

肥沙混施对盐碱地冬小麦耗水特性与生长的影响

李晓爽^{1,2} 党红凯³ 宋妮¹ 申孝军¹ 高阳¹ 孙景生¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

3. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 衡水 053000)

摘要: 为解析春限一水条件下盐碱地改良措施对小麦耗水和产量调控作用,于2015—2018年连续3个冬小麦生长季,设置耕层掺黄河泥沙(SS)、配施生物有机肥(FF)和掺黄河泥沙配施生物有机肥(SF)3个处理,以不作处理为对照(CK),研究不同处理下农田土壤水分变化和冬小麦干物质积累规律。结果表明:连续3年产量水平为3 317.77~5 449.52 kg/hm²,各处理间以SF处理的籽粒产量最高,该处理与CK相比,籽粒产量提高35%~51%;总耗水量变幅为352.85~394.89 mm,不同处理间总耗水量均以CK最低,以SF处理最高(361.81~394.89 mm);农田水分利用效率变幅为9.01~13.96 kg/(hm²·mm),以SF处理最高(12.02~13.96 kg/(hm²·mm)),比CK高33%~48%,其次为FF处理和SS处理,分别比CK高9%~32%、9%~18%。SS或FF处理可增加冬小麦拔节前0~200 cm土层贮水量,增大拔节至成熟阶段的耗水量及其占总耗水量的比例,促进冬小麦对土壤贮水和深层土壤水分的利用,最终提高冬小麦的生物量和籽粒产量。冬小麦籽粒产量与干物质积累量、总穗粒数呈显著正相关;水分利用效率与冬小麦耗水量、产量呈二次曲线关系。在本研究条件下,随着籽粒产量提高,水分利用效率快速增加;而随耗水量增加,各处理间水分利用效率增减表现不同。综合考虑产量、收获指数和水分利用效率,确定掺黄河泥沙配施生物有机肥处理(SF)是本研究条件下的最佳处理。

关键词: 冬小麦; 干物质积累; 耗水特性; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S274.3; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)05-0272-13

OSID:



Effects of Biological Organic Fertilizer and Yellow River Sediment Mixture on Water Consumption and Growth of Winter Wheat in Saline – Alkali Land

LI Xiaoshuang^{1,2} DANG Hongkai³ SONG Ni¹ SHEN Xiaojun¹ GAO Yang¹ SUN Jingsheng¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3. Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China)

Abstract: Aiming to analyze the effects of saline – alkali land improvement measures on water consumption and yield control of wheat under the condition of spring water limitation, and provide theoretical basis for promoting the increase of winter wheat yield and the improvement of water use efficiency in saline – alkali wheat areas. The positioning monitoring test was adopted in the three consecutive wheat growing seasons from 2015 to 2018. Four processing was set, respectively was with biological organic fertilizer (FF), mixed with Yellow River sediment (SS) and the biological organic fertilizer and Yellow River sediment mixed (SF), and CK treatment as control. The results showed that the annual yield was 3 317.77 ~ 5 449.52 kg/hm² for three consecutive years, and SF treatment with Yellow River sediment and biological organic fertilizer had the highest grain yield. Compared with the control treatment, SF treatment increased the grain yield by 35% ~ 51%. The variation amplitude of total water consumption was 352.85 ~ 394.89 mm, and the total water consumption between different treatments was the lowest in CK (352.85 ~ 386.17 mm). The water use efficiency of each treatment was 9.01 ~ 13.96 kg/(hm²·mm). SF (12.02 ~ 13.96 kg/(hm²·mm)) had the highest water use

收稿日期: 2019-11-05 修回日期: 2020-02-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117)、国家自然科学基金项目(51790534)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300505-3)

作者简介: 李晓爽(1980—),女,博士生,主要从事作物高用水理论与技术研究,E-mail: lxsh1980@126.com

通信作者: 孙景生(1963—),男,研究员,博士,主要从事作物高用水理论与技术研究,E-mail: jshsun623@163.com

efficiency, which was higher than that of CK by 33% ~ 48%, followed by FF (organic fertilizer) and SS (Yellow River sediment), which were respectively higher than that of control by 9% ~ 32% and 9% ~ 18%. Mixing Yellow River sediment (SS) or biological organic fertilizer mixing (FF) treatment can increase water storage in soil layer 0 ~ 200 cm before jointing, increase water consumption from jointing to maturity stage and its proportion in total water consumption, promote the utilization of water storage in soil and deep soil water of winter wheat, and finally improve biomass and grain yield of winter wheat. The grain yield of winter wheat was positively correlated with dry matter accumulation and grain number per panicle. *WUE* had a conic relation with water consumption and yield of winter wheat. With the increase of grain yield, *WUE* was increased rapidly. Under this research conditions, with the increase of water consumption, trend of *WUE* was different among different treatments. Taking yield, harvest index and water use efficiency into consideration, mixing Yellow River sediment and applying biological organic fertilizer (SF) was the best treatment under the conditions of this study.

Key words: winter wheat; dry matter accumulation; water consumption characteristics; yield; water use efficiency

0 引言

我国盐碱地分布广泛, 占总耕地面积的 26% 以上, 其中具有农业生产潜力的约 $1.33 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占我国总耕地面积的 10%^[1], 仅环渤海低平原地区就有 $2.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 中低产盐碱田和 $6.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 盐碱荒地^[2], 制约着我国农业的发展和作物产量的提高。我国人均耕地资源十分紧张, 改良中低产田盐碱地、改造盐碱荒地变良田, 对保障粮食安全具有重要意义。黑龙江环渤海低平原区常年降水量为 450 ~ 600 mm, 且降水主要集中在夏季, 冬小麦生长季降水不足 120 mm, 而 6 000 kg/hm² 以上的麦田, 其蒸散量在 400 mm 以上^[3]。该地区自然降水先天不足, 又无地表径流, 为稳定小麦产量, 农田水分亏缺额主要依赖地下水超采, 长期以来形成了世界上最大的地下水漏斗群, 造成一系列生态问题。近年更有春季降水呈现下降趋势^[4], 增加了冬小麦干旱的风险^[5]。针对作物需水规律和地力水平, 通过改良盐碱麦区农田土壤质量, 提高土壤水的利用效率, 是实现该区冬小麦可持续生产亟需解决的技术难题。利用客土改良土壤质量、改善作物生长环境是提高作物产量的有效途径。土壤表层掺沙是改良农田水盐障碍的有效方法^[6], 在一定范围内随着土壤掺沙比例的增加, 黏粒含量减小, 提高了土体中大孔隙数量^[7], 土壤入渗能力增加^[8], 吸湿系数下降^[9], 土壤蒸发能力减弱, 土壤含水率提高, 土壤饱和导水率不断上升^[10]; 掺沙改土可以调节细质地土壤的质地和孔隙结构^[6], 降低土壤电导率和 pH 值^[11], 从而提高农作物产量^[12]。在国外也有相关报道^[13]。然而, 客土来源限制该技术的推广。由于黄河冲刷在下游地区产生大量淤泥, 清淤耗费的成本巨大, 泥沙占用良田, 遇风天形成沙尘暴, 严重影响下游的生态环境。黄河泥沙也是重要的土壤资源, 将其作为客土

