

不同前茬作物对小麦田土壤养分 及小麦光合性能的影响

张占琴^{1,2}, 张 力^{1,2}, 田海燕¹, 杨相昆^{1,2}

(1. 新疆农垦科学院, 新疆 石河子 832000; 2. 谷物品质与遗传改良兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘 要:在天山北坡棉花主产区, 设置棉花-棉花-春小麦(C-C-W)、春小麦+复播饲料油菜-棉花-春小麦(W-C-W)两种轮作模式, 以春小麦+复播饲料油菜连作为对照(CK), 研究轮作倒茬后麦田土壤养分含量的变化规律, 以及轮作倒茬后对小麦光合特性、产量的影响。结果表明:(1)W-C-W模式和CK土壤有机质含量分别提高1.61 g·kg⁻¹和1.89 g·kg⁻¹, 轮作模式(W-C-W和C-C-W)有效减缓碱解氮和速效磷的损失, 增加全氮、全磷含量, 降低土壤电导率, 降幅为220.33~278.67 μs·cm⁻¹; (2)W-C-W模式在蜡熟期净光合速率(P_n)、光能利用率(LUE)、水分利用效率(WUE)及潜在水分利用效率(WUE_i)较CK提高10.51%、136.49%、35.88%、33.26%, C-C-W处理在蜡熟期LUE、WUE、 WUE_i 较CK提高15.85%、3.24%、0.71%; (3)轮作模式提高了小麦灌浆中期以后的最大光化学量子产量(F_v/F_m)及实际光化学量子产量($Y(II)$)等叶绿素荧光特征参数, 提高了灌浆中期以后叶片吸收的光能进入光化学的部分(P)所占比例、电子传递速率, 有效提高了小麦的光合作用能力; (4)W-C-W模式全生育期叶面积指数(LAI)和群体光合势(LAD)最高, 冠层开度(DIFN)较低, 后期平均叶倾角(MTA)较大, 最终干物质积累量、产量均最高, 分别为22 564、8 925 kg·hm⁻²。综上所述, 小麦与棉花隔年轮作有利于培肥土壤、改善小麦冠层结构、提高光合效率、促进干物质积累和产量的形成。

关键词:前茬作物; 轮作; 小麦; 土壤养分; 光合气体交换参数; 荧光参数; 产量; 品质

中图分类号:S512.1 **文献标志码:**A

Effects of different preceding crops on soil nutrient content and photosynthetic characteristics of wheat

ZHANG Zhanqin^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, TIAN Haiyan¹, YANG Xiangkun^{1,2}

(1. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Lab of Xinjiang Production and Construction Corps for Cereal Quality Research
and Genetic Improvement, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To study the change of soil nutrient content in wheat fields and the effect of crop rotation on gas exchange parameters, fluorescence parameters, yield of wheat after crop rotation, 2 crop rotation modes of cotton-cotton-spring wheat (C-C-W) and spring wheat + resowing feed rape-cotton-spring wheat (W-C-W) with a control (CK) of the spring wheat + resowing feed rape were set in the main cotton producing areas located at the northern slope of Tianshan Mountains. The results showed that: (1) The soil organic matter content of W-C-W mode and CK increased by 1.61 g/kg and 1.89 g·kg⁻¹, respectively. The rotation mode (W-C-W and C-C-W) effectively slowed down the loss of alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus, increased the content of total nitrogen and total phosphorus, and reduced the soil conductivity by 220.33~278.67 μs·cm⁻¹. (2) The net photosynthetic rate (P_n), light energy utilization efficiency (LUE), water use efficiency (WUE) and irrigation water use efficiency (WUE_i) of W-C-W mode were increased by 10.51%, 136.49%, 35.88%, and 33.26% compared with CK during the ripening stage. The C-C-W treatment increased LUE, WUE, WUE_i by 15.85%, 3.24%, and

0.71% compared with CK. (3) Under the rotation mode, the chlorophyll fluorescence characteristic parameters such as the maximum photochemical quantum yield (F_v/F_m) and the actual photochemical quantum yield ($Y(II)$) of wheat after the middle grain filling period were increased. The proportion of light energy absorbed by leaves entering photochemistry (P) and the electron transfer rate were increased after the middle-filling period, which effectively improved the photosynthesis ability of wheat. (4) The W-C-W mode had the highest leaf area index (LAI) and leaf area duration (LAD) in the whole growth period, diffuse non-interceptance ($DIFN$), higher mean leaf angle (MTA) in the later period, and the highest final dry matter accumulation and yield were 22 564 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 8 925 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. In conclusion, the rotation of wheat and cotton every other year improved the soil fertility, canopy structure and photosynthetic efficiency of wheat and promoted dry matter accumulation and yield formation. Thus, this rotation mode is worth promoting and spreading.

Keywords: preceding crops; rotation; wheat; soil nutrient content; photosynthetic gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence parameters; yield; quality

小麦是我国重要的粮食作物,在黄淮海等主产区主要是夏玉米-冬小麦一年两熟的种植模式^[1]。新疆远离内地粮食主产区,交通运输距离长,必须保证小麦种植面积,实现粮食自给自足。新疆小麦主要在奇台、伊犁、塔城等冷凉地区种植;在光热资源较好的棉区种植小麦,主要是为了保障本区粮食供给,与棉花轮作倒茬,缓解棉花连作障碍;为了适应农业种植业结构调整,新疆各地州(团场)在耕地面积有限的情况下,出现了“果麦间作”、“多熟制”种植模式。

在黄淮海主产区,为了缓解常年夏玉米-冬小麦种植模式带来的养分偏耗、土壤结构不良等问题,主要采用大豆、水稻、玉米等作物与小麦轮作倒茬。轮作倒茬能够有效控制农田病虫害,提高农田生物多样性^[2];豆科作物茬口能够有效改善土壤氮素失衡状况,提高小麦氮素利用效率^[3];不同茬口对土壤微生物的种类和数量产生不同影响,间接影响下茬作物的生长^[4]。部分学者针对大豆^[5]、水稻^[6]、花生、甘薯^[7]、绿肥^[8]等不同前茬作物对小麦生长及产量、品质的影响进行了研究。豆茬不仅能改善小麦季土壤的供氮状况,还能改善土壤的供磷、钾状况,有助于土壤的培肥及养分循环^[5];玉米茬小麦干物质积累明显大于水稻茬小麦,不同小麦品种在不同的茬口、播期情况下,灌浆速率和籽粒千粒重也不尽相同^[6],花生茬的土壤速效氮和速效磷含量提高,甘薯茬的土壤速效氮和速效钾含量下降;大豆、花生和甘薯茬有利于小麦植株养分的积累,并能显著提高千粒重^[7]。

新疆地区滴灌条件下“果麦间作”和“多熟制”栽培模式下小麦生长光合特性、冠层分布、产量形成相关学者进行了研究报道^[9-18]。小麦的叶面积指数(LAI)在抽穗期达到最大值,在一定范围内,增加

灌水量或施氮量可提高小麦 LAI ^[11]。小麦 SPAD 值、小麦旗叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)先增后降^[10]。小麦光合速率受土壤水分含量影响较明显^[15],干旱胁迫使小麦幼苗叶片气孔导度(G_s)降低明显。在免耕春小麦不同生育时期套种草木樨,小麦旗叶叶绿素含量明显提高^[18]。杏麦间作模式下,高氮低种植密度处理的小麦旗叶具有较高的光合速率(P_n)、光系统 PS II 的实际光化学效率、开放的 PS II 反应中心所占的比例、非光化学猝灭系数^[17]。枣麦间作系统间作巷道内冬小麦各生育时期的冠层光合有效辐射时空窗大小由多种影响因子综合协调作用^[15]。人工模拟套作麦田果树遮阴研究表明,遮阴时适当降低密度有利于提高 PS II 最大光化学效率、实际光化学效率、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度^[14]。

