中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

肥-沙混施对盐碱地冬小麦群体库源关系的影响

李晓爽，党红凯，宋妮，申孝军，孙景生

引用本文:
李晓爽, 党红凯, 宋妮, 等. 肥-沙混施对盐碱地冬小麦群体库源关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1695-1705.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190333

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响
Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat
中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1770-1778 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170451

长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变
Evolution of soil organic carbon and crop yield under long-term fertilization in grey desert soils
中国生态农业学报. 2016(2): 154-162 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151082

密度和有机肥对苏北滩涂蓖麻群体生长及产量构成的影响
Effect of organic fertilizer on growth and yield components of castor under different planting densities
中国生态农业学报. 2017, 25(9): 1306-1316 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170279

施肥方式对水稻'花优14'干物质积累、产量及肥料利用率的影响
Effect of fertilizer management on dry matter accumulation, yield and fertilizer use efficiency of rice cultivar 'Huayou-14'
中国生态农业学报. 2018, 26(6): 815-823 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171029

遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响
Effects of shading and nitrogen rate on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield of winter wheat
中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1177-1184 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160207

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190333

李晓爽, 党红凯, 宋妮, 申孝军, 孙景生. 肥-沙混施对盐碱地冬小麦群体库源关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1695−1705

LI X S, DANG H K, SONG N, SHEN X J, SUN J S. Effects of mixed application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment on the sink-source relationship of winter wheat in saline-alkaline soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1695−1705

肥-沙混施对盐碱地冬小麦群体库源关系的影响*

李晓爽[1,2], 党红凯[2], 宋 妮[1], 申孝军[1], 孙景生[1**]

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所 新乡 453003; 2. 河北省农林科学院旱作农业研究所 衡水 053000)

摘 要: 为明确掺黄河泥沙同时配施生物有机肥(肥-沙混施)条件下盐碱地冬小麦群体库、源的特征及变化规律, 探讨肥-沙混施条件下作物库源动态变化特征, 探求盐碱地冬小麦产量的限制因子, 为盐碱地改良和开发利用提供理论依据, 采用大田定位跟踪调查方法, 于 2015—2018 年连续 3 个冬小麦生长季在河北省南皮县开展试验。设置掺黄河泥沙(SS)、配施生物有机肥(FF)、肥-沙混施(SF)和空白对照(CK)4 个处理。结果表明, 所有处理小麦旗叶花后净光合速率呈逐渐下降趋势, 开花—花后 20 d 的平均值表现为 SF>FF>SS>CK, SF、FF 和 SS 分别比 CK 高 12%、10%和 4%以上, 尤其在花后 20 d, SF、FF 和 SS 仍能维持较高的光合性能, 分别比 CK 高 55.08%、27.32%和 1.88%。随生育进程光合势呈单峰曲线变化, 孕穗—开花期达到最大, 开花 30 d 后群体光合势快速下降, 表现为 SF>FF>SS>CK, SF、FF 和 SS 在孕穗—开花期的 3 年平均光合势依次分别比 CK 提高 29.02%、18.79%和 10.62%; 其花后总光合势分别比 CK 高 41.66%、24.72%和 13.94%。在表征源库关系的指标上, SF 的全生育期、开花前和开花后源生产能力均为最高, 分别比 CK 高 34.06%、40.52%和 28.15%; SF 的穗数、总粒数、最大潜在库容和有效库容量均为最高, 3 年平均分别比 CK 高 25.69%、30.00%、42.06%和 38.84%。SF 的产量、开花后源生产能力的转化率、粒叶比和经济系数均为最高, 3 年平均比 CK 提高 41.08%、9.53%、8.50%和 4.01%。本研究条件下, 小麦的有效库容量与总穗数和穗粒数呈极显著正相关。总穗数和总粒数是影响盐碱地冬小麦产量的关键因子。掺黄河泥沙或配施生物有机肥均能够提高小麦光合性能, 提高源生产能力, 促进源库转化。掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理综合了掺黄河泥沙和配施生物有机肥的优点, 效果最佳, 更有利于滨海盐碱土壤的改良和可持续开发利用。

关键词: 盐碱地; 生物有机肥; 黄河泥沙; 冬小麦; 库源关系

中图分类号: S512.1+1

文章编号: 2096-6237(2019)11-1695-11 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of mixed application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment on the sink-source relationship of winter wheat in saline-alkaline soil*

LI Xiaoshuang[1,2], DANG Hongkai[2], SONG Ni[1], SHEN Xiaojun[1], SUN Jingsheng[1**]

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China; 2. Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

* 国家自然科学基金重大项目(51790534)资助

** 通信作者: 孙景生, 主要研究方向为节水灌溉原理与农业水资源高效利用技术。E-mail: jshsun623@163.com
李晓爽, 主要研究方向为作物水分高效利用。E-mail: lxsh1980@126.com

收稿日期: 2019-05-05 接受日期: 2019-06-24

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (51790534).

** Corresponding author, E-mail: jshsun623@163.com

Received May 5, 2019; accepted Jun. 24, 2019

Abstract: To study the source and sink characteristics and the transformation of both source and sink of winter wheat in saline-alkali soil, we conducted an experiment in Nanpi County, China, during the winter wheat growing seasons from 2015 to 2018. The positioning monitoring test was employed in the study. The study involved four processes: biological organic fertilizer application (FF), mixing Yellow River sediment (SS), FF and SS combination (SF), and blank (CK) treatment as control. Wheat varietiy 'Xiaoyan 60' was used in the field as the experimental material, and the growth parameters and grain yield of the wheat were monitored during the growth period. The findings revealed that there was a gradual downward trend in the photosynthetic rate (P_n) of flag leaves after anthesis under different treatments. The order of flag leaves P_n was SF > FF > SS > CK from anthesis to 20 d after anthesis. SF, FF, and SS were averagely 55.08%, 27.32%, and 1.88% higher, respectively, than CK. As for the growth process, the leaf area duration showed a single peak curve, with the peak appearing at the boot-anthesis stage. After 30 days of anthesis, there was a rapid decline in leaf area duration, and the photosynthetic potential of the treatments was SF > FF > SS > CK. At the boot-anthesis stage, the photosynthetic potentials of SF, FF, and SS were increased by 29.02%, 18.79%, and 10.62% respectively, compared with CK. Moreover, their total photosynthetic potentials after anthesis were 41.66%, 24.72%, and 13.94% higher, respectively, than that of CK. The source productivity capacity of SF was the highest during the whole growth period, before and after anthesis, at 34.06%, 40.52%, and 28.15% higher respectively, than that of CK. SF had the highest storage indexes, including panicle number, total grain number, maximum potential storage capacity and effective storage capacity; these were averagely 25.69%, 30.00%, 42.06%, and 38.84% higher, respectively, than in CK. The source-sink relationship indexes of SF were all the highest. They were yield, conversion rate of source production capacity after anthesis, grain/leaf ratio, and economic coefficient; these were 41.08%, 9.53%, 8.50%, and 4.01%, higher, respectively, than with CK. In this study, the effective storage capacity showed significantly positive correlation with the total number of spikes and the total number of grain, and these were the key factors affecting winter wheat yield in saline-alkali soil. The way of mixing Yellow River sediment or applying bio-organic fertilizer could improve the photosynthetic performance of wheat, improve the production capacity of the source, and promote the transformation of the source-sink. The best treatment was the SF treatment, which combined SS and FF application. This treatment combines the advantages of both, and was more conducive to the improvement and sustainable development and utilization of coastal saline and alkaline soil.