用于盐碱地改良, 有利于解决生态环境等问题, 同时解决了客土改良技术中关键的限制因子——客土来源问题。

施用由畜禽粪便和秸秆经过处理并加入微生物制成的生物菌肥, 不仅可以降低畜禽粪便污染, 减少农田无机肥料使用量, 还可以间接减轻由于无机肥料施用量过量造成的面源污染。近年来, 有研究报道生物有机肥配施无机肥可有效改善土壤结构和水力学特性^[14], 增加土壤蓄水供水能力^[15], 提高土壤大团聚体含量、稳定性和微生物量碳含量^[16], 并且能显著降低氨挥发损失, 提高氮肥利用率, 实现作物高产与肥料高效的协同^[17]。另外, 生物有机肥还可以明显减轻盐碱胁迫对种子出苗、幼苗生长及生理指标的抑制作用^[18], 提高冬小麦叶绿素含量、干物质积累量、水分利用效率和产量^[19], 改善籽粒品质。已有研究表明, 耕层掺黄河泥沙、同时配施生物有机肥综合了二者的优点, 提高了小麦光合性能, 促进源库转化^[20]。然而, 从生态环境与栽培措施的角度, 促进作物生长、提高作物产量的工作机制尚不明确。特别是针对盐碱地特点, 通过配施有机肥和黄河泥沙改良土壤, 研究冬小麦耗水与产量形成特点更是少有报道。

本研究在河北省沧州市盐碱麦区采取增施有机肥、掺沙及掺沙配施有机肥等土壤改良措施, 监测不同处理条件下冬小麦耗水特性和产量特征, 探讨土壤改良措施对盐碱地冬小麦耗水与产量形成的影响机制, 探寻盐碱麦区中低产田的产量与水分利用效率提高的限制因子, 为中低产区盐碱地麦田改良及水肥高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验于 2015—2018 年小麦生长季在河北

省沧州市南皮县(116°77'E, 38°6'N, 海拔9.5 m)进行, 试验田土壤母质为黄河和海河的冲积物, 土壤类型为盐化潮土(表1)。该区气候属于暖温带半湿润大陆季风气候区, 年均气温 12.3℃, 年平均降水量 550 mm(数据由 1956—2015 年连续 60 年的南皮县气象资料统计所得), 年平均蒸发量 1 865 mm, 无霜期 180 d。冬小麦播种前(前茬为夏玉米)0~20 cm 耕作层土壤地力为: 土壤含盐量 1.2~2.8 g/kg(属于轻中度盐碱土壤)、有机质质

量比 1.19~1.30 g/kg、全氮质量比 0.079~0.086 g/kg、速效氮质量比 49~53 mg/kg、速效磷质量比 6.2~6.9 mg/kg、速效钾 125~130 mg/kg。2015—2018 年试验区地下水埋深 3.89~6.71 m, 降水量及分布情况见表 2。试验所用黄河泥沙来自山东省滨州市小开河水文站沉淀池, 粒径 0.05~0.1 mm 的泥沙颗粒占 84.52%、0.1~0.25 mm 的泥沙颗粒占 10.67%、0~0.002 mm 的颗粒占 1.76%。

表 1 试验地土壤性质

Tab. 1 Soil characteristics of experimental site

项目	土层深度/cm					
	0~20	20~60	60~110	110~135	135~170	170~200
土壤类型	轻壤	中壤	粉质粘土	砂壤土	砂质粘土	中壤
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.40	1.46	1.49	1.52	1.58	1.56
田间持水率/%	34.2	34.4	37.8	35.6	38.3	37.9
萎蔫含水率/%	9.9	11.6	13.9	12.8	14.2	15.4

表 2 2015—2018 年和长期冬小麦生长季降水量分布

Tab. 2 Monthly precipitation for growing seasons of 2015—2018 of winter wheat and long-term average mm

年份	10 月	11 月	12 月	翌年 1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月 1—13 日	总计
2015—2016	25.8	55.5	0.3	2.4	27.7	0	11.9	27.0	11.0	161.6
2016—2017	72.6	22.4	18.2	0	7.8	18.8	5.2	30.8	14.4	190.2
2017—2018	80.4	0	0.2	1.8	0	2.6	43.2	35.7	30.7	194.6
1967—2015 平均	28.8	11.8	4.2	3.3	7.1	9.4	22.3	34.7	18.1	

1.2 试验设计

试验设置配施生物有机肥、掺黄河泥沙(简称掺沙)、配施生物有机肥+掺黄河泥沙(简称掺沙配肥)和常规耕作栽培管理(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。其中 FF 整地前底施生物有机肥 3 600 kg/hm²(含有机质质量分数大于等于 45%, 氮磷钾质量分数大于等于 6%); 根据试验区土壤物化性状结合前人研究结论把 SS 处理铺沙厚度定为 7 cm^[21-23], 人工均匀摊铺 7 cm 后旋耕掺混(仅在 2015 年小麦播种前掺沙一次); SF 处理首先在小区土层上面人工摊铺厚度为 7 cm 的黄河泥沙, 然后撒施生物有机肥 3 600 kg/hm², 最后对 30 cm 土层旋耕掺混。其余年份施肥后旋耕一次, 旋耕深度 12~15 cm。所有处理整地前底施磷酸二铵(含 N 质量分数 18%, P₂O₅ 质量分数 46%) 300 kg/hm²、氯化钾(含 K₂O 质量分数 60%) 150 kg/hm²、尿素(N 质量分数大于等于 46.2%) 210 kg/hm², 翌年拔节期灌水时追施尿素 300 kg/hm²。冬小麦品种选用小偃 60, 足墒播种, 行距采用 15 cm 等行距。田间管理和春灌一水时间及定额见表 3。

表 3 2015—2018 年田间管理情况

Tab. 3 Seeding and harvesting dates and irrigation management in wheat growing seasons

年份	播种时间	收获时间	灌溉次数	灌溉时间	灌溉定额/mm
2015—2016	10 月 19 日	6 月 10 日	1	4 月 3 日	75
2016—2017	10 月 14 日	6 月 13 日	1	4 月 5 日	75
2017—2018	11 月 8 日	6 月 12 日	1	3 月 28 日	75

1.3 指标测定与计算方法

1.3.1 冬小麦物质生产转化

冬小麦干物质积累量、产量、收获指数、开花后源生产能力转化率、茎鞘物质输出率和单位面积穗粒数的计算方法见文献[20]。

1.3.2 土壤含水率、土壤贮水量和农田耗水量

在冬小麦各主要生育时期采用干燥法测定 0~200 cm 土层的土壤含水率, 0~60 cm 每 10 cm 土层为一层、60~200 cm 每 20 cm 土层为一层共计 13 个土层, 分别取土样, 各处理取样位置均位于种植行间, 土壤贮水消耗量计算公式为^[21]

$$W = 10hp\rho \quad (1)$$

式中 h ——土层深度, cm

ρ ——土壤容重, g/cm³, 各土层容重见表 1

ω ——土壤质量含水率, %

农田耗水量采用水量平衡方法计算^[21], 计算公式为

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^{13} \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P + K \quad (2)$$