国内目前对于长期连作棉田与小麦轮作倒茬的研究报道较少。本文探讨长期连作棉田后种植小麦、小麦+复播饲料油菜连作、小麦+复播饲料油菜-棉花-小麦3种模式下,土壤养分变化规律、小麦光合特性以及产量的变化规律,为新疆地区棉粮的协调发展提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2016—2018年在新疆石河子新疆农垦科学院2轮2号试验地(44.3108°N、85.986°E,海拔460 m)进行。该地属典型的干旱气候区,年平均气温7.5℃~8.2℃,日照2 318~2 732 h,无霜期147~191 d,年降雨量180~270 mm,年蒸发量1 000~1 500 mm,≥10℃的活动积温3 570℃~3 729℃。试验地土壤类型为钙积正常干旱土(中国土壤系统分类),质地为粘壤土,耕层(0~30 cm)土壤基本理化

性状为:有机质含量 $17.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全盐含量 $1.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷含量 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾含量 $18.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、水解性氮含量 $86.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量 $13.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $319.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 处理方法

试验设置 3 个处理(2013—2015 年均种植棉花):棉花-棉花-小麦(C-C-W),即 2016 年和 2017 年均种植棉花,每年棉花收获后秸秆均粉碎还田,2018 年种植春小麦;小麦+复播饲料油菜-棉花-小麦(W-C-W),即 2016 年种植春小麦,春小麦收获后复播饲料油菜,油菜翻压作绿肥。2017 年种植棉花,棉花收获后秸秆粉碎还田,2018 年种植春小麦;春小麦连作(CK),2016 年和 2017 年均种植春小麦,春小麦收获后复播饲料油菜,饲料油菜翻压作绿肥,2018 年种植春小麦。

2016—2018 年试验采用定位试验,即每个处理每年在固定地点种植,种植面积为 200 m^2 ,每个处理重复 3 次。

春小麦品种为新春 22 号,2016 年 4 月 4 日播种,4 月 10 日出苗,7 月 18 日收获;2017 年 4 月 13 日播种,4 月 20 日出苗,7 月 17 日收获;2018 年 3 月 26 日播种,4 月 4 日出苗,7 月 12 日收获。3 a 株行距配置、播量、田间管理基本相同,行距 15 cm ,播量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。采用滴灌的方式,在播种的同时铺设滴灌带,滴灌带铺设在土壤 $1 \sim 2 \text{ cm}$ 深处,滴灌带间距 60 cm ,每根滴灌带为 4 行小麦提供灌溉。全生育期灌水 600 mm ,随水滴施尿素 $403 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、滴灌肥(N:P₂O₅:K₂O=6%:30%:30%) $221 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

油菜品种为华油杂 62 号,播量 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,播种时将油菜种子与重过磷酸钙按照 1:10 比例混合均匀,采用小麦 24 行条播机沿着原小麦茬口错行免耕播种,行距为 $15 \text{ cm}+35 \text{ cm}$ 宽窄行。2016 年 7 月 21 日播种,7 月 26 日出苗。全生育期随水滴肥 5 次,尿素用量 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌水 450 mm 。10 月 20 日测产,产量 $57\,669 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随后机械粉碎后翻压作绿肥。2017 年 7 月 17 日播种,7 月 24 日出苗,全生育期随水滴肥 5 次,随水追施 $322.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素、滴灌肥(N:P₂O₅:K₂O=6%:30%:30%) $268 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌水 450 mm 。9 月 28 日测产,产量 $66\,827 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,随后机械粉碎后翻压作绿肥。

2016 年和 2017 年棉花品种为新陆早 45 号,种植模式及田间管理措施参考杨相昆^[19]的方法。

1.3 测定项目与方法

所有性状指标和样品测定均在 2018 年进行。

光合性能测定:分别在小麦孕穗、抽穗、开花、灌浆、蜡熟期,用 Li-6400 便携式光合测定系统(Li-Cor, USA)测定小麦旗叶的气体交换参数,采用标准叶室($2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$),每处理重复测定 10 次。用 Li-6400 便携式光合测定系统(Li-Cor, USA)测定的参数:净光合速率(P_n)、气孔导度(Cond)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、气孔限制值(L_s)、光能利用率(LUE)、水分利用效率(WUE)、潜在水分利用效率(WUE_i)。于 8:00—12:00 利用 PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪(WALZ, Germany),采用 2030-B 叶夹测定小麦旗叶的光系统 II(PSII)叶绿素荧光参数。每处理重复测定 3 次。PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪测定参数:PS II 的最大光化学量子产量、基于湖泊模型的光化学淬灭系数、PS II 处调节性能量耗散的量子产量、PS II 的实际光化学量子产量、非光化学淬灭参数、PS II 处非调节性能量耗散的量子产量。气体交换参数、荧光参数和测定、快速光响应曲线测定及拟合方法参考杨相昆^[19]的方法。

土壤样品测定:在播种后及收获前土壤取样,按照梅花形取样法每个处理取 5 个点,取样深度 $0 \sim 30 \text{ cm}$,将 5 个点土样混匀,阴干后委托新疆农业科学院质量标准与检测技术研究所进行测定。土壤养分测定方法:有机质采用重铬酸钾外加热法,全氮采用凯氏定氮法,全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法、水解性氮采用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾乙酸铵浸提-火焰光度法,可溶性总盐采用烘干残渣法。

干物质及叶面积指数测定:从出苗后 28 d 开始,每周取一次样,3 次重复,取样面积 0.075 m^2 ($0.15 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$),全生育期取样 9 次。每次取样时将耕层内($0 \sim 30 \text{ cm}$)根系一并取回。在取样时选择长势一致的标记作为下次取样株。植株样品取回后在烘箱中 105°C 杀青 30 min,之后 80°C 烘干 $8 \sim 10 \text{ h}$ 至恒重并称量,由此计算干物质积累量。

取植株样的同时,利用 LAI-2200C 植物冠层分析仪(LI-COR, USA),参照 Malone 等^[20]的方法,测定小麦的叶面积指数(LAI),并由此计算叶面积持续时间(光合势, LAD)和净同化率(NAR),方法参考文献[21]。

产量:每个处理每小区实收 12 m^2 ($10 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$) 面积内小麦(共 3 次重复),脱粒晒干计产,测产同时取样考种。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) 进行数据整理, 计算平均值和标准差。采用 SigmaPlot 12.5 (Systat Software, Inc) 作图, 利用 Adobe Illustrator CS5 (Adobe Systems Incorporated) 对图片进行后期处理。

2 结果与分析

2.1 不同前茬作物对小麦田土壤养分的影响

由表 1 可知, 收获前与播种后相比, 轮作模式下 (C-C-W 和 W-C-W), 土壤 pH 值上升 0.21~0.22, 电导率降幅较大, 为 220.33~278.67 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。C-C-W 模式有机质含量降低 0.14 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 W-C-W 和 CK 模式有机质含量上升 1.61 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1.89 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。3 个处理碱解氮含量在生育期末均有降低, 但连作处理 (CK) 降幅更大, 接近轮作处理的两倍。速效磷含量变化趋势同碱解氮。在连作模式下, 速效钾含量在生育期末增加 41.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而轮作模式则减少 20.60、89.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。3 个处理全氮含量均在生育期末有所增加, 但轮作模式增加的更多。连作模式下全磷含量减少最多, 其次为 C-C-W 处理, 而 W-C-W 处理全磷含量增加。C-C-W 处理在生育期末全钾含量减少的最多。

2.2 不同前茬作物对小麦植株光合作用的影响

通过图 1 可以看出, 在孕穗、扬花及灌浆中期, C-C-W 模式下净光合速率 (P_n) 较 CK 分别高 6.82%、17.04%、20.21%; 而 W-C-W 模式在孕穗、扬花、灌浆中期、蜡熟期净光合速率 (P_n) 较 CK 分别高 9.15%、47.61%、7.93%、10.51%, 而在抽穗期则是 CK 的 P_n 最高。

在蜡熟期轮作模式气孔导度 (Cond)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 及蒸腾速率 (T_r) 均低于 CK, W-C-W 降低幅度更大 (10.58%、5.76%、11.92%), W-W-C 为 (6.49%、-0.22%、8.85%)。而光能利用率 (LUE)、水分利用效率 (WUE) 及潜在水分利用效率 (WUE_i) 均是 W-C-W 处理最高, 较 CK 提高 136.49%、35.88%、33.26%, C-C-W 处理较 CK 提高 15.85%、3.24%、0.71%。其余生育时期 3 个处理互有高低, 无明显规律。