Keywords: Saline-alkaline soil; Biological organic fertilizer; Yellow River sediment; Winter wheat; Sink-source relationship

河北省盐碱耕地面积占总耕地面积的10%以上, 主要分布在河北东部的低平原区和滨海平原区[1], 是河北省中低产田的主要组成部分[2]。由于该地区耕地资源有限, 盐碱化土地改良已成为破解粮食生产能力低、增加粮食总产量的重要途径[3]。河北省低平原区盐碱地小麦(*Triticum aestivum*)种植面积占有较大比重, 对全省产量影响较大[4]。目前利用生物有机肥在盐碱地改良方面做了很多工作, 已有研究认为生物有机肥配施能有效改善土壤结构, 增加土壤供水能力[5], 提高氮肥利用效率[6], 减轻盐碱胁迫对种子发芽和苗期生长的抑制[7], 提高作物的抗盐碱能力, 进而提高作物产量[8]。耕层掺沙改良盐碱地在我国有悠久的历史, 能明显改善土壤结构[9], 显著提高掺沙层以下土壤含水率[10], 降低土壤全盐量, 快速提升土壤肥力[11-12], 改善作物生长环境, 提高作物产量[13-14]。但是, 在该类地区采用生物有机肥-掺沙结合方法改良盐碱地的过程中, 关于小麦源库物质生产量、源库间同化物的转化量及源生产能力对籽粒产量的贡献率, 尚缺乏定量分析研究。

库源关系是量化分析作物生产力的重要理论工具。受遗传和环境影响, 库源特性对小麦产量形成的作用不同[15]。在栽培环境对小麦库源关系的影响方面, 有研究认为, 提高单位面积产量可以通过增加密度从而扩大源面积和库容量来实现[16], 而在高密度种植条件下, 产量提高的主要限制因子是群体源活性不足, 适当降低群体密度, 进而改善冠层环境, 增强源活力, 反而能实现高产[17]。因此, 小麦获得高产是通过栽培措施使源库关系在高水平上获得动态平衡的结果[18]。改善源库关系方面, 也有大量的研究报道。减源或缩库处理均能促进茎叶同化产物运输到库, 使小麦粒重显著增加[19]。因此, 在作物产量和品质形成过程中, 只有在保证适宜库/源比的基础上, 构成库容大、积累量高的源库平衡关系, 才可能实现农作物高产优质[20]。此外, 郭伟等[21]研究发现, 花后碳氮调控对春小麦源库关系与籽粒品质均造成影响。许育彬等[22]研究发现, CO_2 浓度升高可通过提高单位叶面积的库承载力和物质调运能力, 改善源库关系; 增加氮素供应可增进 CO_2 对库源改善的调控作用。刘孟雨[23]发现, 增大小麦库容及源的供应能力有利于水分利用效率的提高。为此, 本研究选用小麦品种'小偃 60'作为供试材料, 在生物有机肥配合黄河泥沙施入(肥-沙混施)盐碱地改变土

壤结构的前提下, 开展对冬小麦群体源库关系的研究, 旨在探讨各处理对群体库源关系内在转化的影响, 为提高中低产区盐碱地冬小麦产量和肥-沙混施技术提供理论依据和技术参考。

1　材料和方法

1.1　试验设计

大田试验于2015—2018年连续3个小麦生长季, 在河北省南皮县穆三拨农场(38.06°N, 116.77°E, 海拔9.5 m)进行。该区位于河北省东南部近滨海低平原, 属于半湿润大陆季风气候区, 年平均气温12.3 ℃, 降水量550 mm, 无霜期180 d。3个生长季小麦的前茬均为夏玉米(*Zea mays*)。土壤母质为黄河和海河的冲积物, 土壤类型为盐化潮土。于2015年10月3日冬小麦播种前取耕作层土壤, 对其盐分和养分状况进行分析化验, 土壤盐分含量为1.2~2.8 g·kg^{-1}, 0~20 cm土层有机质含量为1.19~1.30 g·kg^{-1}、全氮含量为0.079~ 0.086 g·kg^{-1}、速效氮含量为49~53 mg·kg^{-1}、速效磷含量为6.2~6.9 mg·kg^{-1}、速效钾含量为125~130 mg·kg^{-1}。

试验设置配施生物有机肥处理(简称配肥处理)、掺黄河泥沙处理(简称掺沙处理)、配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理(简称肥-沙混施处理)和空白对照共4个处理, 分别用FF、SS、SF和CK表示。小区面积11 m×6.6 m, 每个处理3次重复。所有处理整地前施底肥为: 尿素210 kg·hm^{-2}(N≥46.2%), 磷酸二铵(含N 18%, P_2O_5 46%)300 kg·hm^{-2}, 氯化钾(含K_2O 60%)150 kg·hm^{-2}。配施生物有机肥处理整地前施生物有机肥3 600 kg·hm^{-2}[所用生物有机肥含有机质≥45%, 氮磷钾总含量≥6%, 有效活菌数(cfu)≥2×10^8·g^{-1}, 水分≤10%, pH 5.5~8.0]。掺黄河泥沙处理在人工铺黄河泥沙7 cm厚后, 耕层旋耕掺混。肥-沙混施处理在人工摊铺黄河泥沙7 cm后, 施生物有机肥3 600 kg·hm^{-2}, 耕层旋耕掺混。所有处理在浇拔节水时追施尿素300 kg·hm^{-2}(N≥46.2%)。冬小麦品种选用'小偃60', 2015年、2016年和2017年分别于10月19日、10月14日和11月8日足墒播种, 采用15 cm等行距。播量采用品种审定时推荐的基本数。翌年春季分别于4月3日、4月5日和4月2日浇拔节水并追肥, 6月10日、6月13日和6月12日收获。

1.2　测定项目与方法

每小区标记有代表性的植株。于返青期、拔节期、开花期、灌浆期、开花后10 d、开花后20 d、开花后30 d和成熟期取样, 苗期每次取样30株, 成株后取样10株, 进行下列参数测定。

群体叶面积指数(LAI)[24]=样叶面积(cm^2)/样叶重(g)×样株绿叶总重(g)/样株数(株)×基本苗(株·hm^{-2})×1.5×10^{-4}　(1)

群体光合势(LAD): 单位土地面积上叶面积持续时间, 单位是m^2·d^{-1}·hm^{-2}。按下式计算:

$$LAD=(LA_2+LA_1)\times(t_2-t_1)/2 \quad (2)$$

式中: LA_1、t_1分别表示前一次的叶面积(m^2)、取样时间, LA_2、t_2分别表示后一次的叶面积(m^2)、取样时间。小麦开花后总光合势等于开花后0~10 d、10~20 d、花后20 d到成熟期群体光合势之和。全生育期的总群体光合势等于各生育阶段的群体光合势之和。

光合速率: 采用美国CID公司生产的CI-340便携式光合测定系统测定小麦净光合速率(P_n)。开花期开始每隔10 d测定冠层叶片的光合速率, 每个处理选取6株受光方向和生长状况较一致的叶片, 使用CI-340光合仪闭路测定。