式中 ET_{1-2} ——阶段耗水量, mm

γ_i ——第 i 层土壤干容重, g/cm^3

H_i ——第 i 层土壤厚度, cm

θ_{i1} ——第 i 层土壤时段初的含水率, 以占干土质量的百分数计

θ_{i2} ——第 i 层土壤时段末的含水率, 以占干土质量的百分数计

M ——时段内的灌水量, mm

P ——时段内有效降水量, mm

K ——时段内的地下水补给量, mm

当地下水埋深大于 2.5 m 时, K 可忽略不计, 本试验的地下水埋深在 3.8 m 以下, 故地下水补给量可视为 0。

日耗水量等于各生育阶段麦田耗水量除以生育阶段天数; 耗水模系数等于各生育阶段麦田耗水量除以麦田总耗水量。

1.3.3 水分利用效率和灌溉效益

水分利用效率和灌溉水利用效率的计算公式为^[21]

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

$$IWUE = Y/I \quad (4)$$

式中 WUE ——水分利用效率, $kg/(hm^2 \cdot mm)$

Y ——籽粒产量, kg/hm^2

ET ——小麦生育期间实际耗水量, 为各阶段耗水量之和, mm

$IWUE$ ——灌溉水利用效率, $kg/(hm^2 \cdot mm)$

I ——实际灌水量, mm

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 19 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD 法, $\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对盐碱地冬小麦耗水特性的影响

2.1.1 不同处理对 0 ~ 200 cm 各土层土壤贮水消耗量的影响

图 1 是不同处理小麦全生育期 0 ~ 200 cm 土层剖面土壤贮水消耗量的分布图。由图 1 可看出, 同一年份不同处理各土层土壤贮水消耗量不同, 60 ~ 100 cm 较高, 0 ~ 60 cm 与 120 ~ 200 cm 较低。同一处理间比较, 各土层土壤贮水消耗量以 CK 处理最低, 以 60 ~ 120 cm 土层尤为明显, 其次为 160 ~ 200 cm。说明改良处理提高了根系活性, 促进了对深层土壤水分的吸收利用。受降雨年型等因素影响, 同年份处理间比较, 土壤贮水消耗量差异程度不同。2015—2016 年差异较大, 2017—2018 年差异较小。各年份同一处理均值比较, CK 处理最小, 平均贮水消耗量 147.41 mm; SF 处理最高, 平均贮水消耗量 157.23 mm; SS 处理和 FF 处理相当。

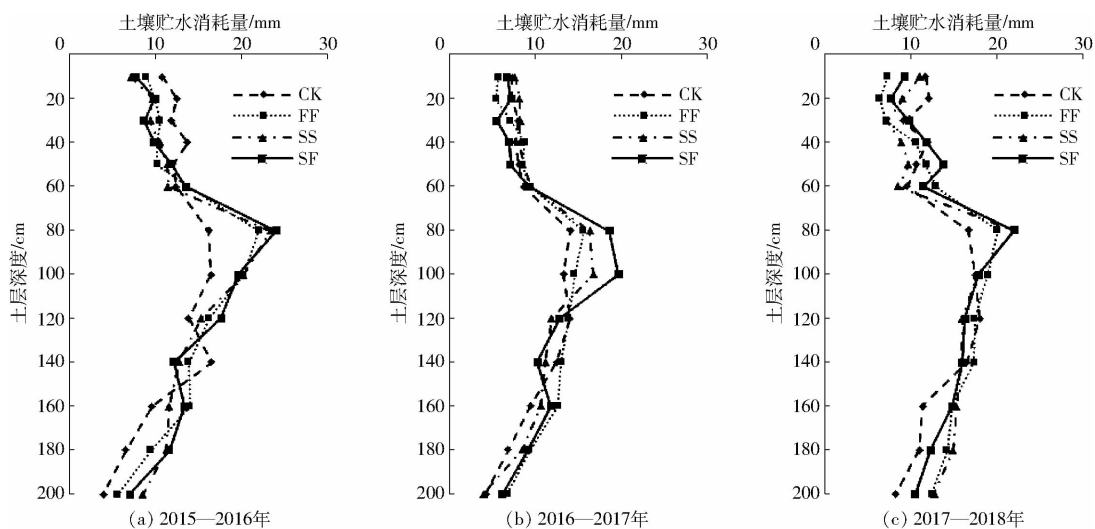


图 1 不同处理对不同土层土壤贮水消耗量的影响

Fig. 1 Effects of different treatment on soil water consumption amount at different soil layers

2.1.2 不同处理对麦田耗水量的影响

由表 4 (表中 RIW 为灌水量占总耗水量的比例, %; RPW 为降水量占总耗水量的比例, %; RSW 为土壤贮水消耗量占总耗水量的比例, %) 可以看

出, 不同年份处理间比较, 总耗水量变幅为 352.85 ~ 394.89 mm, 不同处理间总耗水量均以 CK 最低 (352.85 ~ 386.17 mm)。各处理年间比较, 总耗水量以 2015—2016 年最高, 变幅为 386.17 ~

394.89 mm; 2017—2018年最低, 变幅为 352.85 ~ 361.89 mm。不同年份处理间总耗水量由大到小依次为 SF、FF、SS、CK。从农田耗水组成来看, 所有处理耗水主要来源于降水和土壤贮水。不同处理灌水量和降水量占总耗水量的比例均以 CK 最高; 土壤贮水消耗量及其占总耗水量的比例均以 SF 处理最高, CK 处理最低。灌水量和降水量占总耗水量的比例均以 CK 处理最大, SF 处理最小; 土壤贮水消耗量占蒸散量的比例均以 SF 处理最大, CK 处理最

小。以上结果表明, 相同的灌水量和降水量条件下, 掺沙或配肥增加了作物对土壤贮水的利用; 其中, SS、FF、SF 处理的贮水消耗量占农田蒸散量比例相比 CK 处理分别提高了 2.18% ~ 4.40%、1.38% ~ 5.05% 和 2.89% ~ 5.24%。表明通过掺沙或配肥处理可以调控土壤贮水消耗量, 降低冬小麦生育后期的土壤含水率, 从而腾出更大的库容容纳更多的水分, 有利于提高土壤贮水利用比例, 充分利用降水, 节约灌溉水。

表 4 耗水量的水分来源及其占总耗水量的比例

Tab. 4 Sources of water consumption and their percentage of total water consumption amount under different treatments