方差分析结果表明 (表 2): 开花后天数和不同轮作模式及其互作对 P_n 、Cond、 C_i 、 T_r 、 WUE 影响极显著; 开花后不同时间 WUE_i 、 L_s 、 LUE 差异极显著, 不同轮作模式 WUE_i 、 L_s 、 LUE 差异不显著。

2.3 不同前茬作物对小麦叶绿素荧光特性的影响

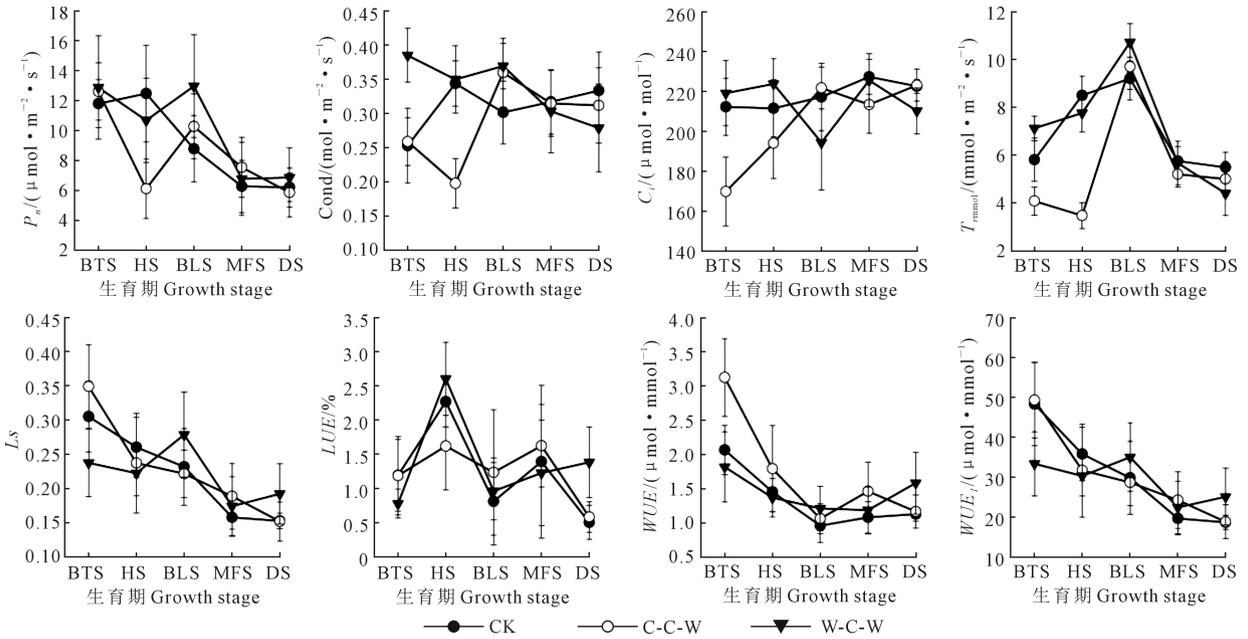
通过图 2 可以看出, C-C-W、W-C-W 模式在小麦灌浆中期最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 较 CK 分别提高 3.81% 和 2.59%, 蜡熟期提高 8.99%、8.61%; 实际光化学量子产量 ($Y(II)$) 在灌浆中期两者均提高 7.8%, 蜡熟期分别提高 30.08%、15.68%; 在蜡熟期 C-C-W、W-C-W 模式 PS II 反应中心的光化学活性 (qL) 较 CK 提高 21.19% 及 8.87%。同时轮作倒茬提高了扬花期以后小麦的热耗散 (NPQ) 及光保护能力 ($Y(NPQ)$), 降低了光损伤的程度 ($Y(NO)$), 其中 W-C-W 各项指标提高的幅度更大一些, 特别是在蜡熟期热耗散及光保护能力较 CK 大幅提升。

综上所述, 采用轮作倒茬模式, 能够明显提高小麦生育后期叶绿素荧光特性参数, 提高光合作用能力, 为干物质积累和产量形成奠定基础。

表 1 不同前茬作物处理下土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient content of different preceding crops treatment

时期 Period	处理 Treatment	pH	电导率 Electric conductivity $/(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1})$	有机质 Organic matter $/(g \cdot \text{kg}^{-1})$	碱解氮 Alkaline- hydrolysis nitrogen $/(mg \cdot \text{kg}^{-1})$	速效磷 Available phosphorus $/(mg \cdot \text{kg}^{-1})$	速效钾 Available potassium $/(mg \cdot \text{kg}^{-1})$	全氮 Total nitrogen $/(g \cdot \text{kg}^{-1})$	全磷 Total phosphorus $/(g \cdot \text{kg}^{-1})$	全钾 Total potassium $/(g \cdot \text{kg}^{-1})$
播种后 After planting	CK	8.24	357.33	24.29	83.00	24.19	283.25	0.73	1.26	2.49
	C-C-W	8.06	472.83	23.06	78.85	16.12	274.67	0.62	1.15	2.59
	W-C-W	8.07	445.33	22.61	83.00	24.87	391.40	0.71	1.19	2.43
收获前 Before harvest	CK	8.06	316.00	25.89	59.03	17.81	324.45	0.75	1.23	2.31
	C-C-W	8.27	252.50	22.92	67.69	14.58	254.07	0.94	1.14	2.24
	W-C-W	8.29	166.67	24.50	68.47	21.11	302.13	0.88	1.29	2.42
收获前较播种 后变化 Changes before harvest than after planting	CK	-0.18	-41.33	1.61	-23.97	-6.38	41.20	0.02	-0.03	-0.19
	C-C-W	0.21	-220.33	-0.14	-11.16	-1.54	-20.60	0.31	-0.01	-0.35
	W-C-W	0.22	-278.67	1.89	-14.53	-3.75	-89.27	0.17	0.10	-0.00



注: P_n —净光合速率, Cond—气孔导度, C_i —胞间 CO_2 浓度, T_r —蒸腾速率, L_s —气孔限制值, LUE —光能利用率, WUE —水分利用效率, WUE_i —潜在水分利用效率。BTS—孕穗期, HS—抽穗期, BLS—扬花期, MFS—灌浆中期, DS—蜡熟期。下同。

Note: P_n —photosynthetic rate, Cond—conductance to H_2O , C_i —intercellular CO_2 concentration, T_r —transpiration rate, WUE —water use efficiency, WUE_i —intrinsic WUE , L_s —limiting value of stomata, LUE —light use efficiency. BTS—booting stage, HS—heading stage, BLS—blooming stage, MFS—middle filling stage, DS—wax maturity stage. The same below.

图 1 不同前茬作物处理下小麦光合气体交换参数

Fig.1 Photosynthetic gas exchange parameters of wheat of different tillage modes under different preceding crops treatment

表 2 不同前茬作物处理下小麦光合气体交换参数二因素方差分析 F 值

Table 2 F value of two-factor variance analysis of photosynthetic gas exchange parameters under different preceding crops treatment

因素 Factor	P_n	Cond	C_i	T_r	WUE	WUE_i	L_s	LUE
修正模型 Modified model	16.08 **	11.60 **	11.557 **	84.84 **	22.49 **	18.25 **	16.33 **	2.84 **
截距 Intercept	2546.28 **	6506.41 **	35017.98 **	11506.32 **	2571.91 **	2451.11 **	3576.87 **	219.28 **
开花后时间 Time after flowering (A)	40.43 **	4.73 **	11.38 **	207.09 **	59.19 **	46.90 **	43.30 **	7.27 **
处理 Treatment (B)	5.87 **	12.79 **	13.18 **	71.18 **	15.13 **	0.470	0.547	0.321
A×B	6.33 **	13.78 **	12.45 **	29.05 **	7.97 **	5.16 **	5.71 **	1.297