源、库生产能力指标和计算公式参考文献[25]。主要有下列指标:

源生产能力: 即干物质积累量, 在考察单株性状后, 植株地下部分剪掉, 将植株105 ℃杀青30 min后, 置80 ℃烘干至恒重后称重, 计算源生产能力。

最大潜在库容量=单位面积穗数(穗·hm^{-2})×潜在粒数(粒·穗$^{-1}$)×潜在粒重(g·粒$^{-1}$)　(3)

有效库容量=单位面积总粒数(粒·hm^{-2})×粒重(g·粒$^{-1}$)　(4)

产量: 成熟前在小区中计数各样点上的穗数, 求算每公顷穗数。然后在样点中选取代表性麦穗20个, 计数各穗上的籽粒总数, 并求取每穗粒数。每个处理3个小区, 每个小区收获1个3 m^{2}的样点, 计算每平方米产量。各样点取得的籽粒测定千粒重, 重复3次。整个小区采用联合收割机收获计算产量。

经济系数=经济产量(籽粒烘干质量)(kg·hm^{-2})/生物产量(地上部烘干质量)(kg·hm^{-2})　(5)

以叶面积(孕穗期最大叶面积)大小代表源, 以具有经济价值的籽粒数量和粒重代表库。按下式计算叶粒比:

粒叶比=群体收获总粒数(粒)/群体最大叶面积(cm^2)　(6)

开花后源生产能力转化率=烘干籽粒质量(kg·hm^{-2})/开花后源生产能力(kg·hm^{-2})×100%　(7)

茎鞘物质输出率=[开花期茎鞘干质量(kg·hm^{-2})–成熟时茎鞘干物质量(kg·hm^{-2})]/开花期茎鞘干物质量(kg·hm^{-2})×100%　(8)

1.3　数据分析

分别采用SPSS 19.0和Microsoft Excel 2010对数据进行统计和作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理盐碱地冬小麦的源特征

2.1.1 冬小麦群体的光合性能

由表 1 可以看出, 所有处理的净光合速率(P_n)峰值均出现在开花期, 变幅为 20.19~25.66 μmol·m^{-2}·s^{-1}。除 2018 年 FF 处理峰值最大以外, 2016 年和 2017 年均以 SF 的峰值最大, 其变动范围为 22.42~25.66 μmol·m^{-2}·s^{-1}; FF 和 SS 的变动规律相似, 变动范围分别为 21.80~27.14 μmol·m^{-2}·s^{-1}和 22.14~24.93 μmol·m^{-2}·s^{-1}。随着测定时期(开花期、花后 10 d 和花后 20 d)不同, SF 比 CK 高出比例也不同, 分别为 13.86%、28.54%和 55.08%; FF 比 CK 高 7.55%、10.94%和 27.32%; SS 比 CK 高 11.10%、12.66%和 1.88%。在花后 20 d, SF、FF 和 SS 均维持了较高的光合速率, 特别是 SF。

表 1 不同处理盐碱地冬小麦旗叶净光合速率变化动态

Table 1 Dynamics of net photosynthetic rate of flag leaf of winter wheat under different treatments μmol·m^{-2}·s^{-1}

年份 Year	测定时间 Measure time	处理 Treatment			
		CK	FF	SS	SF
2016	开花期 Anthesis	22.59±0.24a	21.80±0.21a	24.15±0.23a	24.91±0.19a
	花后 10 d 10 days after anthesis	18.53±0.22b	20.76±0.19ab	21.01±0.19ab	24.36±0.12a
	花后 20 d 20 days after anthesis	10.27±0.14b	14.53±0.11b	11.06±0.08b	14.68±0.07a
	平均 Average	17.13	19.03	18.74	21.31
2017	开花期 Anthesis	20.19±0.19b	22.14±0.22ab	24.93±0.18a	25.66±0.23a
	花后 10 d 10 days after anthesis	17.27±0.13c	19.59±0.15bc	20.29±0.16b	25.57±0.14a
	花后 20 d 20 days after anthesis	10.14±0.07c	13.25±0.10b	10.68±0.11c	19.81±0.13a
	平均 Average	15.87	18.33	18.63	23.68
2018	开花期 Anthesis	21.51±0.21a	24.80±0.18a	22.14±0.21a	22.42±0.23a
	花后 10 d 10 days after anthesis	17.42±0.15a	18.70±0.13a	18.66±0.14a	18.48±0.13a
	花后 20 d 20 days after anthesis	9.58±0.11a	10.52±0.09a	9.79±0.06a	12.16±0.09a
	平均 Average	16.17	18.01	16.20	17.69

CK 为对照处理; FF 为配施生物有机肥处理; SS 为掺黄河泥沙处理; SF 为配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理。同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。CK: control treatment; FF: biological organic fertilizer application; SS: mixing Yellow River sediment; SF: combined application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

2.1.2 冬小麦群体光合势的变化动态

光合势是叶面积与其持续时间的乘积, 反映不同小麦群体在某一个时间段内截获太阳光能的潜势。2015—2018年冬小麦光合势随生育进程呈单峰曲线变化(图1a)。在2015—2018年小麦生长季, 所有处理光合势最大的阶段均出现在孕穗—开花期, 光合势均在6.41×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}以上; 其次是开花后0~10 d和拔节—孕穗期, 每个阶段积累的光合势均在3.08×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}以上; 花后10~20 d和起身—拔节期的光合势累积量相当, 均在1.74×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}以上, 花后20~30 d积累量最少, 与后期叶片衰亡、叶面积明显下降有关。

在所有处理中, SF在孕穗—开花期光合势较高, 变幅为7.14×10^4~9.95×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}, 按年度依次比CK高28.21%、33.34%和25.50%。其次是FF, 峰值变化范围在6.87×10^4~8.97×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}, 按年度依次比CK高9.96%、28.29%和18.09%。SS峰值变幅为5.62×10^4~7.84×10^4 m^2·d^{-1}·hm^{-2}。SS表现出比CK略高的光合势, 全生育期按年度依次平均比CK高7.96%、11.28%和12.63%。

由图1可见, 2015—2018年所有处理平均累积总光合势为1.717×10^5~2.567×10^5 m^2·d^{-1}·hm^{-2}。SF的累积总光合势最高, 3年均值2.494×10^5 m^2·d^{-1}·hm^{-2}, 比CK高31.65%~38.10%; 其次是FF, 累积总光合势为2.062×10^5~2.362×10^5 m^2·d^{-1}·hm^{-2}, 比CK高16.77%~24.23%; SS的累积总光合势为1.895×10^5~2.097×10^5 m^2·d^{-1}·hm^{-2}, 比CK高2.01%~10.33%。各处理花后总光合势占累积总光合势的比例有所不同, CK、FF、SS和SF分别为29.95%、31.51%、31.79%和32.26%, FF、SS和SF花后总光合势分别比CK提高24.72%、13.94%和41.66%(图1b)。

