chinese)
- [8] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570–574.
- [9] HOUGHTON R A, GOODALE C L. Effects of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems[J]. Ecosystems and Land Use Change, 2004, 153: 85–98.
- [10] CLAY D E, CHANG J, CLAY S A, et al. Corn yields and no-tillage affects carbon sequestration and carbon footprints[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(3): 763–770.
- [11] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget [J]. Science, 1978, 199(4325): 141–146.
- [12] PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009–1013.
- [13] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 156–160.
HUANG Bin, WANG Jingguo, GONG Yuanshi, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(1): 156–160. (in Chinese)
- [14] 王玉英, 胡春胜, 程一松, 等. 太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳截存及其气体调节价值[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1508–1515.
WANG Yuying, HU Chunsheng, CHENG Yisong, et al. Carbon sequestrations and gas regulations in summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Taihang mountains, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(7): 1508–1515. (in Chinese)
- [15] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2413–2425.
WANG Xiaoyun, CAI Huanjie, LI Liang, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2413–2425. (in Chinese)
- [16] 于爱忠, 柴强. 供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 778–786.
YU Aizhong, CHAI Qiang. Effects of plastic film mulching and irrigation quota on yield of corn in arid oasis irrigation area [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 778–786. (in Chinese)
- [17] 周立峰, 冯浩. 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 31–36.
- [18] FLANAGAN L B, JOHNSON B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(34): 237–253.
- [19] NORTON U, MOSIER A R, MORGAN J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1421–1431.
- [20] 魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 428–444.
WEI Tingbang, CHAI Qiang, WANG Weimin, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428–444. (in Chinese)
- [21] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028–1035.
QIAO Yunfa, MIAO Shujie, WANG Shuqi, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 1028–1035. (in Chinese)
- [22] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 395–401.
LIANG Yao, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat-maize-soybean rotation system [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 395–401. (in Chinese)
- [23] LU F, WANG X, HAN B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland [J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281–305.
- [24] TRIBERTI L, NASTRI A, GIORANI G, et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29(1): 13–20.
- [25] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1215–1222.
LI Shuo, LI Youbing, WANG Shujuan, et al. Effects of different straw-returning regimes on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 1215–1222. (in Chinese)
- [26] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1456–1463.
LÜ Yanjie, YU Haiyan, YAO Fanyun, et al. Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(11): 1456–1463. (in Chinese)
- [27] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 等. 青藏高原农田生态系统碳平衡[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 636–642.
LIU Yunfen, OUYANG Hua, ZHANG Xianzhou, et al. Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 636–642. (in Chinese)
- [28] 杨硕欢, 张保成, 王丽, 等. 水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4780–4788.
YANG Shuohuan, ZHANG Baocheng, WANG Li, et al. Comprehensive effects of the application of water and fertilizer amount on CO₂ emission from soils of summer-maize field [J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4780–4788. (in Chinese)
- [29] CAO M, PRINCE S D, LI K, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China [J]. Global Change Biology, 2003, 9(4): 536–546.

- [30] 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): 1621 – 1631.
- [31] 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.
- [32] 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 CO₂ 排放估算[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2035 – 2042.
LEI Hongjun, LI Baoguo, BAI Youlu, et al. Estimation of soil organic matter mineralization in the plough layer and CO₂ emission under differen farming practices in China's Huang – Huai – Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(10): 2035 – 2042. (in Chinese)
- [33] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4273 – 4280.
CAI Yan, DING Weixin, CAI Zucong. Soil respiration in a maize – soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4273 – 4280. (in Chinese)
- [34] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5254 – 5261.
HAN Guangxuan, ZHOU Guangsheng, XU Zhenzhu, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L) agricultural field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5254 – 5261. (in Chinese)
- [35] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3354 – 3360.
ZHANG Yu, ZHANG Hailin, CHEN Jikang, et al. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3354 – 3360. (in Chinese)
- [36] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 18 – 24.
LI Yinkun, CHEN Minpeng, XIA Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 18 – 24. (in Chinese)
- [37] HOLLINGER S E, BERNACCHI C J, MEYERS T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1): 59 – 69.
- [38] 刘安能, 孟兆江. 玉米调亏灌溉效应及其优化农艺措施[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 107 – 112.
LIU Anneng, MENG Zhaojing. Effects of regulated deficit irrigation and optimized agronomic measures of corn[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 107 – 112. (in Chinese)
- [39] 刘殿英, 石立岩, 董庆裕. 不同时期追施肥水对冬小麦根系, 根系活性和植株性状的影响[J]. 作物学报, 1993, 19(2): 149 – 155.
- [40] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719 – 733.
HAN Guangxuan, ZHOU Guangsheng, XU Zhenzhu. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719 – 733. (in Chinese)
- [41] LI J, YU Q, SUN X, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(Supp. 2): 226 – 240.
- [42] 汤亿, 严俊霞, 孙明, 等. 灌溉和翻耕对土壤呼吸速率的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6): 2625 – 2627, 2671.
- [43] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972 – 978.
- [44] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 不同施肥制度对作物产量及土壤磷素肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 885 – 889.
YU Wantai, JIANG Zishao, MA Qiang, et al. Effect of different fertilization systems on soil phosphorus fertility and crop yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 885 – 889. (in Chinese)
- [45] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 301 – 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200632&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.032. (in Chinese)
- [46] DING W, MENG L, YIN Y, et al. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(2): 669 – 679.
- [47] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1093 – 1099.
LI Juan, ZHAO Bingqiang, LI Xiuying, et al. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1093 – 1099. (in Chinese)
- [48] 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): 2420 – 2430.
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): 2420 – 2430. (in Chinese)
- [49] 马强, 宇万太, 沈善敏, 等. 下辽河平原水肥交互作用及对玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 29 – 33.
- [50] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 676 – 681.
WANG Zhaohui, LI Shengxiu, WANG Xi'na, et al. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors[J]. Soils, 2006, 38(6): 676 – 681. (in Chinese)