

保护性耕作对小麦/玉米间作系统生产效率 和可持续性的影响

王琦明, 胡发龙, 柴强

引用本文:

王琦明, 胡发龙, 柴强. 保护性耕作对小麦/玉米间作系统生产效率 和可持续性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1344–1353.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田、一膜两年用及间作对农田碳排放的短期效应

Short-term response of farmland carbon emission to straw return, two-year plastic film mulching and intercropping
中国生态农业学报. 2016, 24(6): 716–724 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151309>

华北平原缺水保护区保护性耕作技术

Conservation tillage technology for water-deficit areas in the North China Plain
中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1537–1545 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180615>

不同耕作措施对雨养冬小麦碳足迹的影响

Effect of tillage practice on carbon footprint of rainfed winter wheat
中国生态农业学报. 2017, 25(6): 839–847 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160981>

内陆灌区小麦秸秆还田对玉米光能利用及水分生产效益的影响

Effect of wheat straw retention on light energy utilization and water production benefits of maize in inland irrigated region
中国生态农业学报. 2018, 26(6): 847–855 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171115>

基于LCA的不同间作体系产量优势及温室效应研究

Yield improvement and greenhouse effect of different intercropping systems based on life cycle assessment
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 159–167 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190704>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190063

王琦明, 胡发龙, 柴强. 保护性耕作对小麦/玉米间作系统生产效率和可持续性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1344–1353

WANG Q M, HU F L, CHAI Q. Effect of conservation tillage on natural resources utilization efficiency and sustainability of integrated wheat-maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1344–1353

保护性耕作对小麦/玉米间作系统生产效率 和可持续性的影响*

王琦明^{1,3}, 胡发龙^{2,3}, 柴强^{2,3**}

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 3. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070)

摘要: 农田复合系统是集约化农作的有效途径之一, 在增加生物多样性和提高产量方面具有重要作用。干旱区农业生产中, 温室气体减排和作物耗水减量是发展高效可持续农业的重要参考指标, 研发基于作物复合生产的模式是该区节水、减排和可持续农业发展面临的重大课题。本研究以河西绿洲灌区长期规模化种植的小麦/玉米复合生产系统为对象, 于 2010—2012 年度在甘肃农业大学校地联合绿洲农业科研教学基地(武威站), 通过集成免耕立茬(NTS)、免耕秸秆覆盖(NTM)、少耕秸秆翻压(RTS)形成不同小麦/玉米间作复合系统, 并以传统间作(CTI)为对照, 重点研究了不同系统的土壤碳排放量和水分利用特征, 比较分析了其生产效率和可持续性。结果表明, 小麦和玉米复合系统的生物热能产较单作小麦提高 113%, 较单作玉米提高 21%, 该系统基于生物热能产的土地当量比均大于 1。农田复合生产系统能有效降低土壤 CO₂ 排放, 特别是集成免耕秸秆覆盖的间作系统, 土壤 CO₂ 排放量比单作玉米降低 12%, 比传统间作降低 13%, 排放效率比单作玉米提高 39%, 比传统间作提高 31%。此外, 农田复合生产系统还显著降低了作物耗水, 与传统间作相比, 集成免耕秸秆覆盖的间作系统的棵间蒸发量、耗水总量和单位耗水碳排放量分别降低 11%、5%和 9%, 但单位耗水生物热能产提高 19%。农田复合生产系统较传统间作具有更高的土地当量比(1.78)、碳排当量比(1.48)和耗水当量比(1.22), 三者分别提高 14%、28%和 20%, 因而其可持续评价指数提高了 13%。小麦/玉米间作集成免耕秸秆覆盖的农田复合生产系统可作为河西绿洲灌区高效可持续农作的可行模式。

关键词: 小麦/玉米间作; 保护性耕作; 土壤 CO₂ 排放; 水分利用; 生物热能产

中图分类号: S344

文章编号: 2096-6237(2019)09-1344-10

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effect of conservation tillage on natural resources utilization efficiency and sustainability of integrated wheat-maize intercropping system*

WANG Qiming^{1,3}, HU Falong^{2,3}, CHAI Qiang^{2,3**}

(1. Faculty of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China)

* 国家公益性行业(农业)科研专项(201503125-3)和国家自然科学基金项目(31771738, 31860363)资助

** 通信作者: 柴强, 主要从事多熟种植、节水农业和循环农业的研究。E-mail: Chaiq@gsau.edu.cn

王琦明, 主要从事农田生态系统研究。E-mail: wangqiming0614@yahoo.com

收稿日期: 2019-01-20 接受日期: 2019-04-03

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503125-3) and the National Natural Science Foundation of China (31771738, 31860363).

** Corresponding author, E-mail: Chaiq@gsau.edu.cn

Received Jan. 20, 2019; accepted Apr. 3, 2019

Abstract: The integrated production system is effective for crop intensification and also plays an important role in improving biodiversity and grain yield. The reduction of greenhouse gas emissions and crop water consumption are important parameters in developing high-efficient and sustainable agriculture in arid areas. Researches on soil carbon emission, water use and characteristic of the integrated production system will benefit the productivity and sustainability of agricultural practices in this region. The experiment was carried out in 2011 and 2012 at the Oasis Agricultural Scientific Researching and Teaching Station of Gansu Agriculture University and Local Government, China. Wheat-maize intercropping system was used as the object of this study due to its long-term application in Hexi Oasis region. Through integration, different conservation practices, including no-till with stubble standing, no-till with stubble mulching, and reduced tillage with stubble incorporation were applied in wheat-maize intercropping system forming three integrated production systems (named NTS, NTM and RTS, respectively), with conventional intercropping (CTI), conventional monocropped maize (CTM) and wheat (CTW) as the control systems. The study mainly focused on soil carbon emission and water use characteristics of different cropping systems, and further compared the differences in system effectiveness and sustainability. Results showed that the energy yield of integrated wheat-maize intercropping system increased by 113% over monocropping wheat, and by 21% over monocropping maize, and the land equivalent ratios of integrated intercropping systems based on energy yield were greater than 1. The integrated system also significantly reduced soil CO₂ emission, especially for the NTM, of which, the soil CO₂ emission was reduced by 12% than CTM, and by 13% than CTI. Also, its' CO₂ emission efficiency increased by 39% over CTM, and by 31% over CTI. In addition, the integrated system significantly reduced the crop water consumption. Compared to CTI, NTM reduced evaporation, water consumption and carbon emission per unit of water by 11%, 5% and 9%, respectively. Nevertheless, the energy yield per unit of water improved by 19%. Compared to CTI, land (1.78), carbon (1.48) and water (1.22) equivalent ratios improved by 14%, 28% and 20% under NTM respectively. Therefore, the sustainability index was enhanced by 13% over the CTI. Consequently, the integrated wheat-maize production system can be used as a high-efficient and sustainable cropping model in the Hexi Oasis Irrigation Area.