2.1.3 冬小麦的群体源生产特性

由表2可见, 各处理源生产能力差异显著。不同处理的全生育期、开花前和开花后源生产能力的表

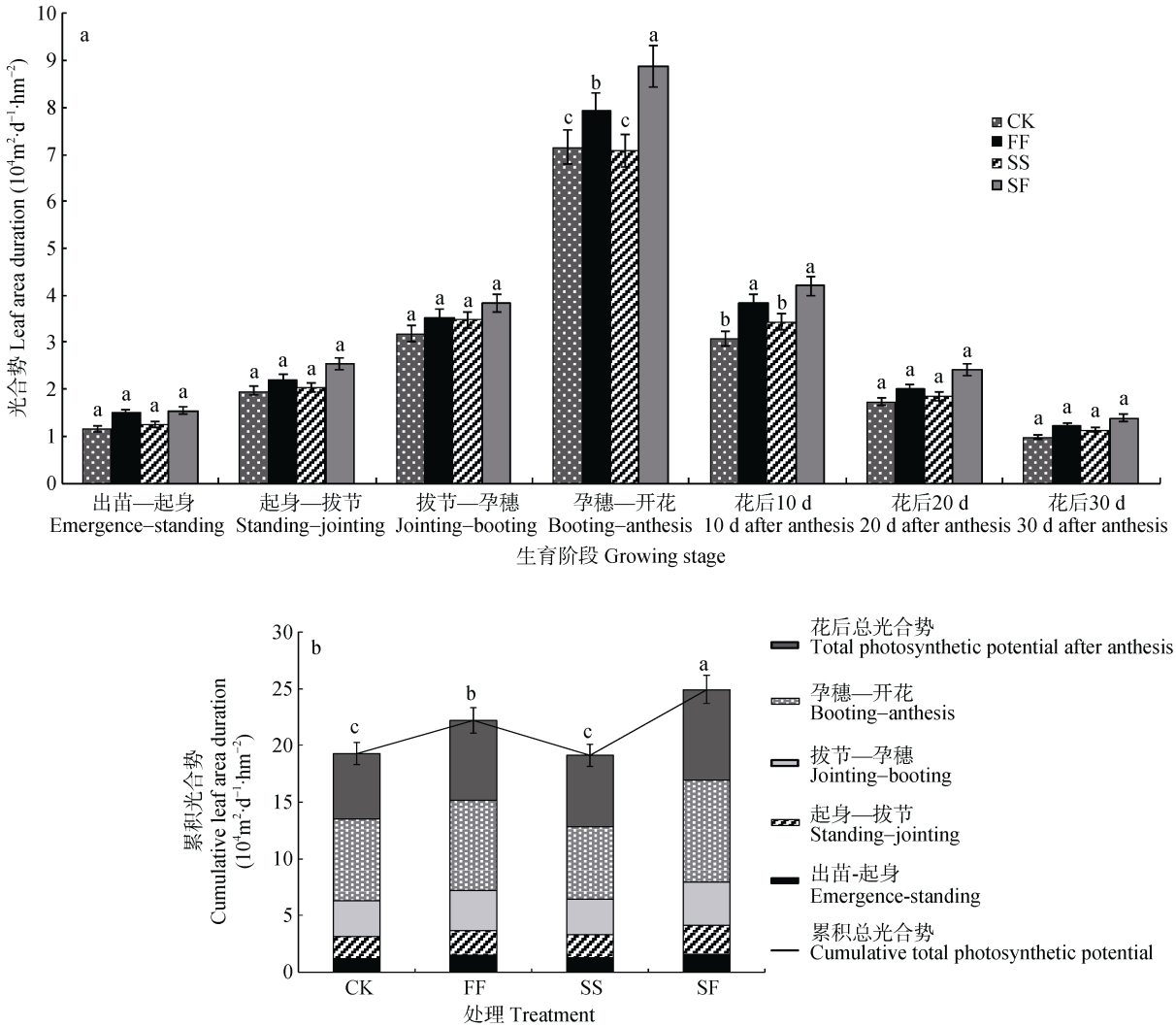

图 1　2015—2018 年不同处理盐碱地冬小麦平均光合势的动态变化(a)和平均累积光合势(b)

Fig. 1　Changes of average leaf area duration (a) and average cumulative leaf area duration (b) of winter wheat in saline alkali soil under different treatments in 2015–2018

CK为对照处理, FF为配施生物有机肥处理, SS为掺黄河泥沙处理, SF为配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理。柱形图上不同字母表示差异显著(P<0.05)。CK: control treatment; FF: biological organic fertilizer application; SS: mixing Yellow River sediment; SF: combined application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment. Different lowercase letters above the column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

现规律一致: SF>SS>FF>CK。CK的全生育期、开花前和开花后源生产能力均为最小; SF的全生育期、开花前和开花后源生产能力均为最高, 分别平均比CK高34.06%、40.52%和28.15%; 其次是FF的全生育期、开花前和开花后源生产能力, 分别平均比CK高22.95%、33.54%和30.63%; SS的全生育期、开花前和开花后平均源生产能力分别比CK高10.00%、11.66%和8.48%。各处理的开花后源生产能力/全生育期源生产能力差距不大, 变动范围为49.63%~52.76%, 表现为CK>FF>SS>SF。年际间比较, 各处理的全生育期、开花前和开花后源生产能力3个指标在2015－2016年最高, 2017－2018年最低。

2.2　不同处理盐碱地冬小麦的库特征

不同处理冬小麦群体库的指标见表3。处理间比较, 冬小麦群体穗数和总粒数表现为: SF>FF>SS>CK, 均以SF最高, 变幅分别为4.29×10^5~4.65×10^6穗·hm^{-2}和9.98×10^7~11.78×10^7 粒·hm^{-2}, 分别比其他处理高3.76%~29.70%和2.87%~28.12%。SF、FF和SS的穗数比CK分别提高22.74%~29.69%、14.01%~21.99%和4.00%~12.59%, 总粒数分别提高22.16%~34.47%、10.68%~26.79%和5.96%~13.83%。千粒重表现为: SS>SF>FF>CK, 依次比CK高8.97%、6.71%和1.84%。千粒重以SS的最大, 平均为46.59 g, 比CK高8.97%; 其次是SF, 平均比CK高6.71%; FF的千粒重比CK略高1.84%。最大潜在库容表现为:

表 2 不同处理盐碱地冬小麦的不同时期群体源生产能力

Table 2 Dry matter production capacity of winter wheat in different growth periods in saline alkali soil under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	群体源生产能力 Dry matter production capacity of population ($kg \cdot hm^{-2}$)			DCA/DCW (%)
		全生育期(DCW) Whole growth period	开花前 Before anthesis	开花后(DCA) After anthesis	
2015—2016	CK	9 699.84±687.63c	4 624.41±137.53c	5 075.43±213.21ac	52.32±3.32a
	FF	12 296.26±583.21b	5 808.91±131.63b	6 487.35±192.18a	52.76±1.21a
	SS	10 312.65±464.24b	4 986.42±120.52b	5 326.23±181.82b	51.65±2.24b
	SF	12 816.33±300.46a	6 455.30±100.24a	6 361.12±131.21a	49.63±1.88b
2016—2017	CK	8 967.39±482.32b	4 307.98±233.13c	4 659.41±168.73bc	51.96±2.21a
	FF	11 452.05±464.25ab	5 497.67±161.72b	5 954.38±156.42c	51.99±1.00a
	SS	9 772.90±531.21b	4 772.78±200.40b	5 000.12±300.21b	51.16±0.89ab
	SF	12 289.64±601.23b	6 141.52±171.81a	6 148.12±192.20a	50.03±1.54b
2017—2018	CK	7 910.08±510.62c	3 761.44±255.12c	4 148.63±171.42c	52.45±3.11ab
	FF	8 949.29±397.24b	4 324.06±197.20b	4 625.23±79.62ab	51.68±1.56a
	SS	9 071.68±395.71ab	4 376.52±183.34b	4 695.16±131.88b	51.76±2.43ab
	SF	10 519.83±488.98a	5 243.57±192.23a	5 276.26±149.25a	50.16±0.88a