年份	处理	耗水来源			总耗水量/ mm	RIW/%	RPW/%	RSW/%
		灌溉定额/mm	土壤贮水消耗量/mm	降水量/mm				
2015—2016	CK	75	155.97 ^b	155.2	386.17 ^b	19.42 ^a	40.19 ^a	40.39 ^a
	FF	75	164.55 ^a	155.2	394.75 ^{ab}	19.00 ^a	39.32 ^a	41.68 ^a
	SS	75	162.29 ^{ab}	155.2	392.49 ^a	19.11 ^a	39.54 ^a	41.35 ^a
	SF	75	164.69 ^a	155.2	394.89 ^b	18.99 ^a	39.30 ^a	41.71 ^a
2016—2017	CK	75	122.61 ^b	184.8	382.41 ^a	19.61 ^a	48.32 ^a	32.06 ^a
	FF	75	131.97 ^a	184.8	390.47 ^a	19.21 ^a	47.33 ^a	33.47 ^a
	SS	75	130.69 ^a	184.8	391.76 ^a	19.14 ^a	47.17 ^a	33.68 ^a
	SF	75	132.29 ^a	184.8	392.09 ^a	19.13 ^a	47.13 ^a	33.74 ^a
2017—2018	CK	75	163.65 ^a	114.2	352.85 ^a	21.26 ^a	32.37 ^a	46.38 ^a
	FF	75	170.40 ^a	114.2	359.60 ^a	20.86 ^a	31.76 ^a	47.39 ^a
	SS	75	167.93 ^a	114.2	357.13 ^a	21.00 ^a	31.98 ^a	47.02 ^a
	SF	75	172.69 ^a	114.2	361.89 ^a	20.72 ^a	31.56 ^a	47.72 ^a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.1.3 不同处理对不同生育阶段麦田耗水量、耗水模系数及日耗水量的影响

由表 5 (表中 CA 为耗水量, CP 为耗水模系数, CD 为日耗水量) 可以看出, 所有处理的耗水量、耗水模系数随冬小麦生育进程增加而增加, 由大到小依次为开花-成熟期、拔节-开花期、返青-拔节期、冬

前-返青期、播种-冬前期, 说明冬小麦耗水主要集中在拔节-成熟阶段, 耗水量占冬小麦全生育期耗水量的 70% 以上。播种-拔节期的耗水量、日耗水量和耗水模系数以 CK 最大, 其次为 FF 处理, 说明掺沙处理可以抑制该阶段土壤蒸发, 以保证后期生长阶段的水分供应。拔节-成熟期的耗水量、日耗水量和

表 5 不同处理对各生育阶段麦田耗水量、耗水模系数和日耗水量的影响

Tab. 5 Effects of different treatments on water consumption amount, water consumption percentage and diurnal water consumption amount at different growth stages in wheat field

年份	处理	播种-冬前期			冬前-返青期			返青-拔节期			拔节-开花期			开花-成熟期		
		CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm
2015—2016	CK	14.662 ^a	3.797 ^a	0.341 ^a	21.666 ^a	5.611 ^a	0.217 ^a	66.756 ^a	17.287 ^a	2.384 ^a	120.870 ^a	31.300 ^a	4.029 ^a	162.213 ^b	42.006 ^a	4.384 ^a
	FF	12.716 ^{ab}	3.221 ^a	0.296 ^{ab}	16.757 ^b	4.245 ^b	0.168 ^b	61.518 ^{ab}	15.584 ^{ab}	2.197 ^a	126.524 ^a	32.052 ^a	4.217 ^a	177.231 ^a	44.897 ^a	4.790 ^a
	SS	12.584 ^{ab}	3.206 ^{ab}	0.293 ^{ab}	19.053 ^a	4.854 ^{ab}	0.191 ^{ab}	56.094 ^b	14.292 ^b	2.003 ^a	124.190 ^a	31.642 ^a	4.140 ^a	180.566 ^a	46.006 ^a	4.880 ^a
	SF	10.926 ^b	2.767 ^b	0.254 ^b	18.023 ^{ab}	4.564 ^{ab}	0.180 ^{ab}	62.164 ^{ab}	15.742 ^{ab}	2.220 ^a	127.795 ^a	32.362 ^a	4.260 ^a	175.986 ^a	44.565 ^a	4.756 ^a
2016—2017	CK	16.664 ^a	4.358 ^a	0.347 ^a	20.435 ^a	5.344 ^a	0.204 ^a	63.660 ^a	16.647 ^a	2.274 ^a	118.212 ^a	30.912 ^a	3.940 ^a	163.439 ^a	42.739 ^a	4.417 ^a
	FF	13.612 ^b	3.486 ^b	0.284 ^b	17.880 ^b	4.579 ^b	0.179 ^{ab}	57.592 ^a	14.749 ^a	2.057 ^a	126.930 ^a	32.507 ^a	4.231 ^a	175.760 ^a	45.012 ^a	4.750 ^a
	SS	13.125 ^b	3.350 ^b	0.273 ^b	17.192 ^b	4.388 ^b	0.172 ^b	58.022 ^a	14.811 ^b	2.072 ^a	123.820 ^a	31.606 ^a	4.127 ^a	178.336 ^a	45.522 ^a	4.820 ^a
	SF	12.905 ^b	3.291 ^b	0.269 ^b	19.846 ^a	5.062 ^a	0.198 ^a	60.175 ^a	15.347 ^b	2.149 ^a	127.706 ^a	32.570 ^a	4.257 ^a	171.460 ^{ab}	43.730 ^a	4.634 ^a
2017—2018	CK	7.591 ^a	2.151 ^a	0.253 ^a	21.428 ^a	6.073 ^a	0.214 ^a	59.814 ^a	14.131 ^a	2.136 ^b	117.358 ^b	27.700 ^a	3.912 ^a	146.659 ^a	41.564 ^a	3.964 ^a
	FF	6.551 ^a	1.822 ^a	0.218 ^a	19.246 ^a	5.352 ^{ab}	0.192 ^a	51.351 ^b	13.141 ^a	1.834 ^a	125.225 ^a	27.317 ^a	4.174 ^a	157.226 ^a	43.723 ^a	4.249 ^a
	SS	6.454 ^a	1.807 ^a	0.215 ^a	17.507 ^b	4.902 ^b	0.175 ^a	49.292 ^b	12.939 ^a	1.760 ^a	124.464 ^a	29.363 ^a	4.149 ^a	159.411 ^a	44.637 ^a	4.308 ^a
	SF	6.636 ^a	1.834 ^a	0.221 ^a	18.452 ^b	5.099 ^b	0.185 ^a	55.410 ^a	13.664 ^a	1.979 ^a	126.752 ^a	24.661 ^b	4.225 ^a	154.639 ^a	42.731 ^a	4.179 ^a

耗水模系数由大到小依次为 SF、FF、SS、CK, 说明在该阶段掺沙或配肥处理的土壤水分消耗增大, 增大的原因是掺沙或配肥提高了作物群体结构^[20], 作物需水量增加。掺沙或配肥处理减少了冬小麦冬前-拔节期的水分消耗, 促进了拔节-成熟期的水分消耗。由表 4、5 可以看出, 总耗水量较高的处理在拔节-成熟期的耗水量、耗水模系数和日耗水量也较高。提高拔节-成熟期的耗水量、耗水模系数和日耗水量, 有利于籽粒产量的提高。

2.2 不同处理对冬小麦干物质积累及产量的影响

由表 6 可知, 2015—2018 年各处理冬小麦干物质积累量从开花期到成熟期逐渐增加, 并在成熟期达到最大值。处理间比较, SF 处理在开花期和成熟期的干物质积累量均为最大, 且产量最高。本研究