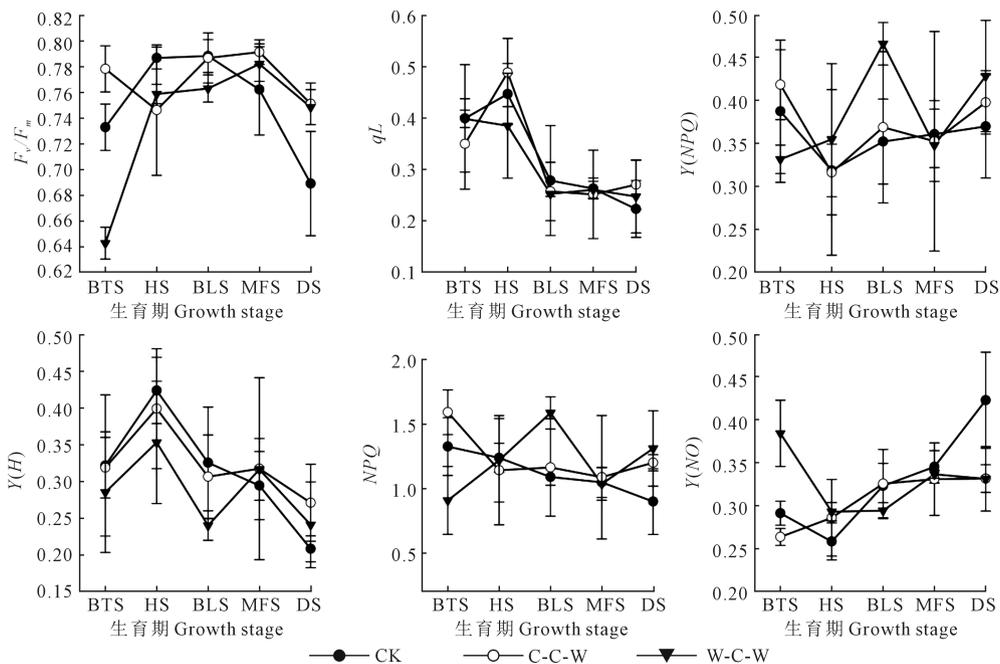
注 Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$. 下同。The same below.

方差分析结果表明(表 3),开花后不同时间 4 种叶绿素荧光参数差异极显著,不同轮作模式之间各参数无显著差异。

2.4 不同前茬作物对小麦叶片能量转换的影响

由图 3 可以看出,3 个处理在孕穗期、抽穗期、扬花期叶片吸收的光能进入光化学的部分(P)均高于灌浆期和蜡熟期,说明这 3 个时期 PS II 反应中心活性较高,后期则有所降低。相比较 3 个处理,在孕穗期、抽穗期、扬花期 W-C-W 处理叶片吸收的光能进入光化学的部分(P)所占比例最低,分别为

29%、0.35%、24%,CK 叶片吸收的光能进入光化学的部分所占比例最高,分别为 0.32%、0.42% 和 0.33%,C-C-W 居中。在灌浆中期和蜡熟期 CK 叶片吸收的光能进入光化学的部分(P)所占比例最低,分别为 29%、21%。叶片吸收的光能通过热耗散散失的部分(D)的变化趋势与进入光化学的部分(P)相反。在生育后期,3 个处理吸收的光能既不能进入光化学、又不能通过热耗散的部分(E)所占的比例基本相同。由此可见轮作倒茬提高了灌浆中期和蜡熟期光能进入光化学的部分(P)所占比例。



注: F_v/F_m —PS II 的最大光化学量子产量; qL —基于湖泊模型的光化学淬灭系数; $Y(NPQ)$ —PS II 处调节性能量耗散的量子产量; $Y(II)$ —PS II 的实际光化学量子产量; NPQ —非光化学淬灭参数; $Y(NO)$ —PS II 处非调节性能量耗散的量子产量。下同。

Note: F_v/F_m —maximum photochemical quantum yield of PS II ; qL —coefficient of photochemical fluorescence quenching assuming; $Y(NPQ)$ —quantum yield of light (ΔpH and zeaxanthin-dependent) induced non-photochemical fluorescence quenching; $Y(II)$ —actual photochemical quantum yield of PS II ; NPQ —stem-volmer type non-photochemical fluorescence quenching; $Y(NO)$ —Quantum yield of non-light induced non-photochemical fluorescence quenching. The same below.

图 2 不同前茬作物处理下小麦叶绿素荧光参数

Fig.2 Chlorophyll fluorescence parameters of wheat under different preceding crops treatment

表 3 不同前茬作物处理下小麦叶绿素荧光参数二因素方差分析 F 值

Table 3 F value of two-factor variance analysis of the chlorophyll fluorescence parameters under different preceding crops treatment

因素 Factor	F_v/F_m	$Y(II)$	qL	NPQ	$Y(NPQ)$	$Y(NO)$
修正模型 Modified model	2.57 *	2.16 *	3.54 *	1.779	1.16	3.81 **
截距 Intercept	12950.67 **	917.02 **	728.10 **	873.18 **	1334.19 **	3008.95 **
开花后时间 Time after flowering (A)	3.69 *	5.94 **	11.22 **	1.11	1.68	5.77 *
处理 Treatments (B)	2.00	1.14	0.16	0.77	0.63	1.39
A×B	2.17	0.50	0.49	2.32	0.99	3.42

2.5 不同前茬作物处理下小麦快速光响应曲线特征

如图 4 所示,在抽穗期(HS)、扬花期(BLS) CK 处理电子传递速率(ETR)高于其他 2 个处理,而在孕穗期(BTS)、灌浆期(MFS)和蜡熟期(DS),轮作模式下电子传递速率(ETR)高于 CK。说明通过轮作倒茬可提高小麦后期的电子传递速率,与前文所述可提高叶绿素荧光的特征参数一致。

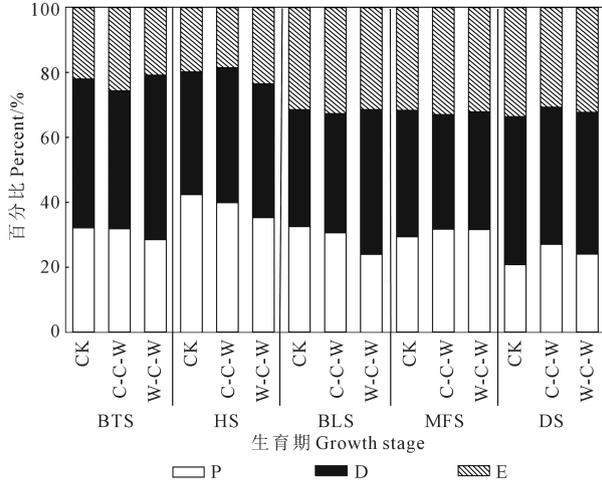
通过对光反应曲线进行拟合(表 4)可知,CK 在 BLS 期最大电子传递速率(ETR_{max})高于轮作处理,其余时期均低于轮作处理,在 BTS 和 MFS 期 W-C-W 较 C-C-W 处理高 15.07、33.48 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其余时期后者较高。在 MFS 期 CK 最大光合效率

(α)为 0.29,高于其他 2 个处理,在 BLS 期为 0.24,与 C-C-W 相同,其余时期均低于轮作处理。在 BLS 连作处理对强光的耐受能力最强,其余时期则是轮作处理对强光的耐受能力较强。

2.6 不同前茬作物对小麦干物质积累及叶面积指数的影响

出苗后不同时期干物质积累如图 5 所示,干物质积累规律可用 Logistic 方程 $Y=K/(1+\exp(a+bt))$ 来拟合, a 、 b 、 K 待定系数见表 5,干物质积累速率达到最大值的时间(T_{max})、此时积累速率最大值(R_{max})、干物质重(W_m)、直线积累的开始时间(t_1)和结束时间(t_2)、以及 t_1 和 t_2 期间干物质积累量 $\Delta W(t_2-t_1)$ 的计算参考明道绪^[22]的方法。由图 5 和

表 5 可知, CK 和 C-C-W 干物质积累量接近, W-C-W 处理干物质积累量最多为 $22\ 564.67\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但其干物质最大积累速率最小 ($454.33\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 最大积累速率出现的时间最晚 (出苗后 53 d)。在干物质积累速率达到最大时的干物质积累量最多,



注: D、P、E 分别表示吸收光能中通过天线色素以热能散失的部分、进入光化学过程部分和剩余部分。

Note: D—the part of absorption light energy which lost through PS II antenna pigment; P—actual photochemical quantum yield of PS II; E—the part of absorption light energy which cannot enter the photochemical process and cannot be lost through the antenna pigment.