CK 为对照处理, FF 为配施生物有机肥处理, SS 为掺黄河泥沙处理, SF 为配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理。同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。CK: control treatment; FF: biological organic fertilizer application; SS: mixing Yellow River sediment; SF: combined application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

表 3 不同处理盐碱地冬小麦的群体库指标

Table 3 Population sink indexes of winter wheat in saline alkali soil under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number (10^6 spike$\cdot hm^{-2}$)	总粒数 Total grain number (10^4 grain$\cdot hm^{-2}$)	千粒重 1000-grain weight (g)	最大潜在库容 Potential sink storage capacity ($kg \cdot hm^{-2}$)	有效库容量 Effective sink storage capacity ($kg \cdot hm^{-2}$)
2015—2016	CK	3.75±0.34b	8.82±0.05	45.19±0.32b	5 324.1±301.7c	3 985.58±287.24c
	FF	4.35±0.43a	11.18±0.04	45.57±0.23b	6 612.5±177.6b	5 095.68±119.26a
	SS	3.90±0.36b	9.50±0.06	47.34±0.41a	6 630.5±285.4b	4 499.10±207.14b
	SF	4.65±0.42a	11.78±0.03	46.72±0.36ab	7 850.4±407.2a	5 503.10±118.43a
2016—2017	CK	3.53±0.33b	8.15±0.04	42.12±0.28c	4 892.1±336.1c	3 430.93±206.56c
	FF	4.02±0.31a	10.25±0.04	44.71±0.33b	5 773.5±187.1b	4 584.43±176.48b
	SS	3.85±0.67b	9.27±0.09	46.62±0.62a	5 841.9±297.5b	4 322.75±230.72b
	SF	4.33±0.21a	10.95±0.03	45.86±0.17ab	6 717.6±116.4a	5 023.32±114.24a
2017—2018	CK	3.31±0.36b	8.09±0.05	42.07±0.34bc	4 870.5±314.8c	3 396.88±197.76c
	FF	4.04±0.36b	8.95±0.04	41.42±0.32b	5 954.6±222.1b	3 706.00±146.34ab
	SS	3.73±0.38b	8.57±0.06	45.83±0.31a	6 256.9±274.7b	3 925.01±217.37b
	SF	4.29±0.34a	9.88±0.04	45.46±0.24a	6 877.7±121.7a	4 485.70±122.03a

CK 为对照处理, FF 为配施生物有机肥处理, SS 为掺黄河泥沙处理, SF 为配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理。同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。CK: control treatment; FF: biological organic fertilizer application; SS: mixing Yellow River sediment; SF: combined application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

SF>SS>FF>CK, 均以SF最高, 依次比其他处理高9.03%~15.54%、13.42%~15.77%和27.17%~32.18%。SS比SF穗数减少的幅度远大于千粒重下降的幅度, 最终使得SS最大潜在库容量显著减少9.92%~17.77%。2015—2016年和2016—2017年处理间有效库容量表现为: SF>FF>SS>CK, 2017—2018年表现为: SF>SS>FF>CK, 3个小麦季均以SF最高, 以CK最低, SF的有效库容比FF、SS和CK分别高11.87%~17.38%、12.50%~21.90%和24.27%~31.70%。年际间比较, 各处理穗数、总粒数、千粒重、最大潜在库容和有效库容量均以2015—2016年最高, CK各项指标随年份增加呈减少趋势, SS和FF除了穗数外, 其他各项指标均表现为2017—2018年略大于2016—2017年。

2.3 不同处理盐碱地冬小麦群体的库源关系

2.3.1 冬小麦群体的源库关系

由表4可见, 各处理产量变幅为3 317.77~5 449.52 kg·hm^{-2}。处理间比较, 掺沙或配肥不同程度提高了盐碱地冬小麦产量, 以SF产量最高, 比其他处理高5.91%~33.98%, 其中和CK相比产量提高26.00%~33.98%。2015—2016年和2016—2017年各处理茎鞘物质输出率均表现为: SS>SF>CK>FF, 2017—2018年各处理间茎鞘物质输出率表现为: SS>SF>FF>CK, 均以SS最高, 其茎鞘物质输出率分别比SF、FF和CK高0.77%~0.96%、2.76%~11.76%和6.47%~10.76%。说明掺沙处理可以提高茎鞘物质输出率。此外, FF随生物有机肥施用年份的增加, 茎鞘物质输出率增大。各处理开花后源生产能力的转化率表现为: SF>SS>FF>CK, SF的花后源生产能力转化率最大, 分别比CK、FF和SS高1.67%~2.32%、5.73%~7.74%和5.88%~8.28%。各处理的粒叶比年际间表现不同, 2015—2016年和2016—2017年表现为: SF>FF>SS>CK, 2017—2018年SF最大, 其次是CK, SS与FF相当。其中SF的3年平均粒叶比高达0.37, 表明单位面积绿叶所承载的籽粒数比其他处理多, 和CK相比增加2.86%~10.53%。各处理的经济系数(EC)比较, 以SF最大, 平均比CK高2%以上。

表 4　不同处理下盐碱地冬小麦的源库关系

Table 4　Source-sink relationship of winter wheat in saline alkali soil under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	茎鞘物质输出率 Export rate of stem and sheath matter (%)	开花后源生产能力的转化率 Conversion rate of leaf source production capacity after anthesis (%)	粒叶比 Grain leaf ratio (grains·cm^{-2})	经济系数 Economic coefficient
2015—2016	CK	3 988.23±83.93c	23.14±0.62b	78.58±1.23c	0.37±0.01a	0.41±0.01a
	FF	5 127.61±115.42ab	22.88±0.38b	79.04±0.97b	0.40±0.02a	0.42±0.02a
	SS	4 456.92±96.70b	25.93±0.17a	83.68±1.26a	0.39±0.00a	0.43±0.02a
	SF	5 449.52±102.72a	25.73±0.46b	85.67±0.89ab	0.41±0.03a	0.43±0.03a
2016—2017	CK	3 535.24±69.21c	22.56±1.04b	79.89±1.54b	0.34±0.02a	0.42±0.01a
	FF	4 796.31±33.82ab	22.17±0.73b	80.55±0.79a	0.36±0.01a	0.42±0.02a
	SS	4 274.13±67.54b	24.68±0.56a	85.48±0.83a	0.35±0.03a	0.44±0.03a
	SF	5 354.42±97.23a	24.51±0.47a	87.09±0.64a	0.38±0.02a	0.44±0.02a
2017—2018	CK	3 317.77±72.61c	25.43±0.87b	79.97±1.29b	0.34±0.01a	0.42±0.01a
	FF	3 704.65±65.66ab	26.44±0.58b	80.10±0.84a	0.32±0.00a	0.41±0.03a
	SS	3 922.81±63.54b	27.19±0.41a	83.55±1.11a	0.32±0.02a	0.43±0.02a
	SF	4 483.25±96.82a	26.93±0.49a	84.97±0.82a	0.35±0.00a	0.43±0.03a