条件下, 产量和成熟期干物质积累量之间呈线性关系(图 2), CK 处理干物质积累量最小, 产量也最低(图 2 最低的点); 和 CK 处理相比, SF 处理在开花期、成熟期干物质积累量及籽粒产量分别比 CK 处理增加 39%、32% 和 35%。随着生物量和产量同时增加, SF 处理的收获指数较高, 花后干物质转化率最高; CK 处理的花后物质转化率最小, 收获指数也最小。和 CK 处理相比, SF 处理的收获指数和开花后干物质转化率分别比 CK 处理增加 2 个百分点和 6 个百分点。可见, 冬小麦的籽粒产量不仅受其营养生长时期的生物量积累影响, 还与花后干物质转化率线性相关(图 3)。由于本地区 5 月底到 6 月初易遭遇干热风, 进而缩短灌浆期, 因此如何提高该阶段营养物质向籽粒中转化对产量形成尤为重要。

表 6 2015—2018 年各处理对冬小麦干物质积累、转化及产量构成的影响

Tab. 6 Effects of dry matter accumulation, transformation and yield composition of winter wheat treated during 2015—2018

年份	处理	开花期地上部	成熟期地上部	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	收获指数	茎鞘物质 输出率/%	穗数/ (万穗·hm ⁻²)	总穗粒数/ (粒·m ⁻²)	千粒质量/ g
		干物质积累量/ (kg·hm ⁻²)	干物质积累 量/(kg·hm ⁻²)						
2015—2016	CK	(4 624.41 ± 137.53) ^c	(9 699.84 ± 687.63) ^c	(3 988.23 ± 83.93) ^c	(0.41 ± 0.01) ^a	(78.58 ± 1.23) ^c	(375.3 ± 33.8) ^b	(8 819.6 ± 52.6) ^b	(45.19 ± 0.32) ^b
		(5 808.91 ± 131.63) ^b	(12 296.26 ± 583.21) ^b	(5 127.61 ± 115.42) ^{ab}	(0.42 ± 0.02) ^a	(79.04 ± 0.97) ^b	(435.1 ± 42.7) ^a	(11 182.1 ± 41.4) ^a	(45.57 ± 0.23) ^b
	SS	(4 986.42 ± 120.52) ^b	(10 312.65 ± 464.24) ^b	(4 456.92 ± 96.70) ^b	(0.43 ± 0.02) ^a	(83.68 ± 1.26) ^a	(390.3 ± 36.2) ^b	(9 503.8 ± 58.6) ^{ab}	(47.34 ± 0.41) ^a
		SF	(6 455.30 ± 100.24) ^a	(12 816.33 ± 300.46) ^a	(5 449.52 ± 102.72) ^a	(0.43 ± 0.03) ^a	(85.67 ± 0.89) ^{ab}	(465.2 ± 40.5) ^a	(11 778.9 ± 27.9) ^a
	2016—2017	CK	(4 307.98 ± 233.13) ^c	(8 967.39 ± 482.32) ^b	(3 535.24 ± 69.21) ^c	(0.42 ± 0.01) ^a	(79.89 ± 1.54) ^b	(352.7 ± 32.7) ^b	(8 145.6 ± 38.3) ^b
(5 497.67 ± 161.72) ^b			(11 452.05 ± 464.25) ^{ab}	(4 796.31 ± 33.82) ^{ab}	(0.42 ± 0.02) ^a	(80.55 ± 0.79) ^a	(402.1 ± 30.5) ^a	(10 253.7 ± 38.7) ^a	(44.71 ± 0.33) ^b
SS		(4 772.78 ± 200.40) ^b	(9 772.90 ± 531.21) ^b	(4 274.13 ± 67.54) ^b	(0.44 ± 0.03) ^a	(85.48 ± 0.83) ^a	(384.7 ± 66.7) ^b	(9 272.3 ± 90.7) ^{ab}	(46.62 ± 0.62) ^a
		SF	(6 141.52 ± 171.81) ^a	(12 289.64 ± 601.23) ^b	(5 354.42 ± 97.23) ^a	(0.44 ± 0.02) ^a	(87.09 ± 0.64) ^a	(432.9 ± 20.5) ^a	(10 953.6 ± 28.2) ^a
2017—2018		CK	(3 761.44 ± 255.12) ^c	(7 910.08 ± 510.62) ^c	(3 317.77 ± 72.61) ^c	(0.42 ± 0.01) ^a	(79.97 ± 1.29) ^b	(331.1 ± 36.3) ^b	(8 087.8 ± 51.5) ^b
	(4 324.06 ± 197.20) ^b		(8 949.29 ± 397.24) ^b	(3 704.65 ± 65.66) ^{ab}	(0.41 ± 0.03) ^a	(80.10 ± 0.84) ^a	(403.9 ± 36.2) ^b	(8 951.7 ± 40.3) ^{ab}	(41.4 ± 0.27) ^b
	SS	(4 376.52 ± 183.34) ^b	(9 071.68 ± 395.71) ^{ab}	(3 922.81 ± 63.54) ^b	(0.43 ± 0.02) ^a	(83.55 ± 1.11) ^a	(372.8 ± 38.4) ^b	(8 569.9 ± 56.6) ^{ab}	(45.8 ± 0.30) ^a
		SF	(5 243.57 ± 192.23) ^a	(10 519.83 ± 488.98) ^a	(4 483.25 ± 96.82) ^a	(0.43 ± 0.03) ^a	(84.97 ± 0.82) ^a	(429.4 ± 33.5) ^a	(9 880.4 ± 38.2) ^a

对冬小麦产量构成因素的分析表明, 籽粒产量随单位面积穗粒数的增加而线性增加(图 4), 但与千粒质量之间的关系表现不显著。SF 处理的单位面积穗粒数最大, 其次是 FF 处理, 以 CK 处理的最小。和 CK 处理相比, 3 个小麦生长季 SF 处理的单位面积穗粒数增加 22% 以上, 籽粒产量以 SF 处理

最高, 比 CK 处理提高 35% ~ 51%。可见, 单位面积穗粒数高, 则产量高, 提高单位面积穗粒数是提高产量的关键。

2.3 不同处理对物质生产与水分利用效率的影响

2.3.1 耗水量与干物质积累和籽粒产量的关系

图 5 是冬小麦不同生育阶段耗水量与干物质积

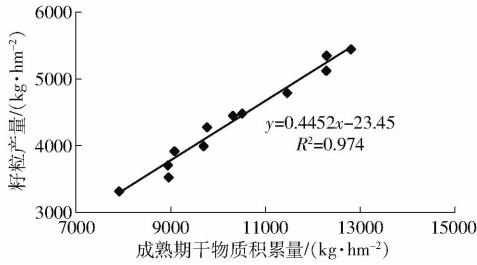


图2 2015—2018年冬小麦籽粒产量与干物质积累量的关系

Fig. 2 Relationship between grain yield and dry matter accumulation in winter wheat from 2015 to 2018

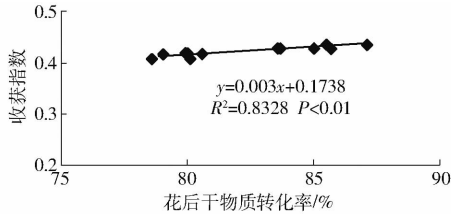


图3 2015—2018年冬小麦收获指数与花后干物质转化率的关系

Fig. 3 Relationship of conversion rate of post-anthesis source productivity with harvest index of winter wheat under different treatments during 2015—2018