图 3 不同前茬作物处理下小麦叶片能量转换

Fig.3 Leaf energy conversion of wheat under different preceding crops treatment

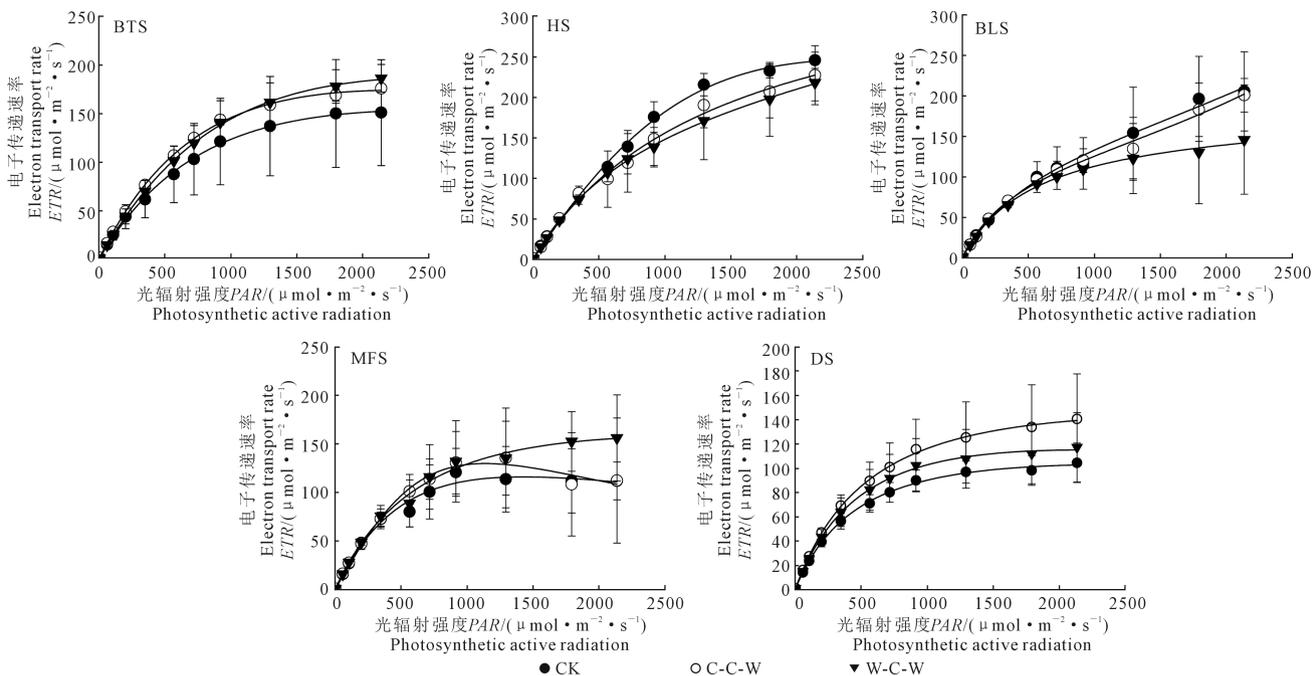


图 4 不同前茬作物处理下小麦叶片光反应曲线

Fig.4 Leaf photoreaction curve of wheat under different preceding crops treatment

直线积累开始的时间最早 (苗后 34 d), 直线积累时间最长 (37 d), 直线积累期积累的干物质也最多。而 CK 和 C-C-W 最大积累速率出现的时间均为出苗后 51 d, 在干物质积累速率达到最大时的干物质积累量接近, 分别为 $11\ 794.69\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 472.35\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 直线积累开始的时间分别为 38 d 和 35 d, C-C-W 的最大积累速率最高为 $568.90\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, CK 为 $454.33\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

由图 5 可知, 整个生育期所有处理均在出苗后 42 d LAI 达到最大值, CK、C-C-W、W-C-W LAI_{\max} 最大分别为 5.07、4.56、和 5.46, 之后开始下降, 轮作处理下降幅度较缓, 特别是 W-C-W 维持较高的 LAI 时间比较长, 为后期产量和干物质积累奠定基础。整体来看, W-C-W 处理叶面积指数 (LAI) 及光合势 (LAD) 较 CK 和 C-C-W 高, CK 和 C-C-W 比较, 前期 CK 的光合势 (LAD) 高于 C-C-W, 后期则相反。净同化率 (NAR) 呈波浪起伏变化, 处理间无明显规律。

平均叶倾角 (Mean tilt angle, MTA) 反映了叶片倾斜状况。如果所有叶片都是水平的, 那么 MTA 就是 0° ; 若都是垂直的, 则为 90° 。一般 MTA 处于 30° (水平叶片占优势) $\sim 60^\circ$ (垂直叶片占优势)。由图 6 可以看出, 在出苗后 70 d 之前, W-C-W 处理 MTA 最低, 但之后直线上升, 即叶片上扬, 超过了其余两个处理, 这对维持较高的 LAD 、积累更多的干物质是有利的。

表 4 不同前茬作物处理下小麦最大电子传递速率(ETR_{max})、最大光合效率(α)、半饱和光强(I_k)

Table 4 ETR_{max} , maximum photosynthetic efficiency (α) and semi-light saturation point (I_k) of wheat under different preceding crops treatment

指标 Index	处理 Treatment	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	扬花期 Blooming stage	灌浆中期 Middle filling stage	蜡熟期 Wax maturity stage
最大电子传递速率 $ETR_{max}/(\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	C-C-W	174.53±3.54	338.4±57.53	317±85.95	134.17±42.74	142.97±38.31
	CK	167.77±41.62	248.23±4.32	351.65±135.55	126.9±29	105.27±17.6
	W-C-W	189.6±7.64	251.8±2.35	235.27±189.43	167.65±40.09	115.2±27.01
α 光响应曲线的初始斜率, 相当于最大光合效率 Electrons/photons maximum photosynthetic efficiency	C-C-W	0.28±0.01	0.26±0.06	0.24±0.02	0.24±0.08	0.31±0.02
	CK	0.23±0.05	0.24±0.01	0.24±0.05	0.29±0.06	0.27±0.04
	W-C-W	0.24±0.04	0.25±0.01	0.27±0.08	0.27±0.03	0.29±0.03
I_k 最小饱和光强(半饱和光强) Minimum saturating irradiance $/(\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	C-C-W	616.93±16.2	1408.53±546.94	1351.67±423.25	595.07±227.05	463.67±125.47
	CK	749.7±219.64	1025±46.26	1494±374.2	453.83±149.49	396.83±21.31
	W-C-W	786.4±92.63	1002.67±28.19	1054.07±1096.33	621±77.78	395.13±53.59

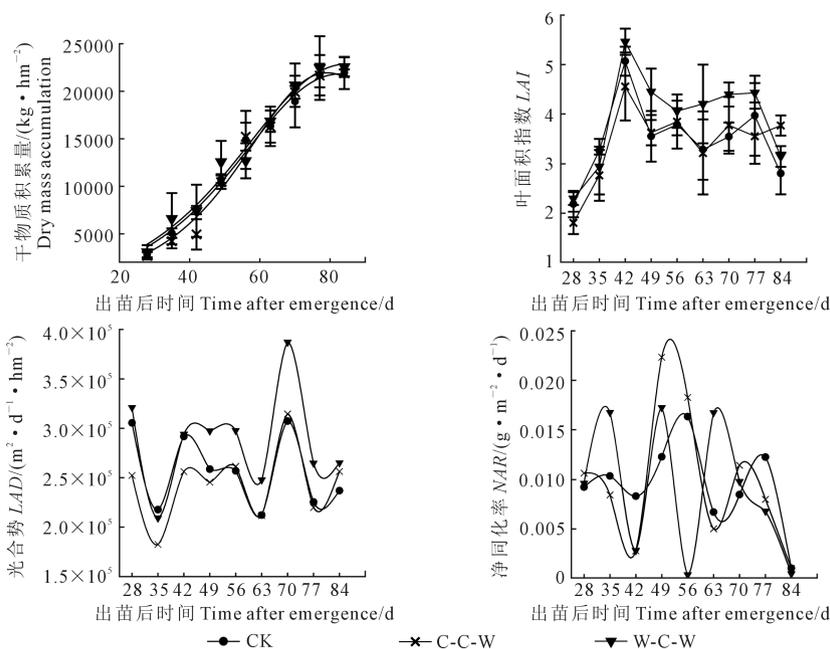


图 5 不同前茬作物处理下小麦群体生理参数

Fig. 5 Physiological parameters of wheat under different preceding crops treatment