CK 为对照处理, FF 为配施生物有机肥处理, SS 为掺黄河泥沙处理, SF 为配施生物有机肥+掺黄河泥沙处理。同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。CK: control treatment; FF: biological organic fertilizer application; SS: mixing Yellow River sediment; SF: combined application of biological organic fertilizer and Yellow River sediment. Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

2.3.2 冬小麦源与库的相关性

表5表明, 在不同肥-沙混施条件下, 全生育期源生产能力与有效库容量、总穗数和穗粒数之间存在着显著正相关(P<0.05)。全生育期光合势与有效库容量、总穗数、穗粒数之间存在显著正相关(P<0.05), 其中开花前及全生育期光合势均与总穗数达极显著水平(P<0.01)。有效库容量与总穗数和穗粒数达到极显著正相关(P<0.01)。有效库容量与库构成因素之间的相关系数表明总穗数和穗粒数对有效库容量影响较明显, 均达极显著水平(P<0.01)。

3 讨论

3.1 肥-沙混施处理对盐碱地冬小麦源库特性的影响

维持高光合能力和持续时间对产量形成极为重要[15,25]。本研究条件下, 各处理冬小麦开花后的净光合速率(P_n)峰值均出现在开花期(20.19~25.66 μmol·m^{-2}·s^{-1})。此结论不同于赵紫平等[26]峰值出现在灌浆初期的结果, 原因可能与本研究土壤含盐量高有关。本研究肥-沙混施处理在开花期—花后20 d的P_n平均为17.39 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 高于其他处理12.25%~29.90%以上, 说明肥-沙混施处理可以促进冬小麦光合作用, 从而提高作物干物质积累量[27]。灌浆后期的P_n表现和中期一致, 这表明SF处理能够保证持续较高的光合速率, 从而改善后期光合性能, 延缓叶片衰老[28]。对照处理的花后源生产能力转化率为79.48%, 显著低于其他处理, 其全生育期源生产能力主要来自于开花后的源生产能力, 而前期的物质积累欠缺影响了全生育期源的生产能力[18,23]。其他

表 5 盐碱地冬小麦源库各特征因素间的相关系数(2016 年)

Table 5 Correlation coefficients between the components of sink and source of winter wheat in saline alkali soil in 2016

测定项目 Measuring item		有效库容量 Effective sink storage capacity	千粒重 1 000-grain weight	总穗数 Total ears number	穗粒数 Grain number per ear	穗粒重 Grain weight per ear
光合势 Leaf area duration	开花前 Before anthesis	0.979 1*	0.085 5	0.996 5**	0.982 2*	0.681 2
	开花后 After anthesis	0.961 2*	0.114 4	0.984 6*	0.962 3*	0.647 2
	全生育期 Whole growth period	0.971 8*	0.098 3	0.992 5**	0.974 1*	0.667 3
源生产能力 Productive capacity of leaf source	开花前 Before anthesis	0.853 2	0.530 4	0.781 3	0.791 2	0.233 1
	开花后 After anthesis	0.584 4	0.593 2	0.677 4	0.667 3	0.902 8
	全生育期 Whole growth period	0.984 3*	0.266 3	0.953 4*	0.958 4*	0.536 7
产量构成因素 Yield components	最大潜在库容 Potential sink storage capacity	0.903 3	0.521 4	0.854 3	0.848 5	0.283 9
	有效库容量 Effective sink storage capacity	1.000 0**	0.117 8	0.991 6**	0.994 6**	0.663 8
	穗粒重 Grain weight per spike	0.664 2	0.662 9	0.712 2	0.743 3	1.000 0**
	粒叶比 Gain leaf ratio.	0.697 3	0.701 2	0.607 3	0.614 2	0.014 9

和*分别表示极显著(P<0.01)和显著(P<0.05)相关。 and * indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

处理, 特别是 SS 和 SF, 开花后源生产能力转化率高, 分别为84.23%和85.91%, 比对照处理高 5.98%和 8.09%, 其产量也比对照高 16.72%和 41.01%, 说明本研究条件下掺沙处理通过提高开花后的源生产能力而提高产量。所有处理的冬小麦群体光合势随生育阶段的增加而增加, 在孕穗—开花期达最大, 随后随生育阶段的增加逐渐降低。花后 20 d 群体光合势下降的速度较快, 对产量的形成极为不利[15,18], 整个生育期肥-沙混施处理比对照处理高 25%以上, 尤其在花后 20 d 比对照处理高 35%以上。因此, 冬小麦在花后 20 d 维持较高的光合性能是产量提高的关键因子。本研究条件下, 掺黄河泥沙或配施生物有机肥有利于提高小麦旗叶的光合速率和花后 20 d 的群体光合势, 减缓叶片早衰和死亡, 延长叶片光合时间, 提高源供应能力, 尤以肥-沙混施处理最佳。

通过改善小麦生长的生态环境, 促进小麦生长发育, 优化群体结构, 是实现高产的基础[24]。本研究表明, 掺黄河泥沙或配施生物有机肥提高了盐碱地冬小麦的穗数、粒数、千粒重、最大潜在库容量。其中掺沙处理使千粒重提高 4.76%以上, 但总穗数和单株结实粒数偏低, 因此掺沙处理通过提高总穗数和单株结实粒数是获得高产的关键。如何提高群体穗数, 还需在设置不同密度的前提下进行更深入的研究。有效库容量与最大潜在库容量的相关系数表明, 增加总穗数和穗粒数是增加库容的有效措施[15], 是获得较大库容的关键措施[18]。盐碱地冬小麦群体库容不足是造成产量低的主要原因, 而肥-沙混施处理使盐碱地冬小麦单位面积绿叶所承载的籽粒数平均提高 2.86%~10.53%, 说明肥-沙混施处理有利于盐碱地冬小麦产量的提高。

3.2 肥-沙混施处理与盐碱地冬小麦源库转化互作效应

作物产量的形成是源库互作的过程[29]。在作物产量形成过程中, 源为库的建成和充实提供物质保证, 库的大小又可调节源的活性[30]。而在库或源水平均较低时, 增源或增库都能明显促进产量提高[31]。本研究条件下, 所有处理小麦平均有效穗数为 3.98×10^6 穗·hm^{-2}, 平均穗粒数为 24.12 粒, 均低于超高产条件下有效穗数在 4.53×10^6 穗·hm^{-2} 以上, 穗粒数为 35.02 粒以上[32]的结果。说明本研究条件下, 源和库均是盐碱地冬小麦产量的限制因素。