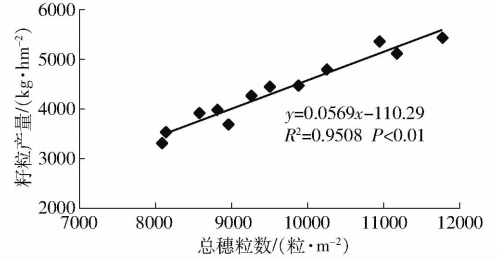


图4 2015—2018年冬小麦籽粒产量与总穗粒数的关系
Fig. 4 Relationship of kernel numbers per area with grain production under different treatments for winter wheat during 2015—2018

累量的关系。由图5可以看出,各生育阶段冬小麦干物质积累量与耗水量存在不同开口方向和相关水平的二次曲线关系。本试验水平下,播种-拔节期与扬花-灌浆期耗水量与干物质积累量为开口向下的二次曲线关系,干物质数据分布在对称轴附近及左侧(播种-拔节期对称轴 $X = 177.7$ mm,扬花-灌浆期对称轴 $X = 189.5$ mm),表明这两个阶段随着耗水量的增加,干物质积累量增加速率有减缓甚至降低的趋势,且减缓趋势受外界干扰较大(相关系数较

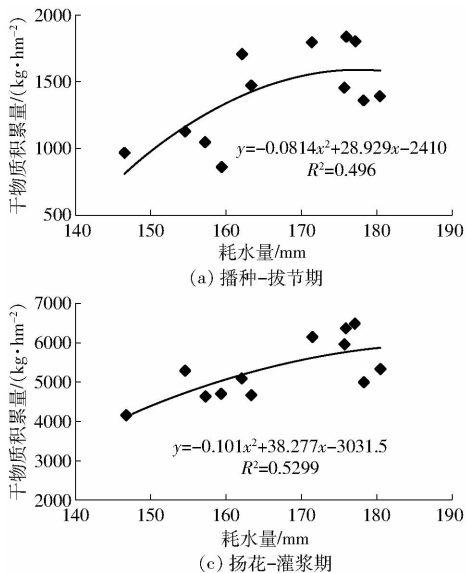
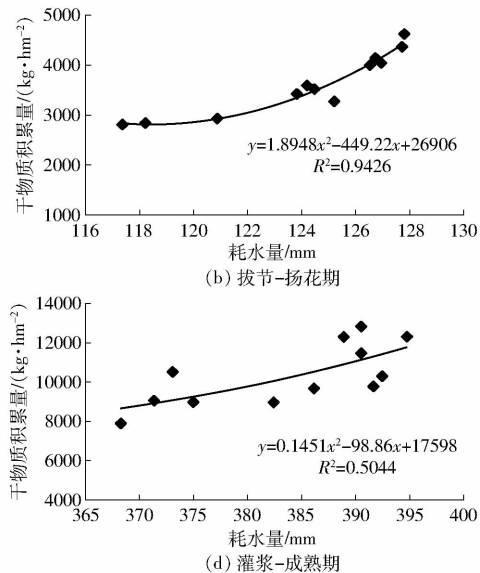


图5 2015—2018年冬小麦不同生育阶段耗水量与干物质积累量的关系

Fig. 5 Relationships of aerial dry matter before jointing, maturity and post heading accumulation with their corresponding ET for different treatments during 2015—2018

小);本结果与这两个阶段干物质积累速率较慢的生长特点有关。拔节-扬花期和灌浆-成熟期,阶段耗水量与干物质积累量为开口向上的二次曲线关系,干物质数据分布在对称轴附近及右侧(拔节-扬花期对称轴 $X = 118.8$ mm,灌浆-成熟期对称轴 $X = 341.0$ mm),表明这两个阶段,随着耗水量的增加干物质快速增加,且增加趋势受外界干扰较小(各时期相关系数以拔节-扬花期最高);本结果与小麦拔节-扬花期为干物质快速积累期,灌浆-成熟期为粒质量快速增长期的发育规律一致。

图6为总耗水量与籽粒产量的关系。由图6可见,小麦全生育期总耗水量与籽粒产量为开口向上的二次曲线关系,且产量数据均在对称轴的左侧(对称轴 $X = 363.2$ mm),说明在本研究总耗水量 $352.85 \sim 394.89$ mm条件下,随着耗水量的增加,产量会快速增加,而该增加趋势受外界干扰因素较大(相关系数较小)。结合表5、6,冬小麦拔节-扬花期满足冬小麦对水分的需求量,有利于干物质积累量的提高,进而提高籽粒产量。



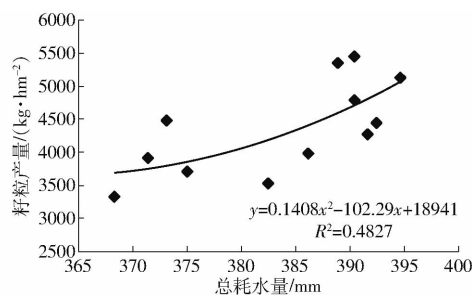


图 6 冬小麦全生育期总耗水量与籽粒产量的关系
Fig. 6 Relationship of grain yield with seasonal total water consumption under different treatments from 2015 to 2018

2.3.2 不同处理对冬小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

由表 7 可看出,各处理农田水分利用效率变幅为 9.01 ~ 13.96 kg/(hm²·mm),各处理水分利用效率年际间表现不同,2015—2016 年和 2016—2017 年由大到小依次为 SF、FF、SS、CK,2017—2018 年由大到小依次为 SF、SS、FF、CK,说明降水年型对 FF 和 SS 处理有影响,而 SF 处理对降水年型反应不灵敏,效果稳定。水分利用效率均以 SF 处理最高,FF 处理和 SS 处理相当,分别高于对照 33% ~ 48%、9% ~ 32%、9% ~ 18%。灌溉水分利用效率表现规律与水分利用率表现规律一致。表明在本试验条件下,掺黄河泥沙或配施生物有机肥处理是高产节水

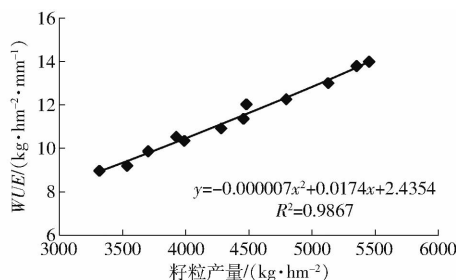
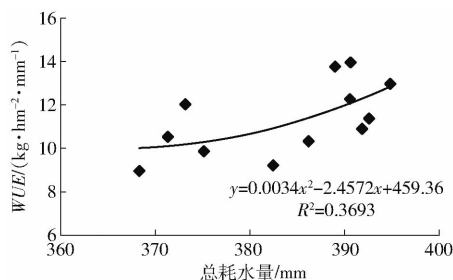