Keywords: Wheat-maize intercropping; Conservation tillage; Soil CO₂ emission; Water utilization; Energy yield

集约化农作是中国、印度等发展中国家农业生产的主要方式, 各国根据其农业生态特性积淀, 发展了各具特色的集约化农作系统^[1-2]。在这些系统中, 间作对增加生物多样性和提高粮食安全具有重要作用, 同时, 间作也是最具发展前景、应用面积最为广泛的种植模式之一^[3]。究其主要原因, 是由于间作相比其他种植模式具有更高的资源利用效率和生产力^[4]。因而, 间作也被看作是减小作物潜在产量与实际产量差的重要途径^[5-6]。然而, 传统间作在肥料和除草剂施用以及实现机械化等方面存在诸多弊端, 且间作中不合理的农作措施可能会导致较多 CO₂ 排放, 加剧温室效应^[7]。因此, 在间作系统中研究并集成具有良好表现的农作措施显得极为迫切和重要。

保护性耕作通常包括少免耕、秸秆覆盖和作物轮作等^[8], 且被广泛用于解决土壤退化、生产力低下以及温室气体排放等农业生态和环境问题^[9-10]。其主要优点是通过减少土壤扰动以及有机物还田来减少土壤 CO₂ 排放^[11]并提高土壤碳汇^[12]。同时, 保护性耕作中秸秆还田能有效抑制蒸发^[13], 减少地表径流, 增加降水入渗^[14], 从而提高作物水分利用效率^[15]。在干旱和半干旱地区, 水分是限制作物生长的决定因子^[16], 保护性耕作在节水方面的作用

对作物生长产生了较好的保护, 因而保护性耕作在这一区域发展潜力巨大^[17]。近年来, 保护性耕作因其良好表现已在间作系统中进行集成并取得可喜成果。有研究表明, 秸秆还田、一膜两年用与间作集成在短期内可以减少作物生育期内碳排放^[18], 同时免耕秸秆还田地膜再利用的间作模式较单作玉米可以增产 14%~17%^[19]。由此形成的农田复合循环生产系统在节水、减排和提高生产效率等方面具有重大优势^[20]。

在应对耕地面积锐减和用水矛盾突出等问题, 以及节水、减排等方面^[2,5], 间作复合系统集成保护性耕作是可行途径。然而, 有关农田复合循环生产系统的可持续性研究尚未涉及。随着农业资源供需矛盾加剧, 农业生产的可持续性成为研究的焦点^[7], 特别是在粮食产出较多的河西绿洲灌区, 农业生产的可持续性已成为该区经济发展亟待解决的首要问题^[21]。为此, 本研究以试区主栽模式小麦(*Triticum aestivum*)间作玉米(*Zea mays*)为对象, 通过集成应用保护性耕作的理论与技术, 建立小麦玉米农田复合系统, 重点探讨复合系统的土壤 CO₂ 减排、水分利用和生产效率, 评价其可持续性, 以期建立高效可持续的间作生产系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2010—2012 年在甘肃农业大学校地联合绿洲农业科研教学基地(武威站)进行,该站位于甘肃河西走廊东端(37°96'N, 102°64'E, 海拔 1 506 m),属寒温带干旱区,大陆性气候,太阳辐射总量 6 000 MJ·m⁻², 年均日照时数>2 945 h, 年平均气温 7.2 °C, ≥0 °C 年积温为 3 513 °C, ≥10 °C 年积温为

2 985.4 °C, 干燥度 5.85, 无霜期 155 d, 土壤类型为厚层灌漠土, 0~90 cm 土壤容重 1.57 g·cm⁻³, 0~30 cm 土层土壤全氮 0.68 g·kg⁻¹, 全磷 1.41 g·kg⁻¹, 有机质 14.31 g·kg⁻¹, 常年降雨量不超过 160 mm, 但年蒸发量大于 2 400 mm, 2011 年和 2012 年作物生育期各月气温、降雨量和参考蒸发量如表 1 所示。小麦间作玉米是该区长期规模化应用的高产高效种植模式。

表 1 武威站 2011—2012 年作物生育期内逐月气象资料
Table 1 Monthly meteorological data during the growing season in Wuwei Station in 2011 and 2012

年份 Year	项目 Item	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
2011	温度 Temperature (°C)	1.7	9.2	16.3	21.7	22.8	21.0	14.6
	降雨量 Rainfall (mm)	5.2	2.5	27.3	15.5	37.8	90.2	41.4
	参考蒸发 ET ₀ (mm)	1.3	2.5	3.9	4.3	4.3	3.5	3.3
2012	温度 Temperature (°C)	2.7	10.4	13.8	18.0	19.1	18.8	12.9
	降雨量 Rainfall (mm)	9.2	14.8	22.8	21.3	52.6	18.6	32.9
	参考蒸发 ET ₀ (mm)	1.8	4.3	3.4	4.5	4.7	3.0	2.7

1.2 试验设计

2010 年进行预备试验, 为后续试验处理提供相应的茬口处理, 2011—2012 年对相关数据进行采集和整理。参试小麦品种为‘永良 4 号’, 玉米品种为‘武科 2 号’, 同种作物在单作和间作模式中的播种、收获时间相同。小麦于 2011 年 3 月 28 日和 2012 年 3 月 19 日播种, 分别于 7 月 22 日和 7 月 18 日收获; 玉米于 2011 年 4 月 17 日和 2012 年 4 月 20 日播种, 分别于 9 月 29 日和 9 月 30 日收获。试验年度内(2011—2012 年), 小麦播种到收获期降水量分别为 65.8 mm 和 40.5 mm, 玉米播种到收获期降水量分别为 179.1 mm 和 128.5 mm, 小麦间作玉米生育期降水量分别为 200.6 mm 和 146.9 mm。

试验通过设置不同耕作和秸秆还田间作来构成 3 种农田复合系统和传统间作系统。2010 年小麦收获期间作小麦根据翌年处理需要进行相应收割, 即 25 cm 高茬收割、低茬收割留 25 cm 等量秸秆覆盖(小麦带)、低茬收割留 25 cm 等量秸秆翻压(小麦带)和低茬收割并移除秸秆; 玉米收获后玉米秸秆全部移除, 并根据翌年处理需要, 对间作小麦带进行相应耕作处理, 即免耕、少耕和传统耕作, 而玉米带全部翻耕, 并由此形成不同的带状耕作处理。2011 年以上一年耕作和还田措施为基础设不同农田复合系统和传统间作系统: 25 cm 高茬收割免耕小麦-玉米(免耕+高茬, NTS)、25 cm 高等量秸秆覆盖免耕小麦-玉米(免耕+覆盖, NTM)、25 cm 高等量秸秆翻压小