表 5 不同前茬作物处理下小麦干物质积累拟合参数

Table 5 Dry matter fitting parameters of wheat under different preceding crops treatment

处理 Treatment	K	a	b	相关系数 R^2 Correlation index	干物质积累 速率达到最 大值的时间 Time of maximum rate of dry matter accumulation T_{max}/d	积累速率最大值 Maximum accumulation rate R_{max} $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	积累速率最大时 干物质质量 Dry mass at R_{max} W_m $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	直线积累 开始时间 The starting time of linear accumulation t_1/d	直线积累 结束时间 End time of linear accumulation t_2/d	t_1-t_2 期间干 物质积累量 Dry matter accumulation during t_1-t_2 $W_{t_2}-W_{t_1}$ $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
CK	23589.38	4.166099	-0.08133	0.995**	51	479.65	11794.69	35.03	67.41	6805.54
C-C-W	22944.7	5.100346	-0.09918	0.9874**	51	568.90	11472.35	38.15	64.70	6619.55
W-C-W	25895.59	3.731664	-0.07018	0.9804**	53	454.33	12947.79	34.40	71.94	7470.88

冠层开度($DIFN$)又称无截取散射,表示未被叶片遮挡的天空部分。此值范围在0(全叶片)~1(无叶片)。 $DIFN$ 大体可看作是冠层结构的一个代表值,它将 LAI 和 MTA 结合为一个值。由图 6 可以看

出,整个生育期内不同处理 $DIFN$ 基本呈“L”型变化, W-C-W 处理整个生育期 $DIFN$ 较低,这使漏射到地表的太阳辐射较少,光能利用率高。

方差分析表明(表 6):开花后天数对 LAI 影响

极显著,对 *DIFN* 影响显著,不同轮作模式对小麦干物质积累量、*LAI*、*DIFN*、*MAT* 影响极显著,二者互作对上述指标影响不显著。

2.7 不同前茬作物对小麦产量的影响

通过表 7 可以看出,W-C-W 处理产量最高,较 CK 增产 10.39%。两年棉花连作后种植小麦,小麦产量较低,其原因有待于进一步研究。

3 讨论

合理的轮作倒茬是实现农业可持续发展的重

要措施,可缓解作物连作障碍,增加农田生物多样性,协调作物与土壤的关系,提高作物产量^[23]。本研究以小麦+复播饲料油菜-棉花-小麦种植模式为研究对象,对比该种植模式与棉花连作后种植小麦、小麦+饲料油菜连作的差异,结果表明该模式下小麦产量及干物质积累更具有优势,可缓解小麦、棉花长期连作产生的弊端,促进国家粮食安全战略实施。在小麦收获后复种一季饲料油菜,增加经济收益,提高种植户的积极性,有利于实现新疆地区棉-粮的协调发展。

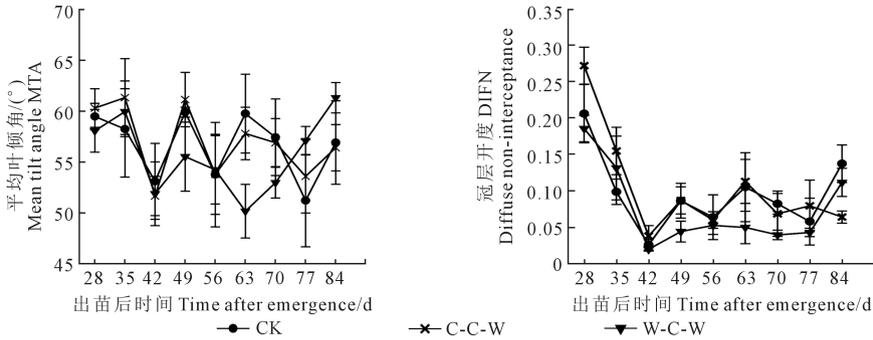


图 6 不同前茬作物处理下小麦冠层参数

Fig.6 Canopy parameters of wheat under different preceding crops treatment

表 6 不同前茬作物处理下小麦干物质积累和冠层参数二因素方差分析 *F* 值

Table 6 *F* value of two-factor variance analysis of dry matter weight and canopy parameters of wheat under different preceding crops treatment

因素 Factor	干物质积累量 Dry matter weight	叶面积 指数 <i>LAI</i>	冠层 开度 <i>DIFN</i>	平均叶 倾角 <i>MTA</i>
修正模型 Modified model	17.87**	10.13**	11.91**	2.46*
截距 Intercept	1731.62**	4966.48**	778.70**	18300.75**
开花后天数 Days after flowering(A)	0.74	9.31**	6.79*	0.87
处理 Treatments(B)	56.86**	27.53**	32.78**	4.76**
A×B	0.34	1.54	2.11	1.51

表 7 不同前茬作物处理下小麦产量性状

Table 7 Wheat yield traits of different preceding crops treatment

处理 Treatment	收获穗数/(10^4 穗· hm^{-2}) Number of harvested panicles /(10^4 panicle· hm^{-2})	千粒重 Thousand seed weight/g	产量 Yield /(kg · hm^{-2})
CK	459.11±8.67a	42.76±1.00a	8085±23.71a
C-C-W	539.42±10.69b	36.29±1.05b	7605±114.53b
W-C-W	448.51±9.68a	42.47±0.80a	8925±84.29c

适宜的轮作茬口能增强土壤生态系统功能潜力。陈小容等^[5]研究了不同种植模式下茬口对小麦季土壤肥力的影响,豆茬在土壤养分、酶活性方

面优于苕茬。张立成等^[24]研究表明种植油菜作物可维持土壤中微生物量碳含量稳定,增强了土壤微生物的代谢能力,提高微生物对有机碳源的利用。李银平等^[25]研究表明小麦复种油菜翻压绿肥后,由于绿肥的分解矿化,对连作棉田土壤的速效氮产生影响。杨文元等^[26]研究表明麦后复种油菜可降低土壤 pH 值,提高土壤有机质、速效磷质量分数,降低土壤有机碳氧化稳定系数,提高土壤肥力。本研究表明,W-C-W 和 CK 模式有机质含量均上升,可见小麦收获后复播饲料油菜,翻压做绿肥,可以提高土壤有机质含量,而且这种效果可以持续到第三年,与前人的研究结果基本一致。油菜翻压做绿肥可有效改善土壤结构、提高土壤酶活性,从而有利于作物生长发育。

光合作用是植物生长发育的基础,小麦产量的 90%以上来自于光合作用^[27]。王曙光等^[28]研究表明 P_n 、 G_s 和 T_r 是影响作物产量的主要因素;王飞等^[29]研究表明玉米、花生间作茬口较玉米茬口提高了冬小麦旗叶光反应中心活性,从而提高净光合速率;樊高琼等^[30]研究表明,前茬为玉米和大豆时套作小麦光合效率和产量都较高。本研究结果基本与上述一致,W-C-W 处理提高了蜡熟期小麦 P_n 、 LUE 、 WUE 、 WUE_i (图 2);轮作模式下提高了小麦灌浆中期以后的 F_v/F_m 、 $Y(II)$,提高了蜡熟期的 PS II