粒叶比是衡量群体条件下源库流是否协调的综合指标。粒叶比越高, 叶片的光合产物输向穗部的越多, 越利于产量的提高[18]。在本研究生产条件下, 肥-沙混施处理比对照处理的粒叶比增加 2.86%~10.53%, 说明与对照处理相比, 肥-沙混施处理能够促进光合产物从源到库的运转更加流畅, 促使更多的源物质转化成库物质。另外, 本研究肥-沙混施处理的有效库容量(4 485.70~5 503.10 kg·hm^{-2})比对照处理高 32%以上, 结合陈红明等[33]关于光合源相近, 粒叶比高的群体的生物量均高于低粒叶比群体的研究结果, 说明肥-沙混施处理提高了冬小麦的最大潜在库容量。

本研究中盐碱地冬小麦群体光合性能和源生产能力与产量和总穗数之间的相关系数表明, 增加总穗数能有效增加光合性能及源生产能力, 较高的光合性能和源生产能力为高产提供了物质保证。可见对于盐碱地冬小麦而言, 要想获得较大的源, 增加总穗数是关键措施之一。本研究与温樱等[34]的研究

结果一致。

肥-沙混施处理的花后总光合势高于配施生物有机肥处理, 其产量也高于配施有机肥处理, 说明肥-沙混施处理有利于盐碱地冬小麦群体生长, 更有利于维持花后的叶面积, 防止叶片早衰, 这也体现在产量上的提高。本研究条件下肥-沙混施分别比单独掺沙和配施生物有机肥提高产量 6%和 14%以上。

3.3　降雨年型对盐碱地冬小麦库源关系的影响

足墒播种是小麦苗全苗壮的基础, 也是小麦安全越冬的保障因素[35]。本研究连续 3 年小麦播种前后均有 50 mm 以上的降雨, 特别是 2017 年 10 月 7—22 日降雨量累计达 80.4 mm。而本研究小麦群体成穗数以 2015—2016 年最高, 以播种前供水最充足的 2017—2018 年最低, 仅从水分上不能发现其中原因; 而从播期上看, 2015 年 10 月 19 日播种, 2016 年 10 月 14 日播种, 播期相近, 群体成穗数相近, 唯有 2017 年连续降雨延误播期(11 月 8 日播种), 冬前积温明显不足, 造成冬前苗弱分蘖少, 成穗数低[24,36]。

从整个生育期降雨量来看, 3 年的降雨量以 2015—2016 年最高(297.4 mm), 其次为 2016—2017 年(187.0 mm), 以 2017—2018 年(115.9 mm)最低。小麦产量同处理年际间比较以 2015—2016 年最高, 以 2017—2018 年最低。产量是库源协调的最终体现, 在本研究限水灌溉条件下, 水分短缺是制约库源协调的因子, 也是限制产量进一步提高的限制因子。

从小麦生育中后期降雨分布来看, 2016 年 5 月 2 日和 14 日降雨平均超过 20 mm, 且多发生在夜间, 此时正值扬花灌浆期, 充足水分供应保证了同化物的运转, 促进了从源到库的转化, 也是本年度同处理年际间千粒重最高的原因。2017 年灌浆期持续干旱, 不利于源库转化[37], 致使本年度千粒重不及 2016 年高。相比之下, 2018 年 5 月份累计降雨 35.7 mm。发生降雨天数共计 8 d, 其中 7 次单次降雨量不足 5 mm, 本月蒸发量大, 连续交叉的小雨加重了盐碱地返盐, 加速冬小麦的衰老, 制约了千粒重的提高, 致使本年度千粒重在 3 年中最低。

进一步比较分析各处理与对照处理发现, 穗数、粒重和产量处理间的差异比年型差异大, 而各年型不同处理差异程度各有不同, 增肥、掺沙与肥-沙混施均可提高本研究条件下的盐碱地源库生产能力, 进而提高小麦产量, 而不同的降雨年型又会对各处理的增产效果起到制约或促进的作用。

4　结论

掺黄河泥沙或配施生物有机肥均可以提高盐碱地冬小麦旗叶净光合速率和光合势, 以肥-沙混施处理效果最佳, 提高开花期—花后 20 d 的净光合速率和整个生育期总光合势 12%和 25%以上。

肥-沙混施处理显著提高花前、花后源生产能力、穗数、总粒数、最大潜在库容、有效库容量和开花后源生产能力的转化率, 分别比对照处理提高 40%、28%、22%、22%、27%、24%和 5%以上。

掺沙处理提高茎鞘物质输出率和千粒重, 分别比对照处理提高 6%和 8%以上。掺黄河泥沙或配施生物有机肥均可以提高盐碱地冬小麦的产量 11%以上, 以肥-沙混施处理提高最多, 高达 26%以上。

肥-沙混施处理综合了掺黄河泥沙和配施生物有机肥的效果, 能够提高小麦光合性能, 延缓花后 20~30 d 的叶片衰老, 提高源生产能力, 促进从源到库的转化更加流畅, 促使更多的源物质转化成库物质, 是一种可以提高盐碱地冬小麦产量的生态方法。

参考文献 References

[1] 冯伟, 刘忠宽, 刘振宇, 等. 河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 56–60
FENG W, LIU Z K, LIU Z Y, et al. Study on the distribution, causes and improvement technology of saline-alkali land in Hebei Province[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(1): 56–60

[2] 罗建美, 靳根会, 罗仲朋, 等. 河北平原中低产区小麦与玉米生产现状及增产潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1123–1134
LUO J M, JIN G H, LUO Z P, et al. Production state and yield potential of wheat and maize in low-medium yield farmlands in Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1123–1134

[3] 赵其国, 杨劲松, 周华. 保障我国“耕地红线”及“粮食安全”十字战略方针[J]. 土壤, 2011, 43(5): 681−687
ZHAO Q G, YANG J S, ZHOU H. “Ten Words” strategic policy for ensuring red line of farmland and food security in China[J]. Soils, 2011, 43(5): 681–687

[4] 王学, 李秀彬, 辛良杰. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 694–707
WANG X, LI X B, XIN L J. Impact of the shrinking winter wheat sowing area on agricultural water consumption in the Hebei Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 694–707

[5] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 70–76
QU C C, CHEN X M, HAN Z Q, et al. Effects of bioorganic fertilizer application on soil physical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in fluvoaquic soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 70–76

[6] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氨挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2017, 23(3): 567–577
ZHENG F X, DONG S T, LIU P, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3): 567–577

[7] 王善仙, 刘宛, 李培军, 等. 生物有机肥调控对盐碱胁迫下向日葵幼苗生长及生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 682–688
WANG S X, LIU W, LI P J, et al. Regulation effects of bio-organic fertilizer on sunflower seedlings growth and leaf physiological indices under salt-alkali stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 682–688

[8] 刘艳, 李波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2017, (2): 98–103
LIU Y, LI B, SUN W T, et al. Effects of bio-organic fertilizer on physiological characters and yield of maize in saline-alkali soil[J]. Crop, 2017, (2): 98–103

[9] 黄锦文, 唐莉娜, 曾文龙, 等. 不同土壤处理对烤烟根际土壤生物学特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(2): 75–83
HUANG J W, TANG L N, ZENG W L, et al. Effects of different soil treatments on biological characters of rhizosphere soil of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(2): 75–83

[10] 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 109–115
SONG R Q, CHU G X, YE J, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 109–115

[11] 摄晓燕, 魏孝荣, 魏艳春, 等. 砒砂岩改良风沙土对铵态氮吸附特性影响研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 165–173
SHE X Y, WEI X R, WEI Y C, et al. Effects of soft rock modified sandy soil on NH_4^+-N adsorption characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 165–173