麦-玉米(少耕+翻压, RTS)和低茬收割翻耕小麦-玉米(传统, CTI), 另设传统收割单作小麦(CTW)和单作玉米(CTM)作为对照, 共计 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区。玉米收获后单作小麦、单作玉米和传统间作全部翻耕, 并移除所有秸秆; 而保护性间作, 即 NTS、NTM 和 RTS 继续采用带状耕作, 即玉米带全部翻耕, 小麦带则进行相应的留茬免耕、覆盖免耕和浅耕翻压。2012 年, 单作和各间作处理小麦、玉米轮换种植, 即现年小麦次年轮种玉米, 现年玉米次年轮种小麦。小麦和玉米均采用平作, 玉米覆膜, 具体系统参数见图 1 和表 2。

1.3 测定指标

土壤呼吸速率(Rs): 土壤呼吸速率用土壤呼吸测定系统 EGM-4(environmental gas monitor-4, UK, PP system)测定, 测定时将呼吸室置于小区作物行间, 收集从土壤释放的 CO₂, 每点测定 5 个值。土壤呼吸速率日变化每 2 h 测定一次, 测定时长为全天; 季节变化在作物主要生育时期测定, 即在作物生育期内, 每隔 2 周测定一次^[22]。对玉米带测定前 12 h, 将玉米带地膜揭出呼吸室边缘大小的裸区, 让膜内累积的 CO₂ 排出, 测定时视为玉米带土壤的呼吸值。间作群体分别测定不同作物带土壤呼吸速率, 并将两作物带呼吸速率的均值作为整个小区的土壤呼吸速率。

土壤含水量(WC): 每 20 d 测定一次, 播前、收获后、灌水前、灌水后加测, 测深 110 cm。测定时, 前 30 cm 采用烘干法, 用土钻人工取土, 每 10 cm 为

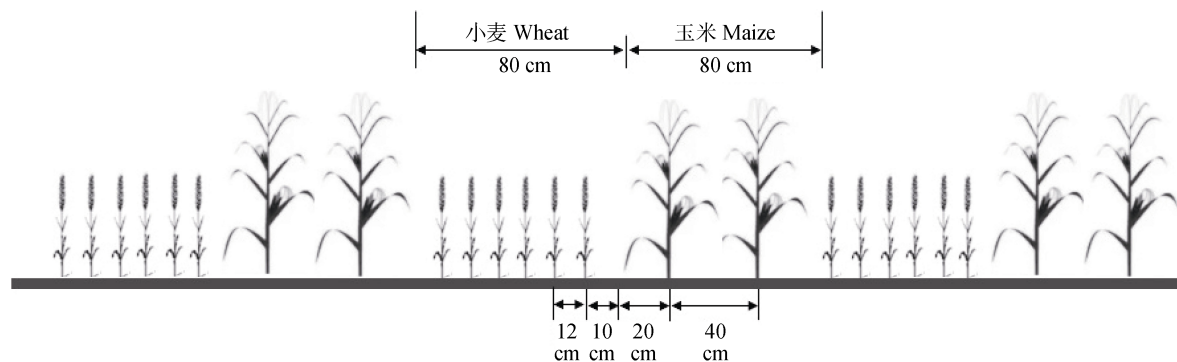


图1 小麦/玉米间作示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of maize and wheat intercropping

表2 不同小麦/玉米间作复合生产系统主要农艺参数

Table 2 Major agronomic parameters of various wheat and maize intercropping system

作物系统 Cropping system	作物 Crop	带宽 Strip width (cm)	膜宽 Mulch width (cm)	行数 Row number	行距 Rows spacing (cm)	株距 Plants spacing (cm)	密度 Planting density (plants·hm ⁻²)
间作 Intercropping	小麦 Wheat	80	—	6	12	—	6 750 000
	玉米 Maize	80	80	2	40	24	82 500
单作小麦 Monocropping wheat	小麦 Wheat	—	—	—	12	—	3 750 000
单作玉米 Monocropping maize	玉米 Maize	—	120	3	40	30	52 500

一分层; 30~110 cm用中子水分仪测定, 其中, 30~50 cm为20 cm一分层, 50~110 cm每30 cm为一分层。单作处理中, 每小区设1个测定点, 3个重复的平均值作为该处理土壤含水量测定值; 间作处理中, 每小区分别在小麦和玉米种植带各设1个测定点, 2点平均值作为小区土壤含水量测定值, 3个重复的平均值作为一个处理的土壤水分含量测定值。

棵间蒸发量(E): 采用自制微型蒸发器(Micro-lysimeter, ML, 高15 cm, 直径11 cm)进行测定。ML中土样每减少1 g相当于蒸发水分0.105 2 mm, 用精度为0.01的LP3102型电子天平称重以计算棵间蒸发量。为保证ML内土体水分含量和结构与大田相似, 每隔3~5 d更换器内的原状土体, 并且在下雨或灌水后加测。单作处理每小区安装1个ML; 间作处理分别在小麦和玉米种植带中部各安装1个ML, 2点平均值作为小区蒸发量; 同一处理3个重复的平均值作为该处理的棵间蒸发量测定值。

生物热能产(EY): 生物产量由籽粒产量(GY)和秸秆产量(SY)两部分构成, 籽粒产量分别于小麦和玉米成熟期按小区收获, 单独脱粒并记产; 秸秆产量根据考种结果(小麦取20株, 玉米取15株)和种植密度计算。因此, 生物热能产按公式(1)计算^[21]:

$$EY = GY \times E_g + SY \times E_s \quad (1)$$

式中: E_g 和 E_s 分别表示不同作物籽粒和秸秆的热能值, 小麦和玉米籽粒热能值为16.3 MJ·kg⁻¹, 秸秆热

能值为14.6 MJ·kg⁻¹。

1.4 计算指标

1.4.1 土壤CO₂排放量与作物耗水量

土壤CO₂排放量(CE)根据Qin等^[22]公式计算:

$$CE = \sum \left[\frac{R_{si+1} + R_{si}}{2} (t_{i+1} - t_i) \times 0.158 4 \times 24 \right] \times 10 \quad (2)$$

式中: R_s 表示土壤呼吸速率, 测定间隔为两周; $i+1$ 和 i 分别指上次和本次测定日期; t 表示播种后天数; 0.158 4 是将 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 转换为 $\text{g}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的系数; 24和10是将 $\text{g}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 转化为 $\text{kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2}$ 的系数。