图 7 2015—2018 年冬小麦全生育期 WUE 和耗水量、籽粒产量的关系

Fig. 7 Relationship of WUE with seasonal total water consumption and grain yield under different treatments from 2015 to 2018

3 讨论

3.1 肥沙混施处理对盐碱地冬小麦产量的影响

本研究连续 3 年产量水平为 3 317.77 ~ 5 449.52 kg/hm²,其中掺沙配肥处理产量达 4 483.25 ~ 5 449.52 kg/hm²。本研究各处理产量均低于张明明等^[23]结果(5 982.50 kg/hm²),掺沙配肥处理产量低于巨兆强等^[24]覆膜种植所取得的产量(5 869.69 kg/hm²),但与其常规种植产量(5 314.51 kg/hm²)相当。仅从生态类型区不能发现以上 3 个研究结果差异的原因。但进一步分析可见,本研究土壤含盐量(1.2 ~ 2.8 g/kg)高于文献^[23-24]的土壤含盐量(1.08 ~ 1.15 g/kg);且本研究的地力条件(速效氮质量比为 49 ~ 53 mg/kg)

途径,其中以既掺黄河泥沙又配施生物有机肥处理最佳,籽粒产量、水分利用效率及灌溉水利用效率均最高,分别为 4 483.3 ~ 5 449.5 kg/hm²、12.02 ~ 13.96 kg/(hm²·mm)和 59.78 ~ 72.66 kg/(hm²·mm),分别比 CK 处理高 35% ~ 51%、33% ~ 48%和 35% ~ 51%。WUE 与冬小麦总耗水量、籽粒产量均呈二次曲线关系(图 7)。随着籽粒产量提高,WUE 快速增加;而随总耗水量增加,处理间 WUE 增减表现不同。结合表 4 与表 6 总耗水量与产量结果,处理间总耗水量的变化幅度远低于籽粒产量变化幅度,说明籽粒产量既受总耗水量的影响,也受土壤改良因子影响。本研究条件下,WUE 变化主要取决于籽粒产量水平。

表 7 2015—2018 年不同处理冬小麦水分利用效率和灌溉水分利用效率

Tab. 7 Effects of different treatments on water use efficiency and irrigation water use efficiency of winter wheat

处理	kg/(hm ² ·mm)					
	2015—2016 年		2016—2017 年		2017—2018 年	
	WUE	IWUE	WUE	IWUE	WUE	IWUE
CK	10.33 ^b	53.18 ^b	9.24 ^b	47.14 ^c	9.01 ^b	44.24 ^b
FF	12.99 ^a	68.37 ^a	12.28 ^a	63.95 ^{ab}	9.88 ^b	49.40 ^b
SS	11.36 ^{ab}	59.43 ^{ab}	10.91 ^{ab}	56.99 ^b	10.56 ^{ab}	52.30 ^{ab}
SF	13.96 ^a	72.66 ^a	13.77 ^a	71.39 ^a	12.02 ^a	59.78 ^a

不及巨兆强等^[24](速效氮质量比为 98 mg/kg)高。对比本研究掺沙配肥处理比常规小麦产量提高 35% 以上的结果,可以认为本研究利用黄河泥沙改善土壤质量,是提高小麦产量的有效途径。

进一步对比分析本研究中配施生物有机肥、掺黄河泥沙和掺沙配肥处理,2015—2018 年配施生物有机肥处理较对照分别增产 28%、11% 和 35%;掺黄河泥沙处理分别较对照增产 10.5%、15.4% 和 18.2%,掺沙配肥处理分别较对照增产 36.6%、51.5% 和 35.1%。处理间增产差异较大与配施生物有机肥(开花期生物产量 5 808.91、5 497.67、4 324.06 kg/hm²)、掺黄河泥沙处理(开花期生物产量 4 986.42、4 772.78、4 376.52 kg/hm²)、掺沙配肥处理(开花期生物产量 6 455.30、6 141.52、

5 243.57 kg/hm²) 开花期干物质积累量差异较大有关, 掺黄河泥沙处理相对其他处理增产幅度小的原因是干物质前期生产不足。分析各处理开花前贮藏干物质向小麦籽粒中转运率, 配施生物有机肥处理较对照提高 0.13 ~ 0.66 个百分点; 掺黄河泥沙处理较对照提高 3.58 ~ 3.59 个百分点; 掺沙配肥处理分别较对照提高 5.00 ~ 7.20 个百分点。可见, 提高小麦开花前干物质的积累与提高开花前贮藏干物质向小麦籽粒中转运是提高小麦最终籽粒产量的关键因素^[25]。此结论与谢娟娜等^[26]研究结果一致。3 个生长季掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理单位面积总穗数和总穗粒数分别比 CK 平均高 23.9%、22.7%、29.7% 和 33.6%、34.5%、22.2%。穗数与穗粒数密切相关, 产量与总穗粒数呈线性正相关, 总穗粒数是影响产量的关键因子, 与孟祥浩等^[27]研究结果一致。显然掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理能促苗早发, 利于成苗成穗是提高开花期生物产量的关键。综上所述, 土壤通过调节水分和养分的分配影响干物质积累及分配, 从而决定作物产量的形成。因此, 干物质是产量形成的物质基础^[28]。

此外, 本研究土壤改良对产量幅度的提高远高于张济世等^[29]在滨海盐渍土施加改良剂磷石膏、脱硫石膏和糠醛渣分别提高小麦产量 26.7%、17.8% 和 17.8% 的结果, 也高于王立艳等^[30]在滨海盐碱地施用氮肥、有机肥及土壤改良剂种植冬小麦分别增产 9.52% ~ 29.52%、2.30% ~ 17.82%、2.19% ~ 11.48% 的结果。配施生物有机肥处理平均增产高于李娟等^[19]增产 7.4% 的研究结果。与文献[29 - 30, 19]改良土壤相比, 本研究采用的黄河泥沙环保、生态、安全且操作方便, 近滨海盐碱区(如海兴县)与黄河灌区堆沙区距离较近, 采用本方法具有可行性, 是可以大面积推广的治理盐碱地有效方法之一。

3.2 栽培环境对耗水量特征与小麦产量的影响

2015—2016 年、2016—2017 年和 2017—2018 年降水量依次为 155.2、184.8、114.2 mm; 各处理总耗水量依次为 386.17 ~ 394.89 mm、382.41 ~ 392.09 mm 和 352.85 ~ 361.89 mm, 籽粒产量分别为 3 988.23 ~ 5 449.52 kg/hm²、3 535.24 ~ 5 354.42 kg/hm²、3 317.77 ~ 4 483.25 kg/hm²。耗水量高的年份产量水平也较高, 而生育期降水量却与耗水量和产量无明显关联性。从降水时空分布来看, 2015—2018 年冬小麦播种前后均有大于 50 mm 的降水, 特别是 2017—2018 年, 播前 10 月上旬持续降水达 137.5 mm, 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。因此, 如何结合降水年型采取适宜的栽培与应对措施, 以提高降水的高效利用, 还需要做更深入的研究。本研究条件下以掺沙配肥处理的水分利用效率最高, 为 12.02 ~ 13.96 kg/(hm²·mm), 高于世界水平(10.9 kg/(hm²·mm)), 但低于山前平原区(15.0 kg/(hm²·mm))水平和低平原(17.0 kg/(hm²·mm))水平^[31]。说明本研究条件下, 无论对降水的高效利用还是对水分利用效率的提升, 均有进一步挖掘的空间。