反应中心 qL 和扬花期以后 NPQ 及 $Y(NPQ)$, 降低了 $Y(NO)$ (图3), 由此可见轮作倒茬可显著提高小麦后期的光合作用能力, $W-C-W$ 同时保持较高的 LAI 和 LAD 和较低冠层开度 ($DIFN$), 为干物质积累及产量的形成奠定基础。但本研究中 G_s 和 T_r 不同处理之间并没有表现出明显的变化规律, 具有原因有待于进一步研究。

张翼等^[6]和史校艳等^[31]研究表明不同茬口对小麦产量、成熟期干物质有极显著影响; 玉米茬小麦干物质积累明显大于水稻茬小麦。本研究结果表明, 小麦与棉花隔年轮作处理 ($W-C-W$) 直线积累开始的时间最早 (苗后 34 d), 直线积累时间最久 (37 d), 干物质积累最多。

邵云等^[7]研究表明大豆、花生和甘薯茬有利于小麦植株养分的积累, 并能显著提高千粒重; 郑海泽等^[32]研究表明茬口和灌水量对小麦产量的影响存在 5% 和 1% 的显著性, 玉米茬口同其他茬口相比其产量和产量构成因素的变异系数均最低, 且该茬口较好地协调了个体和群体生长动态。王飞等^[23]研究表明玉米花生间作茬口较玉米茬口能显著提高小麦花后光合能力, 促进冬小麦生长, 从而增加穗粒数、粒重和籽粒产量。靖华等^[34]研究表明各施氮水平下不同基因型小麦的产量及产量结构在茬口间的表现存在差异。本研究表明小麦与棉花隔年轮作处理 ($W-C-W$) 产量最高, 较 CK 增产 10.39%。可见不同前茬作物对小麦的生长发育及产量影响显著, 生产中可根据当地具体情况适时轮作倒茬, 提高作物产量, 维持土壤生态平衡。

干物质的积累和产量的形成, 是作物光合作用的产物, 其变化规律与光合能力的强弱有关。王飞等^[23]研究表明小麦后期较高的气体交换参数, 尤其是乳熟期, 保证了生育后期光合产物向籽粒的运输, 从而提高冬小麦产量。本研究中轮作倒茬模式能显著提高灌浆中期之后的净光合速率及叶绿素荧光参数 (F_v/F_m 、 qL 、 ETR 、对强光的耐受能力等), $W-C-W$ 获得较高的干物质积累量和产量, 但本研究中 $C-C-W$ 干物质积累量与产量均偏低, 可能因其多年棉花连作, 导致土壤肥力下降, 土壤生态系统不平衡, 第一年轮作倒茬能够提高部分气体交换和叶绿素荧光参数, 并没有协同形成较高的产量, 具体原因有待于进一步研究。

4 结 论

本研究采用 $W-C-W$ 种植模式充分发挥了饲

料油菜对土壤的培肥作用, 缓解了棉花、小麦连作产生的问题, 提高土壤有机质含量, 减缓碱解氮和速效磷的损失, 提高小麦灌浆中期和蜡熟期光合作用能力, 维持较高的 LAI 和 LAD , 改善了冠层结构、促进干物质积累, 达到增产的目的。

$C-C-W$ 种植模式, 通过轮作倒茬提高了小麦光合作用的部分指标, 但由于棉花长期连作导致土壤微生物多样性下降、结构不合理等问题未充分缓解, 尚未促进营养物质向籽粒有效转移。若该模式在小麦收获后复播饲料油菜培肥土壤, 可改善后茬作物的生长条件, 从而提高产量, 结论有待于进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 李昊焯. 华北平原南部两熟区不同种植模式周年养分利用效率及土壤肥力质量评价[D]. 新乡: 河南师范大学, 2018.
LI H Y. Evaluation of nutrient utilization efficiency and soil fertility quality in different planting patterns of double cropping region in southern part of north China plain[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2018.
- [2] 宋树慧, 何梦麟, 任少勇, 等. 不同前茬对马铃薯产量、品质和病害发生的影响[J]. 作物杂志, 2014, (2): 123-126.
SONG S H, HE M L, REN S Y, et al. Effects of different preceding crops on yield, quality and disease of potato[J]. Crops, 2014, (2): 123-126.
- [3] ZHU B, YI L X, HU Y G, et al. Nitrogen release from incorporated ¹⁵N-labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system [J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 331-344.
- [4] 王明道, 刘红记, 时延光, 等. 不同作物茬口微生物数量的变化对烟草品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4419-4422.
WANG M D, LIU H J, SHI Y G, et al. Effects of microorganism numbers from different crop stubbles on tobacco quality[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(18): 4419-4422.
- [5] 陈小容, 雍太文, 杨文钰, 等. 不同种植模式下茬口对小麦季土壤养分和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6): 20-24.
CHEN X R, YONG T W, YANG W Y, et al. Effects of stubble on wheat soil nutrient status soil enzyme under different planting systems [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011, (6): 20-24.
- [6] 张翼, 李庆伟, 张根峰. 茬口、播期对不同筋力型小麦干物质积累与灌浆的影响[J]. 浙江农业科学, 2014, (9): 1343-1346.
ZHANG Y, LI Q W, ZHANG G F. Effects of stubble and sowing date on dry matter accumulation in wheat with different gluten types influence of grouting[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2014, (9): 1343-1346.
- [7] 邵云, 李昊焯, 翁正鹏, 等. 不同茬口对小麦养分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 356-363.
SHAO Y, LI H Y, WENG Z P, et al. Effects of different previous crops on nutrient utilization and yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(3): 356-363.
- [8] 马爱平, 崔欢虎, 亢秀丽, 等. 不同海拔夏闲期压青茬口对麦田水分