作物耗水量(ET)根据Yang等^[23]公式计算:

$$ET = P_e + I + \Delta S \quad (3)$$

式中: P_e 为生育期内有效降雨量, I 为灌溉量, ΔS 表示播种前和收获后土壤贮水量的差值。由于本试验设计的灌水量相对较小, 且试验区地下水埋深在30 m以下, 故忽略了渗漏量和地下上升水的影响。

1.4.2 系统生产效率

CO₂排放效率(CEE)表示生育期内农田土壤每排放1 kg CO₂所能生产的生物热能产:

$$CEE = EY / CE \quad (4)$$

式中: EY为不同作物系统单位面积生物热能产, CE为生育期内土壤CO₂排放总量。

水分利用效率(WUE)可分解为单位耗水生物热能产(WUE_{EY})和单位耗水碳排(WUE_{CE})两部分, 一个作物系统具有较高的WUE_{EY}和较低的WUE_{CE}表示

其对水分能进行高效利用。二者分别表示每消耗1个单位土壤水分所生产的生物热能产和产生的土壤CO₂排放量, 计算公式为:

$$WUE_{EY}=EY/ET \quad (5)$$

$$WUE_{CE}=CE/ET \quad (6)$$

式中: EY为不同作物系统生物热能产, 间作复合系统的生物热能产为两种作物的总和; CE为不同作物系统生育期内土壤CO₂排放总量; ET为不同作物系统生育期总耗水量。

1.4.3 复合系统的生产优势

土地当量比(LER)量化了间套作复合系统生产力及土地利用效率:

$$LER=EY_{WI}/EY_{WM}+EY_{MI}/EY_{MM} \quad (7)$$

式中: EY_{WI}和EY_{WM}分别表示小麦在间作和单作时的生物热能产(kg·hm⁻²), EY_{MI}和EY_{MM}分别表示玉米在间作和单作时的生物热能产(kg·hm⁻²)。LER>1.0, 表明间作比单作的资源利用率高, 即间作优势; 当LER<1.0, 单作比间作资源利用高, 即间作劣势。

碳排当量比(CER)可量化单作模式产生与间作模式相同土壤碳排放所生产的生物热能产:

$$CER=CEE_{WI}/CEE_{WM}+CEE_{MI}/CEE_{MM} \quad (8)$$

式中: CEE_{WI}和CEE_{WM}是小麦间作和单作土壤的CO₂排放效率(kg·kg⁻¹), CEE_{MI}和CEE_{MM}是玉米间作和单作土壤的CO₂排放效率(kg·kg⁻¹)。CER>1.0时, 表明每产生1个单位土壤CO₂排放时, 间作具有比单作生产更多生物热能产的潜力, 即间作具有降低土壤碳排的作用, 反之亦然。

耗水当量比(WER)可量算单作模式消耗与间作模式相同单位的土壤水分时所生产的生物热能产(生物热能产耗水当量比, WER_{EY})或产生的土壤CO₂排放量(碳排耗水当量比, WER_{CE}):

$$WER=WUE_{WI}/WUE_{WM}+WUE_{MI}/WUE_{MM} \quad (9)$$

式中: WUE_{WI}和WUE_{WM}是间作和单作小麦的单位耗水生物热能产(WUE_{EY}, kg·hm⁻²·mm⁻¹)或单位耗水碳排(WUE_{CE}, kg·hm⁻²·mm⁻¹), WUE_{MI}和WUE_{MM}是间作和单作玉米的单位耗水生物热能产(WUE_{EY}, kg·hm⁻²·mm⁻¹)或单位耗水碳排(WUE_{CE}, kg·hm⁻²·mm⁻¹)。WER_{EY}>1.0, 表明每消耗1个单位土壤水分, 间作能比单作生产更多生物热能产, 即间作具有更高的水分生产效益, 反之亦然; WER_{CE}<1.0时, 表明每消耗1个单位土壤水分时, 间作具有比单作减少土壤CO₂排放的潜力, 从而实现水分高效利用。

1.4.4 作物生产系统的可持续性

不同作物系统的可持续性根据Chai等^[21]建立的可持续性评价指数进行比较, 该指数的数学计算体

系共由两步构成。

$$\text{第一步: } a_1x_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\max}} \begin{pmatrix} i=1, 2, 3, \dots, 6 \\ j=1, 2, 3, 4 \end{pmatrix} \text{ or } a_2x_{ij} = \frac{x_{\min}}{x_{ij}} \begin{pmatrix} i=1, 2, 3, \dots, 6 \\ j=5, 6 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: ax_{ij} 为表 5 第 i 行 × 第 j 列的数据标准化值 ($0 < ax_{ij} \leq 1$), x_{ij} 为系统 i 与参考指标 j 的实际值, $x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 为每个参考指标的最大值与最小值。

第二步:

$$\beta x_{ij} = \frac{1}{a_1x_{ij}} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_1x_{ij} - a_2x_{ij})^2} \begin{pmatrix} i=1, 2, 3, \dots, 6 \\ j=1, 2, 3, \dots, 6 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: βx_{ij} 为标准化系数, m 为系统 i 或参考指标 j 的最大数。

$$\text{Index} = \sum_{j=1}^m \left(ax_{ij} \times \frac{\beta x_{ij}}{\sum_{j=1}^m \beta x_{ij}} \right) \begin{pmatrix} i=1, 2, 3, \dots, 6 \\ j=1, 2, 3, \dots, 6 \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: Index 为不同作物系统的可持续性评价指数, 该指数的数值越大说明系统的可持续性越好。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 整理汇总, 用 SPSS 24.0 进行显著性检验和 LSD 分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦/玉米复合生产系统的生物热能产和土地当量比

与单作系统相比, 间作系统能显著提高小麦和玉米的生物热能产(图2A)。两年平均显示, 间作系统的生物热能产比单作小麦提高113%, 比单作玉米提高21%。在比较净占地面积上的作物生物热能产时发现, 间作使小麦生物热能产提高55%, 使玉米提高54%。因此, 不同间作复合系统以生物热能产计算的当量比均大于1(图2B), 表明间作系统对资源利用具有显著优势。不同作物系统中, 以间作构建的小麦/玉米农田复合系统(NTM)生物热能产和土地当量比最高。与传统间作系统(CTI)相比, NTM的生物热能产提高16%(2011年)和13%(2012年), 相应地, 土地当量比提高14%(2011年)和13%(2012年)。然而, 免耕立茬(NTS)和少耕秸秆翻压(RTS)构建的小麦玉米农田复合系统对作物生物热能产和土地当量比的影响没有持续性。

2.2 不同小麦玉米复合生产系统的土壤CO₂排放特征

2.2.1 生育期内土壤CO₂排放总量

与传统单作玉米相比, 间作复合生产系统能显著降低生育期内土壤CO₂排放总量(表3)。总体上, 小麦/玉米复合生产系统土壤CO₂年排放总量为8.84 t·hm⁻², 较单作玉米(10.02 t·hm⁻²)降低11%。免耕结合秸秆覆