[12] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 98–105
LIANG J C, SHI H B, LI R P, et al. Effect of mulching on salinized soil freezing and thawing characteristics and autumn irrigation quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 98–105

[13] 郑乾坤, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 颗粒组成变化对粘质盐土含盐量和小麦生长的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(11): 88–94
ZHENG Q K, MAO W B, SUN Y X, et al. Changes in particle composition affect salt content and wheat growth in clay saline soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(11): 88–94

[14] 蔺亚莉, 李跃进, 陈玉海, 等. 碱化盐土掺砂对土壤理化性状和玉米产量影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (1): 119–123
LIN Y L, LI Y J, CHEN Y H, et al. Effects adding sand on soil physical and chemical property and corn yield in alkalized solonchak soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (1): 119–123

[15] 刘克礼, 翟利剑, 高聚林, 等. 春小麦源库特性及其关系的研究(Ⅱ)——群体库源比及其与产量的关系[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 63–65
LIU K L, ZHAI L J, GAO J L, et al. Study on the characters of source and sink and their relation in spring wheat(Ⅱ) — Ratio of community source and sink and its relation with yield[J]. Journal of Triticeae Crops, 2003, 23(4): 63–65

[16] 王永宏, 王克如, 赵如浪, 等. 高产春玉米源库特征及其关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 257–269
WANG Y H, WANG K R, ZHAO R L, et al. Relationship between the source and sink of spring maize with high yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 257–269

[17] 薛吉全, 马国胜, 路海东, 等. 密度对不同类型玉米源库关系及产量的调控[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6): 1162–1168
XUE J Q, MA G S, LU H D, et al. The regulation and control of density on relationship of sink-source and yield of different maize[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(6): 1162–1168

[18] 郭文善, 封超年, 严六零, 等. 小麦开花后源库关系分析[J]. 作物学报, 1995, 21(3): 334–340
GUO W S, FENG C N, YAN L L, et al. Analysis on source-sink relationship after anthesis in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(3): 334–340

[19] 李丽, 杨德龙, 栗孟飞, 等. 不同水分条件下源库调节对小麦营养器官可溶性碳水化合物和籽粒千粒重的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1879–1888
LI L, YANG D L, LI M F, et al. Effects of source-sink regulation on water soluble carbohydrates of vegetative organs and thousand-grain mass of wheat under different water[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1879–1888

[20] 陈年来. 作物库源关系研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(1): 1–10
CHEN N L. Research advances on source-sink interaction of the crops[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(1): 1–10

[21] 郭伟, 李建伟, 邹春雷, 等. 外源碳、氮处理对春小麦花后干物质积累及籽粒产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (5): 17–22
GUO W, LI J W, ZOU C L, et al. Effect of spraying urea and sucrose on dry matter accumulation and grain yield at post-anthesis of spring wheat[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2017, (5): 17–22

[22] 许育彬, 沈玉芳, 李世清. CO_2浓度升高和施氮对冬小麦光合面积及粒叶比的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1049–1056
XU Y B, SHEN Y F, LI S Q. Effects of elevated CO_2 and nitrogen application on photosynthetic area and gain-leaf ratio of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(9): 1049–1056

[23] 刘孟雨. 小麦的库源关系对水分利用效率的影响[J]. 生态农业研究, 1997, 5(3): 33–36
LIU M Y. Effects of sink-source relation on water use efficiency on wheat[J]. Eco-Agriculture Research, 1997, 5(3):

33–36

[24] 孙亚辉, 李瑞奇, 党红凯, 等. 河北省超高产冬小麦群体和个体生育特性及产量结构特点[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(3): 1–8
SUN Y H, LI R Q, DANG H K, et al. Population and individual characteristics of growth and development and yield components of super-high-yielding winter wheat in Hebei Province[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2007, 30(3): 1–8

[25] 江东岭, 杜雄, 张宁, 等. 种植密度对夏玉米群体库源关系的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(3): 201–207
JIANG D L, DU X, ZHANG N, et al. Effects of plant density on sink-source relationship of summer maize (*Zea mays* L.)[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(3): 201–207

[26] 赵紫平, 邓西平, 刘立生, 等. 灌浆期干旱对不同倍性小麦光合和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 470–475
ZHAO Z P, DENG X P, LIU L S, et al. Effect of water deficit on photosynthetic capacity and yield of different ploidy wheat during grain filling stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 470–475

[27] 赵隽, 董树亭, 刘鹏, 等. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2362–2370
ZHAO J, DONG S T, LIU P, et al. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2362–2370

[28] ECHARTE L, ROTHSTEIN S, TOLLENAAR M. The response of leaf photosynthesis and dry matter accumulation to nitrogen supply in an older and a newer maize hybrid[J]. Crop Science, 2008, 48(2): 656–665

[29] 徐富贤, 熊红, 张林, 等. 南方稻区杂交中籼稻高产品种的库源结构及其优化调控规律研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1285–1299
XU F X, XIONG H, ZHANG L, et al. Research progresses and prospects of sink-source structures and optimal regulation of high-yield varieties of hybrid rice in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1285–1299

[30] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1585–1595
DAI M H, ZHAO J R, YANG G H, et al. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(8): 1585–1595

[31] 于经川, 刘兆晔, 牟春生, 等. 小麦单茎库源比值与产量关系的初步研究[J]. 华北农学报, 2002, 17(4): 26–29
YU J C, LIU Z Y, MOU C S, et al. Study on relationship between sink-source ratio per stem and yield of wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, 17(4): 26–29

[32] 朱新开, 郭文善, 何建华, 等. 淮南麦区超高产小麦产量形成特点及其生理特性分析[J]. 麦类作物, 1998, 18(6): 40–44
ZHU X K, GUO W S, HE J H, et al. Yield formation and physiological characteristics of Super-high yield wheat in Huainan wheat region[J]. Tritical Crops, 1998, 18(6): 40–44

[33] 陈红明, 孙长峰, 郑建华, 等. 小麦群体粒叶比对产量的影响[J]. 江苏农业科学, 1998, (1): 13–16
CHEN H M, SUN C F, ZHENG J H, et al. Effect of grain/leaf ratio on wheat population yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 1998, (1): 13–16

[34] 温樱, 王东. 底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1387–1393
WEN Y, WANG D. Basal fertilization in strips at different soil depths to increase dry matter accumulation and yield of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1387–1393

[35] 党红凯, 郑春莲, 马俊永, 等. 冬季抗旱措施对小麦耗水特征与生育性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1127–1135
DANG H K, ZHENG C L, MA J Y, et al. Effects of winter drought resistant strategies on wheat water consumption and growth characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1127–1134

[36] 孙本普, 孙士宗, 李凤云, 等. 气候条件对冬小麦穗数的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 60–64
SUN B P, SUN S Z, LI F Y, et al. Influence of climatic condition on the spike number per plant of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(4): 60–64

[37] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦灌浆期光合产物供应和转化及有关酶活性的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(11): 1113–1118
FANG Q X, CHEN Y H, LI Q Q, et al. Effects of irrigation on photosynthate supply and conversion and related enzymes activity during grain filling period[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(11): 1113–1118