- 及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):249-255.
- MA A P, CUI H H, KANG X L, et al. Effects of green manuring rotations in summer fallow period on soil water and water use efficiency in wheat field in different altitude-regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 249-255.
- [9] 王荣栋,王新武,符林,等.关于滴灌小麦栽培的几个问题[J].新疆农业科学,2010,47(7):1412-1415.
- WANG R D, WANG X W, FU L, et al. Several problems about wheat cultivation by drip irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(7): 1412-1415.
- [10] 杨鲤糠,蒋桂英,祁静玉.减量施氮对滴灌春小麦光合特性和荧光参数的影响[J].新疆农业科学,2020,57(12):2164-2175.
- YANG L K, JIANG G Y, QI J Y. Effects of reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics and fluorescence parameters of spring wheat under drip irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, 57(12): 2164-2175.
- [11] 欧阳雪莹,蒋桂英,冉辉,等.水氮运筹对新疆滴灌春小麦群体质量和产量的影响[J].麦类作物学报,2020,40(5):585-593.
- OUYANG X Y, JIANG G Y, RAN H, et al. Effect of water and nitrogen application on population quality and yield of spring wheat under drip irrigation in Xinjiang[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(5): 585-593.
- [12] 黄振江.新疆滴灌小麦需水规律与灌溉制度研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2018.
- HUANG Z J. Water requirement and irrigation schedule of drip irrigation wheat in South Xinjiang[D]. Alar: Tarim University, 2018.
- [13] 赛力汗·赛.滴灌量调配对北疆冬小麦耗水特性及产量形成的影响研究[D].北京:中国农业大学,2018.
- SAILIHAN S. The water consumption and yield formation characteristics of winter wheat under different drip irrigation regulations in northern Xinjiang[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [14] 张宏芝,艾孜孜·居来提,崔月,等.遮阴对南疆冬小麦光合特性和产量的影响[J].新疆农业科学,2019,56(10):1765-1771.
- ZHANG H Z, AIZIZI JULAITI, CUI Y, et al. Effect of shading on the photosynthetic characteristics and yield in winter wheat in southern Xinjiang [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(10): 1765-1771.
- [15] 郭佳欢.枣树间作巷道冬小麦冠层光合有效辐射时空窗[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- GUO J H. Spatio-temporal windows of photosynthetically active radiation on the winter wheat canopy in jujube intercropping alley [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [16] 郭佳欢,潘存德,冯会丽,等.枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究[J].中国生态农业学报,2016,24(2):183-191.
- GUO J H, PAN C D, FENG H L, et al. Canopy light distribution and yield of winter wheat in jujube-wheat strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 183-191.
- [17] 张宏芝,陈兴武,雷钧杰,等.杏麦间作模式下小麦光合速率、叶绿素荧光及产量对追氮量和播种密度的响应[J].麦类作物学报,2015,35(3):387-393.
- ZHANG H Z, CHEN X W, LEI J J, et al. Effect of planting density and top dressing nitrogen on photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence and yield of wheat under apricot-wheat intercropping [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 387-393.
- [18] 朱军,石书兵,马林,等.不同时期套种绿肥对免耕春小麦光合生理特性及产量的影响[J].新疆农业科学,2008,45(6):990-995.
- ZHU J, SHI S B, MA L, et al. Effect of intercropping green manure in different periods on photosynthetic physiology and yield of spring wheat with zero-tillage[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(6): 990-995.
- [19] 杨相昆.生育前期揭除地膜对棉花生长发育及棉田生态的影响机制[D].石河子:石河子大学,2018.
- YANG X K. Cotton growth and development and field ecology at different film removal times during the early stage[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [20] MALONE S, HERBERT D A, HOLSHOUSER D L. Evaluation of the LAI-2000 plant canopy analyzer to estimate leaf area in manually defoliated soybean[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 1012-1019.
- [21] 杨相昆,魏建军,张力,等.春播与复播油菜产量形成及群体生理参数比较研究[J].中国油料作物学报,2014,36(1):59-65.
- YANG X K, WEI J J, ZHANG L, et al. Comparative study of grain yield and canopy physiological parameter of oil-sunflower between spring sowing and stubble-field[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(1): 59-65.
- [22] 明道绪.高级生物统计[M].北京:中国农业出版社,2006.
- MING D X. Advanced biostatistics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [23] 王飞,胡莎莎,焦念元,等.玉米、花生及其间作茬口与施磷对冬小麦光合特性及产量的影响机制[J].西北植物学报,2019,39(4):702-711.
- WANG F, HU S S, JIAO N Y, et al. Effect of sole maize, sole peanut, and maize-peanut intercropping crops for rotation and phosphate fertilizer on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(4): 702-711.
- [24] 张立成,邵继海,林毅青,等.稻—稻—油菜轮作对土壤微生物活性和多样性的影响[J].生态环境学报,2017,26(2):204-210.
- ZHANG L C, SHAO J H, LIN Y Q, et al. Influence of microbial diversity and activity of soil on the rice-rice-rape rotation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2): 204-210.
- [25] 李银平,徐文修,候松山,等.春小麦复播绿肥对连作棉田土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2009,25(6):151-154.
- LI Y P, XU W X, HOU S S, et al. The influence of spring wheat and green manure to the soil fertility of the continuous cropping cotton fields [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(6): 151-154.
- [26] 杨文元,李腾飞,董博,等.播量对麦后复种油菜生物产量及耕层土壤养分的影响[J].西北农业学报,2017,26(4):583-587.
- YANG W Y, LI T F, DONG B, et al. Effects of seeding rate on rape-seed biological yield and soil nutrient in wheat stubble multiple cropping rape [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(4): 583-587.
- [27] EVANS L T, DUNSTONE R L. Some physiological aspects of evolution in wheat [J]. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1970, 23(4): 725-742.
- [28] 王曙光,李中青,贾寿山,等.小麦叶片气孔性状与产量和抗旱性的

- 关系[J].应用生态学报,2013,24(6):1609-1614.
- WANG S G, LI Z Q, JIA S S, et al. Relationships of wheat leaf stomatal traits with wheat yield and drought-resistance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1609-1614.
- [29] 王飞,尹飞,龙浩强,等.玉米||花生茬口对冬小麦旗叶光化学活性的影响[J].草业学报,2019,28(7):123-131.
- WANG F, YIN F, LONG H Q, et al. Photochemical activity in flag leaves of winter wheat when following maize, peanut, or a maize-peanut intercrop in a crop rotation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(7): 123-131.
- [30] 樊高琼,杨文钰,雍太文,等.不同前作对套作小麦花后生长发育及产量形成的影响[J].四川农业大学学报,2009,27(2):137-140.
- FAN G Q, YANG W Y, YONG T W, et al. Effects of different preceding crop on growth and yield development of winter wheat after flowering[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(2): 137-140.
- [31] 史校艳,王志强,谷庆昊,等.施氮量对不同茬口冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):2041-2048.
- SHIX Y, WANG Z Q, GU Q H, et al. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat with different former crops[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2041-2048.
- [32] 郑海泽,张凤琴,张红芳,等.茬口和灌水对小麦产量及个体和群体生长动态的影响[J].陕西农业科学,2008,54(3):1-3.
- ZHENG H Z, ZHANG F Q, ZHANG H F, et al. Effects of stubble and irrigation on yield and individual and population growth dynamics of wheat[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2008, 54(3): 1-3.
- [33] 靖华,崔欢虎,王裕智,等.茬口和施氮水平对不同基因型小麦产量及产量结构的影响[J].陕西农业科学,2007,(4):3-5,42.
- JING H, CUI H H, WANG Y Z, et al. Effect of crop rotation and nitrogen application on yield components of different genotype's wheat[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2007,(4): 3-5, 42.
-
- (上接第 29 页)
- [25] 李龙,姚云峰,秦富仓.内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2014,33(11):2930-2935.
- LI L, YAO Y F, QIN F C. Distribution and affecting factors of soil organiccarbon of terraced fields in Chifeng, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 2930-2935.
- [26] 苑广源,TITO M,毛丽萍,等.16年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):252-258,267.
- YUAN G Y, TITO M, MAO L P, et al. Effects of conservational tillage measures on soil carbon pool and stability in a winter forage-crop rotation system on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 252-258, 267.
- [27] 薛琳,李勇,周毅,等.旱作条件下不同覆盖方式对水稻氮素和干物质转移利用的影响[J].南京农业大学学报,2009,32(2):70-75.
- XUE L, LI Y, ZHOU Y, et al. Effect of aerobic mulching on nitrogen use efficiency, dry matter and nitrogen translocation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 70-75.
- [28] 张统帅,闫丽娟,李广,等.免耕和秸秆覆盖对旱作区土壤氮素、水分和春小麦产量的影响[J].浙江农业学报,2020,32(8):1329-1341.
- ZHANG T S, YAN L J, LI G, et al. Effects of no tillage and straw mulching on soil nitrogen, water content and yield of spring wheat in dryland farming area[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(8): 1329-1341.
- [29] 杨晶,沈禹颖,南志标,等.保护性耕作对黄土高原玉米—小麦—大豆轮作系统产量及表层土壤碳管理指数的影响[J].草业学报,2010,19(1):75-82.
- YANG J, SHEN Y Y, NAN Z B, et al. Effects of conservation tillage on crop yield and carbon pool management index on top soil within a maize-wheat-soy rotation system in the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(1): 75-82.
- [30] 冀雅珍,武海霞.不同秸秆处理方式下春玉米 N、P、有机质动态变化规律研究[J].水资源开发与管理,2020(3):3-7.
- Ji Y Z, WU H X. Study on dynamics of N, P and organic matter in spring maize under different straw treatments[J]. The Global Sea-buckthorn Research and Development, 2020(3): 3-7.
- [31] JU X T, LIU X J, ZHANG F S, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. Ambio, 2004, 33(6): 300-305.
- [32] ZHANG Y, LIU D H, JIA Z K, et al. Ridge and furrow rainfall harvesting can significantly reduce N₂O emissions from spring maize fields in semiarid regions of China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104971.
- [33] 李尚中,樊廷录,赵晖,等.不同地膜覆盖栽培模式对玉米产量、水分利用效率和品质的影响[J].草业学报,2020,29(10):182-191.
- LI S Z, FAN T L, ZHAO H, et al. Effects of different plastic film mulching cultivation models on yield, water use efficiency and quality of maize[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(10): 182-191.
- [34] 路海东,薛吉全,郝引川,等.黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J].生态学报,2016,36(7):1997-2004.
- LU H D, XUE J Q, HAO Y C, et al. Effects of black film mulching on soil environment and maize growth in dry land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1997-2004.
- [35] ZHANG P, WEI T, HAN Q F, et al. Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106382.