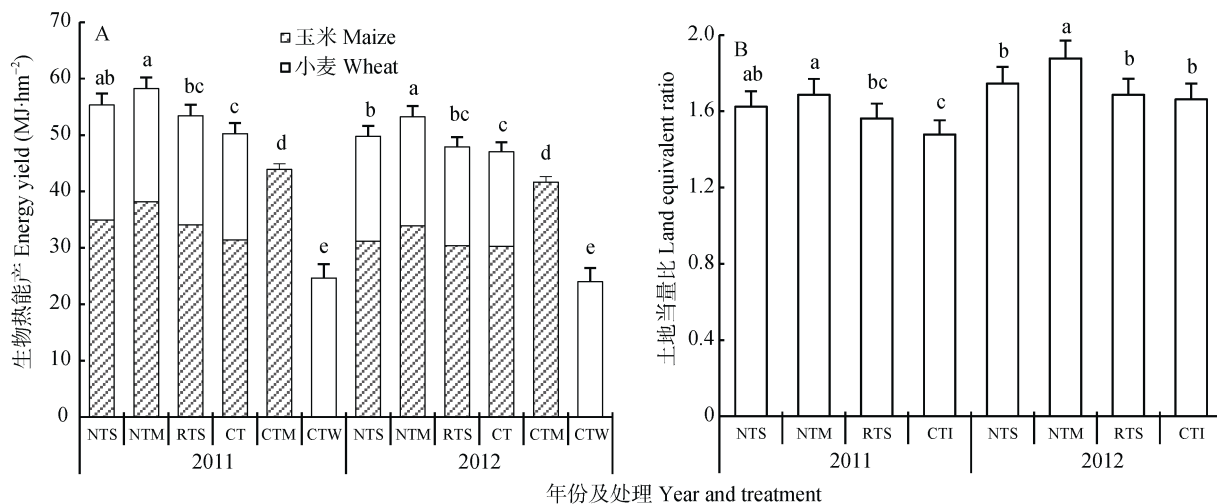


图2 2011年和2012年不同耕作方式下小麦/玉米复合生产系统的生物热产能(A)和土地当量比(B)

Fig. 2 Energy yield (A) and land equivalent ratio (B) of wheat and maize intercropping systems under different tillage practices in 2011 and 2012

NTS: 免耕立茬间作; NTM: 免耕秸秆覆盖间作; RTS: 少耕秸秆翻压间作; CTI: 传统间作; CTM: 传统单作玉米; CTW: 传统单作小麦。不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NTS: no-till with stubble standing of intercropping system; NTM: no-till with stubble mulching of intercropping system; RTS: reduced tillage with stubble incorporation of intercropping system; CTI: conventional intercropping system; CTM: conventional monocropping of maize; CTW: conventional monocropping of wheat. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表3 2011年和2012年不同耕作方式下小麦/玉米复合生产系统土壤CO₂排放特征

Table 3 Soil CO₂ emission characteristics of wheat and maize intercropping systems under different tillage practices in 2011 and 2012

处理 Treatment	土壤 CO ₂ 排放量 Soil CO ₂ emission (t·hm ⁻²)		CO ₂ 排放效率 Carbon emission efficiency (MJ·kg ⁻¹)		碳排当量比 Carbon equivalent ratio	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
NTS	10.3a	8.6c	53.7d	57.6b	1.10c	1.39b
NTM	7.9c	8.4c	73.8a	63.6a	1.46a	1.50a
RTS	8.4c	8.5c	63.8b	56.3b	1.33b	1.35c
CTI	9.6b	9.1bc	52.6d	52.0d	1.10c	1.22d
CTW	4.1d	4.3d	60.7c	55.8bc	—	—
CTM	10.4a	9.7a	42.4e	43.0e	—	—
<i>P</i> -value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LSD (0.05)	0.44	0.14	2.7	2.2	0.05	0.07

NTS: 免耕立茬间作; NTM: 免耕秸秆覆盖间作; RTS: 少耕秸秆翻压间作; CTI: 传统间作; CTM: 传统单作玉米; CTW: 传统单作小麦。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NTS: no-till with stubble standing of intercropping system; NTM: no-till with stubble mulching of intercropping system; RTS: reduced tillage with stubble incorporation of intercropping system; CTI: conventional intercropping system; CTM: conventional monocropping of maize; CTW: conventional monocropping of wheat. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

盖可显著降低小麦/玉米复合生产系统的土壤CO₂排放总量,与CTI相比,NTM的土壤CO₂排放总量平均降低12%。少耕秸秆翻压具有相似作用,与CTI相比,RTS的土壤CO₂排放总量平均降低9%。比较同种作物在相同占地面积下单作与间作复合系统土壤CO₂排放总量差异发现,小麦/玉米农田复合循环系统CO₂排放总量显著降低。与单作小麦相比,NTM小麦带降低13%,玉米带降低12%;RTS小麦带降低6%,玉米带降低11%。

2.2.2 土壤 CO₂ 排放效率和碳排当量比

由于小麦/玉米复合生产系统生物热产能高但

土壤CO₂排放量低,因而其CO₂排放效率(CEE)显著高于单作玉米(表3)。与单作玉米相比,间作复合系统的CEE提高39%。因此,不同间作复合系统的碳排当量比(CER)均大于1,且玉米组分的碳排当量比明显高于小麦,其主要原因是间作玉米比单作具有更高的CEE。与单作玉米相比,间作玉米的CEE提高52%,说明在生产相同单位数量的生物热产能时,单作玉米比间作玉米要多释放1.5 kg土壤CO₂。因此,间作系统不仅能有效利用土地资源,更能显著降低土壤CO₂排放量。比较不同间作复合系统发现,由少免耕和秸秆还田构建的小麦玉米农田复合系统比传

统间作的CEE和CER均有提高,特别是NTM系统,其CEE和CER最大,分别比CTI提高31%和28%。

2.3 不同小麦玉米复合生产系统的耗水特征

2.3.1 棵间蒸发量、E/ET 和耗水总量

不同小麦玉米复合生产系统棵间蒸发按其对应作物的生育期进行测定,因而间作系统的棵间蒸发显著高于两种单作系统(表4)。两年平均发现,单作小麦

年均棵间蒸发150 mm,单作玉米年均蒸发267 mm,间作系统年均蒸发287 mm。对小麦间作玉米集成少免耕和秸秆还田能有效降低其棵间蒸发和E/ET,特别是NTM系统,其棵间蒸发和E/ET比CTI降低9%、8%(2011年)和13%、16%(2012年)。此外,由于较少的棵间蒸发和较低的E/ET,NTM系统的耗水总量比CTI降低5%(2011年)和4%(2012年)。

表 4 2011 年和 2012 年不同耕作方式下小麦/玉米复合生产系统的耗水特征

Table 4 Water use characteristics of wheat and maize intercropping systems under different tillage practices in 2011 and 2012

处理 Treatment	棵间蒸发 Evaporation (mm)		E/ET (%)		耗水总量 Water consumption (mm)		WUE _{EY} (MJ·hm ⁻² ·mm ⁻¹)		WUE _{CE} (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
NTS	297bc	261c	39.4c	38.6c	752b	676bc	735b	736b	3.74b	3.46bc
NTM	292bc	254cd	39.6c	37.9cd	736c	670c	791a	795a	2.92d	3.36c
RTS	305b	274b	40.4bc	40.0b	756b	686b	706c	698d	3.02d	3.37c
CTI	320a	293a	41.6b	42.1a	771a	695a	652e	676e	3.38c	3.55b
CTW	156e	144e	36.8d	37.8cd	424e	378e	581f	631f	2.61e	3.16d
CTM	286d	248d	44.4a	41.9a	644d	592d	682d	704c	4.39a	4.46a
P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LSD (0.05)	9.8	7.2	3.9	2.3	4.3	11.5	32.3	31.5	0.03	0.09

NTS: 免耕立茬间作; NTM: 免耕秸秆覆盖间作; RTS: 少耕秸秆翻压间作; CTI: 传统间作; CTM: 传统单作玉米; CTW: 传统单作小麦。E: 蒸发; ET: 蒸散发; WUE_{EY}: 单位耗水热能产; WUE_{CE}: 单位耗水碳排放。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NTS: no-till with stubble standing of intercropping system; NTM: no-till with stubble mulching of intercropping system; RTS: reduced tillage with stubble incorporation of intercropping system; CTI: conventional intercropping system; CTM: conventional monocropping of maize; CTW: conventional monocropping of wheat. E: evaporation; ET: evapotranspiration; WUE_{EY}: energy yield of per unit water use efficiency; WUE_{CE}: carbon emission of per unit water use efficiency. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

2.3.2 水分利用效率和耗水当量比

在由少免耕和秸秆还田构建的小麦/玉米农田复合系统中除RTS外,NTM和NTS系统的单位耗水生物热能产(WUE_{EY})均显著高于传统间作(表4)。其中,NTM系统的单位耗水生物热能产最高(年均793 MJ·hm⁻²·mm⁻¹),而单作小麦由于自身系统较小的生物热能产,其单位耗水生物热能产最低(年均606 MJ·hm⁻²·mm⁻¹)。免耕相比少耕具有持续提高单位耗水生物热能产的作用,与CTI相比,NTM系统的单位耗水生物热能产平均提高19%,NTS系统平均提高11%。因此,两个系统的生物热能产耗水当量比(WER_{EY})较CTI均有显著提高,与CTI相比,NTM系统平均提高了20%,NTS系统平均提高了11%(图3)。

不同作物系统中,单作小麦生育期内土壤CO₂排放量最小,因而其单位耗水碳排(WUE_{CE})最低,且分别比单作玉米和间作复合系统降低35%和14%(表4)。比较间作复合系统和单作玉米的单位耗水碳排差异发现,间作比单作玉米平均降低29%。在小麦/玉米间作系统中集成保护性耕作措施构建的NTM系统和RTS系统较CTI能显著降低自身系统的单位耗水碳排。与CTI相比,NTM系统的单位耗水碳排平均降低9%,RTS系统平均降低8%。因此,两个系统的碳排耗水当量比

(WER_{CE})较CTI均有显著降低,与CTI相比,NTM系统平均降低10%,NTS系统平均提高8%(图3)。

2.4 不同小麦玉米复合生产系统的可持续性

不同作物系统的可持续性评价体系参考指标包括:1)作物水分利用效率(GY/ET);2)土地当量比;3)生物热能产;4)单位耗水生物热能产;5)土壤CO₂排放量;6)单位耗水碳排。一种作物系统的可持续评价系数越高,说明该系统的可持续性越好。由表5可知,不同种植模式间可持续性指数具有较大差异,且总体表现为间作最高,单作小麦次之,单作玉米最低。由少免耕和秸秆还田构建的小麦/玉米农田复合系统能显著提高其可持续性指数,与CTI相比,NTS、NTM和RTS分别提高5%、13%和5%。3种小麦/玉米农田复合系统中,NTM可持续性指数最高(0.78)。因此,本研究推荐以免耕秸秆覆盖构建的小麦/玉米农田复合系统作为试区可持续性生产的重要模式。

3 讨论

3.1 增产与农田土壤 CO₂ 减排

作物通过光合作用将空气中大量CO₂吸收同化后进行固定,从而形成稳定的碳库,因此作物系统是陆地生态系统中碳库的重要组成部分^[24]。通常,

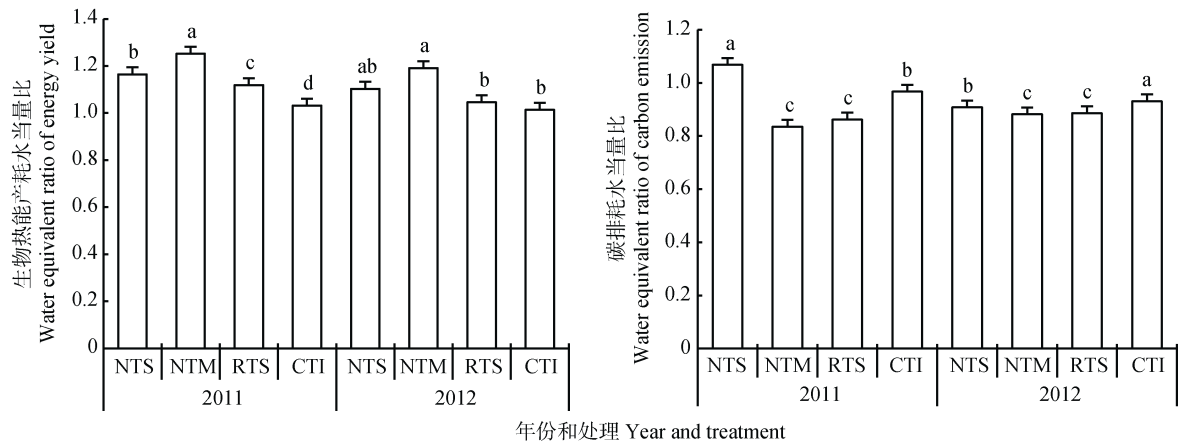


图 3 2011 年和 2012 年不同耕作方式下小麦/玉米复合生产系统和传统间作的生物热能产耗水当量比(WER_{EY})和碳排耗水当量比(WER_{CE})

Fig. 3 Water equivalent ratio of energy yield (WER_{EY}) and water equivalent ratio of carbon emission (WER_{CE}) of wheat and maize intercropping systems under different tillage practices and the conventional intercropping system in 2011 and 2012

NTS: 免耕立茬间作; NTM: 免耕秸秆覆盖间作; RTS: 少耕秸秆翻压间作; CTI: 传统间作。不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NTS: no-till with stubble standing of intercropping system; NTM: no-till with stubble mulching of intercropping system; RTS: reduced tillage with stubble incorporation of intercropping system; CTI: conventional intercropping system. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表 5 不同耕作方式下小麦/玉米复合生产系统的可持续性

Table 5 Sustainability of wheat and maize intercropping systems under different tillage practices

处理 Treatment	ji	参考指标 Functional component						可持续评价 系数 Evaluation index
		作物水分利用效率 Crop water use efficiency	土地当量比 Land equivalent ratio	生物热能产 Energy yield	单位耗水生物热能产 energy yield of per unit water use efficiency	土壤 CO ₂ 排放量 Soil CO ₂ emissions	单位耗水碳排放 carbon emission of per unit water use efficiency	
NTS	1	0.86	0.93	0.89	0.87	0.37	0.64	0.73b
NTM	2	0.89	0.93	0.95	0.94	0.42	0.74	0.78a
RTS	3	0.82	0.89	0.86	0.83	0.41	0.73	0.73b
CTI	4	0.77	0.85	0.83	0.79	0.37	0.67	0.69c
CTW	5	0.61	0.44	0.41	0.72	0.82	0.81	0.61d
CTM	6	0.76	0.44	0.73	0.82	0.34	0.52	0.53e

NTS: 免耕立茬间作; NTM: 免耕秸秆覆盖间作; RTS: 少耕秸秆翻压间作; CTI: 传统间作; CTM: 传统单作玉米; CTW: 传统单作小麦。
NTS: no-till with stubble standing of intercropping system; NTM: no-till with stubble mulching of intercropping system; RTS: reduced tillage with stubble incorporation of intercropping system; CTI: conventional intercropping system; CTM: conventional monocropping of maize; CTW: conventional monocropping of wheat.

增加作物冠层的光能截获、促进光合作用能显著提高作物的生物量碳^[25], 即在增大碳库的同时增加对光能的转化固定。间作复合系统因其不同组分作物在形态、生态型和生育期上的错位搭配形成其在时间与空间上的生态位互补^[26-27], 从而提高了对光能资源的有效利用^[28]。本试验中间作复合系统的生物热能产比单作小麦提高113%, 比单作玉米提高21%, 且在净占地面积上, 间作使小麦生物热能产提高55%, 使玉米提高54%。说明间作在截获光能并转化固定为生物热能方面具有显著优势。特别是以间耕秸秆覆盖形成的小麦/玉米复合循环系统, 其生物热能产最高, 与传统间作相比平均提高14%。

光合作用生产的部分同化物在作物根系呼吸作用下会以CO₂形式释放出来^[29], 并且较高的生物热能产通常被认为会引起较多的土壤CO₂排放^[30]。在

间作复合系统中, 不同作物群体的种间相互作用调控着彼此对资源的利用和生物量累积^[21], 因而也影响着不同组分作物的生理生态功能, 使间作可作为控制土壤CO₂排放的一种有效途径, 特别是在调控和优化土壤呼吸影响因子方面作用显著^[11]。将保护性耕作的成熟理论集成在间作系统中能使间作复合系统增强对土壤碳排放的抑制作用。本研究中, 间作复合系统土壤CO₂排放量比单作玉米减少11.8%, 其中免耕秸秆覆盖农田复合循环系统土壤CO₂排放量最少, 比传统间作减少12%, 并且该系统CO₂排放效率(CEE)最高, 比传统间作提高31%。另外, 在净占地面积下, 与单作小麦相比, NTM小麦带土壤CO₂排放量减少13%, 玉米带减少12%。因此, 免耕秸秆覆盖小麦/间作玉米农田复合循环系统是农田CO₂减排的重要参考模式。

3.2 水分高效利用

在干旱和半干旱地区,缺水严重制约着农业的生产和发展^[31],因而高效的农业模式首先要解决水分高效利用。提高作物自身的水分利用效率将是实现这一突破的关键^[32]。保护性耕作在节水方面具有显著优势,特别是对抑制水分无效蒸发、增加降水入渗作用明显^[33]。本研究将保护性耕作与间作系统集成,构建的小麦/玉米复合系统对水分进行了高效利用。在免耕秸秆覆盖复合系统中,棵间蒸发比传统间作降低11%,耗水总量降低5%,同时E/ET降低12%,说明该系统优化了作物对土壤水分的利用,使无效蒸发转化为有效蒸腾。此外,不同作物系统中免耕秸秆覆盖复合系统的单位耗水生物热能产(WUE_{EY})最高,但单位耗水碳排(WUE_{CE})最低,与传统间作相比,该系统WUE_{EY}提高19%,WUE_{CE}降低9%。比较不同间作复合系统的生物热能产耗水当量比(WER_{EY})和碳排耗水当量比(WER_{CE})具有相似结果,即免耕秸秆覆盖复合系统的WER_{EY}比传统间作提高20%,但WER_{CE}降低10%。这说明,小麦/玉米农田复合系统可有效调控系统耗水更多转化为作物自身产出,并降低在该转化过程中产生的土壤CO₂排放,从而实现高效用水。

3.3 系统效率和可持续性

耕地面积锐减、土壤CO₂排放和水资源短缺是干旱半干旱地区农业生产面临的三大问题^[17],这在人口众多的发展中国家尤为突出^[20]。因此,集高产、土壤CO₂减排和节水于一体的作物生产系统亟待研发。本研究中,免耕秸秆覆盖小麦/玉米复合系统LER和CER均大于1,比传统间作分别提高14%和28%,说明该系统比相应单作系统在生产相同单位的生物热能产时占用了更少的土地、排放了更少的CO₂。此外,较高的生物热能产耗水当量比和较低的碳排耗水当量比证明了该系统在水分利用方面的优势,使作物生产每消耗1单位水分时具有更多产出,但降低CO₂产生和排放。因而,该系统在考虑以上3因素时,免耕秸秆覆盖小麦/玉米复合系统具有更高的可持续性,其可持续评价指数为0.78,显著高于其他间作系统和单作系统。因此,本研究推荐免耕秸秆覆盖小麦玉米复合系统作为该区小麦和玉米可持续生产的重要参考体系。

4 结论

小麦/玉米间作复合系统是河西绿洲灌区典型的间作模式,也是小麦和玉米生产的重要作物系统。对该系统集成保护性耕作措施,构建小麦/玉米复合系统在提高系统生产效率和可持续性上具有显

著作用,特别是以耕秸秆覆盖复合系统为最优。与传统复合系统相比,免耕秸秆覆盖小麦/玉米农田复合系统生物热能产和土地当量比分别提高15%和14%。同时该系统土壤CO₂排放低,比单作玉米降低12%,比传统复合系统降低13%,因而CO₂排放效率比单作玉米提高39%,比传统复合系统提高31%。另外,该系统显著抑制了棵间无效蒸发,降低了作物耗水量,但提高了单位耗水生物热能产,并减少了单位耗水碳排。与传统复合系统相比,其棵间蒸发量、耗水总量和单位耗水碳排分别降低11%、5%和9%,而单位耗水生物热能产提高19%。由于该系统具有高生产效率和低碳排低耗水的特性,其可持续性指数最高,比传统复合系统提高13%。因此,免耕秸秆覆盖小麦/玉米农田复合系统不仅提高了生物热能产、CO₂排放效率和水分利用效率,还显著降低了土壤CO₂排放和作物耗水量,同时伴随着间套生产配套农机的研发,传统间套作对劳动力的大量需求被进一步缓解,农村劳动力得以进一步解放。因此,保护性耕作与小麦/玉米间作相集成是该区高效可持续农作的重要模式。

参考文献 References

- [1] WANJARI R H, SINGH M V, GHOSH P K. Sustainable yield index: An approach to evaluate the sustainability of long-term intensive cropping systems in India[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2004, 24(4): 39–56
- [2] ZHOU D, AN P, PAN Z, et al. Arable land use intensity change in China from 1985 to 2005: Evidence from integrated cropping systems and agro economic analysis[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2012, 150(2): 179–190
- [3] BROOKER R W, KARLEY A J, NEWTON A C, et al. Facilitation and sustainable agriculture: A mechanistic approach to reconciling crop production and conservation[J]. *Functional Ecology*, 2015, 30(1): 98–107
- [4] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 19–26
- [5] CHAI Q, HU F L, CHEN G P. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 19–26
- [6] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–677
- [7] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 254–257
- [8] HU F L, CHAI Q, YU A Z, et al. Less carbon emissions of wheat-maize intercropping under reduced tillage in arid areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 701–711
- [9] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 61–69

- ZHANG R Z, HUANG G B, CAI L Q, et al. Dry farmland practice involving multi-conservation tillage measures in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 61–69
- [9] ARSLAN A, MCCARTHY N, LIPPER L, et al. Adoption and intensity of adoption of conservation farming practices in Zambia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 187: 72–86
- [10] AL-KAISI M M, YIN X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 437–445
- [11] FUENTES M, HIDALGO C, ETCHEVERS J, et al. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions[J]. *Plant and Soil*, 2011, 355(1/2): 183–197
- [12] ALLETO L, COQUET Y, BENOIT P, et al. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2): 367–400
- [13] GOVAERTS B, SAYRE K D, CEBALLOS-RAMIREZ J M, et al. Conventionally tilled and permanent raised beds with different crop residue management: effects on soil C and N dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1/2): 143–155
- [14] KIRKEGAARD J A, HUNT J R, MCBEATH T M, et al. Improving water productivity in the Australian Grains industry — a nationally coordinated approach[J]. *Crop & Pasture Science*, 2014, 65(7): 583–601
- [15] HATFIELD J L, SAUER T J, PRUEGER J H. Managing soils to achieve greater water use efficiency[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(2): 271–280
- [16] ALTIERI M A, NICHOLLS C I, HENAO A, et al. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 869–890
- [17] 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*, 2015, 49(1): 120–131
- HU F L, CHAI Q, GAN Y T, 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*, 2015, 49(1): 120–131
- [18] 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 W, SHI Q Q, GUO Y, 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
- [19] 殷文, 柴强, 樊志龙, 等. 绿洲灌区典型种植模式的水热利用与碳排放和能值分析[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3658–3668
- YIN W, CHAI Q, FAN Z L, et al. Emergy analysis, water-heat utilization, and carbon emission of typical cropping patterns in the oasis irrigation area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3658–3668
- [20] HU F L, GAN Y T, CUI H Y, et al. Intercropping maize and wheat with conservation agriculture principles improves water harvesting and reduces carbon emissions in dry areas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 9–17
- [21] CHAI Q, QIN A Z, GAN Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 535–543
- [22] QIN A Z, HUANG G B, CHAI Q, et al. Grain yield and soil respiratory response to intercropping systems on arid land[J]. *Field Crop Research*, 2013, 144: 1–10
- [23] YANG C H, HUANG G B, CHAI Q, et al. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 426–432
- [24] LORENZ A J, GUSTAFSON T J, COORS J G, et al. Breeding maize for a bioeconomy: A literature survey examining harvest index and stover yield and their relationship to grain yield[J]. *Crop Science*, 2010, 50(1): 1–12
- [25] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 作物间套作群体光能截获和利用机理研究进展[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 1057–1066
- WANG Z K, WU P T, ZHAO X N, et al. A review of light interception and utilization by intercropped canopies[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 1057–1066
- [26] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间套农田水、肥与根系的时空协调性研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 53–56
- HUANG G B, ZHANG E H. Coordinating of root-water-fertilizer relation of spring wheat-spring corn intercropping system under regulated deficit irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 53–56
- [27] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 477–484
- LIU G C, YANG Q F, LI L, et al. Intercropping advantage and contribution of above-and below-ground interactions in wheat-maize intercropping[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 477–484
- [28] AWAL M A, KOSHI H, IKEDA T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139(1/2): 74–83
- [29] 李鲁华, 陈树宾, 秦莉, 等. 不同土壤水分条件下春小麦品种根系功能效率的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 867–871
- LI L H, CHEN S B, QIN L, et al. Study on root function efficiency of spring wheats under different moisture condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 867–871
- [30] LITHOURGIDIS A S, DHIMA K V, VASILAKOGLU I B, et al. Sustainable production of barley and wheat by intercropping common vetch[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2007, 27(2): 95–99
- [31] FASAKHODI A A, NOURI S H, AMINI M. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(15): 4639–4657
- [32] 张凤云, 吴普特, 赵西宁, 等. 间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1400–1406
- ZHANG F Y, WU P T, ZHAO X N, et al. Water-saving mechanisms of intercropping system in improving cropland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1400–1406
- [33] LI L L, HUANG G B, ZHANG R Z, et al. Benefits of conservation agriculture on soil and water conservation and its progress in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(6): 850–859