本研究条件下, 耕层掺黄河泥沙或配施生物有机肥均可减少冬小麦播种至返青期土壤无效蒸发, 增加拔节至成熟期的植株蒸腾, 调节土壤蓄水和供水能力, 重新对土壤水分进行时空分配, 从而改变作物耗水模式, 使有限水分更多用于干物质的生产, 提高水分利用效率。3 个生长季的试验结果表明, 在灌溉和降水量相同时, 不同处理冬小麦总耗水量差异不大, 而不同处理在不同冬小麦生育期的农田耗水规律有差异。耕层掺沙或配施生物有机肥处理能调节不同生育期耗水比例, 在总耗水量较小情况下, 在播种至返青期减少水分的消耗, 而将保留在下层土壤中的更多水分用于拔节至成熟期的生理消耗, 以保证最终增产, 这与 NIAZI 等^[11]和 MATHUR 等^[12]的研究结论基本一致。各处理土壤贮水消耗量对总耗水量的贡献率为 32.06% ~ 47.72%, 是冬小麦水分消耗的重要来源。掺黄河泥沙或配施生物有机肥处理能改善拔节前 0 ~ 200 cm 土壤墒情, 增加生育期对土壤贮水的使用, 提高深层用水比例。其中掺沙配肥处理促进了土壤贮水消耗, 在 3 个冬小麦生长季的土壤贮水消耗量均最高。这是因为耕层掺沙后土壤砂粒含量增大, 提高土壤入渗能力^[7], 提高掺沙层以下土壤对水分的蓄持能力^[6], 改善土壤水分条件。同时, 配施生物有机肥显著提高了土壤孔隙度, 降低土壤容重^[15], 提高土壤蓄水保水能力^[32]。可见, 掺沙配肥处理影响土壤调配水分的能力, 改善水分时空分配格局。冬小麦拔节期 0 ~ 200 cm 土层掺沙配肥处理、掺沙处理和配施生物有机肥处理 3 年平均较对照蓄水量分别高 11.97、7.83、8.34 mm, 收获时各土层的水分明显较对照减少, 增强对深层土壤水分的利用。掺沙配肥处理的综合效果高于单纯掺沙或配施生物有机肥处理的效果。

从本研究仅在春季拔节期灌 1 次水取得的产量结果看, 各处理产量水平远低于董宝娣等^[33]生育期 3 次灌水取得的最高产量(8 094.89 kg/hm²), 低于东营市营口区进行 10 个品种小麦试验, 浇拔节水

(60 mm)和开花水(75 mm)取得的产量(7 000 kg/hm²以上)^[34],略低于巨兆强等^[24]在中国科学院南皮生态农业试验站常规管理获得的产量(5 314.51 kg/hm²)。陈敏等^[35]在山东德州含盐量0.3%~0.6%的农田上种植冬小麦获得产量为2 850 kg/hm²;在非盐碱麦田上,YIN等^[36]取得产量为3 836~4 718 kg/hm²,宋亚丽等^[37]取得产量3 650.7 kg/hm²。陈铭达等^[38]在滨海盐碱地于返青后期的关键生育期补充灌溉一次的冬小麦产量比雨养种植的小麦增产35.87%~38.43%,此结论也与本研究结果一致。说明拔节期灌1次水,能满足拔节到扬花期小麦对水分的需求,有利于高产稳产,进而实现产量与水分利用效率的同步提高^[39]。

3.3 肥沙混施条件下耗水量与作物生长的互作效应

连续3年掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理的平均耗水量分别较对照增加8.7、9.7、9.0 mm,而平均产量分别较对照增加1 461.3、1 819.2、1 165.5 kg/hm²,生物量增加更是高达3 116.49、3 322.25、2 609.75 kg/hm²,水分生产效率提高3.62%、4.52%、3.01%。这相当于掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理1 mm的耗水量籽粒增产3.47、4.41、2.99 kg/hm²,而生物量则分别增产7.34、7.89、6.65 kg/hm²。从单位干物质积累量所需的水分来看,掺黄河泥沙同时配施生物有机肥处理3个生长季每生产1 kg生物量所需的平均水量比对照处理分别节省1.35、1.65、1.65 mm。

本研究限水灌溉条件下,水分亏缺既制约了前期地上部干物质积累量,又阻碍了后期产量的进一步提高。3种处理总耗水量差异较小,但产量差异较大。在足墒播种后,于拔节期灌水75 mm,籽粒产量可达3 317.77~5 449.52 kg/hm²,以掺沙配肥处理产量最高,达4 483.25~5 449.52 kg/hm²。土壤含水率较少时,小麦的产量和耗水量呈正比关系,与房全孝等^[40]研究结果一致,与曹彩云等^[41]结果不同。文献[41]在灌水量0~300 mm、蒸散量358~556.6 mm条件下,发现随着供水量的增加,农田蒸散量快速增加,而籽粒产量随着蒸散量增加而增大,但到一定水平(灌水量150 mm)后,会呈现较为平稳或略有下降的趋势。综合本研究75 mm灌水量的处理结果,WUE和作物耗水量、产量这三者之间表现为二次曲线的关系。在本研究供水条件下,随着籽粒产量提高,WUE快速增加;随着耗水量增加,WUE增大或减小处理间表现不同。但关于WUE随籽粒产量和耗水量变化而发生变化的拐点值,特别是在尽可能减少干扰的条件下不同品种、年型和水

肥处理等情况下的拐点值确定需要进行更深入的研究。本研究结果表明,掺沙配肥处理在冬小麦生育前期覆盖率较低时减少土壤无效蒸发,而在生育后期增加植株蒸腾,使有限水分更多用于干物质的生产;利用更多的土壤水,减少灌溉损失和土壤蒸发,在水分利用效率最高前提下获得最大的干物质积累量,在有限水分条件下维持较长时间的灌浆期,从而获得较高的干物质积累和物质转化,最终提高作物生产能力35%以上。此外,充分挖掘和利用深层土壤水分腾出库容有利于在接下来的雨季或另一个灌溉期对土壤贮水进行充分补偿^[42],也是提高周年水分利用效率的有效措施。

4 结论

(1)连续3年产量为3 317.77~5 449.52 kg/hm²,各处理间以掺黄河泥沙配施生物有机肥处理籽粒产量最高(4 483.25~5 449.52 kg/hm²),该处理与对照相比,籽粒产量提高35%~51%;总耗水量变幅为352.85~394.89 mm,不同处理间总耗水量均以CK最低,以掺黄河泥沙又配施生物有机肥处理最高(361.81~394.89 mm);农田水分利用效率变幅为9.01~13.96 kg/(hm²·mm),以掺黄河泥沙配施生物有机肥处理(12.02~13.96 kg/(hm²·mm))最高,比CK高33%~48%,其次为配施有机肥处理和掺黄河泥沙处理,分别比对照高9%~32%、9%~18%。

(2)掺沙或配施肥处理增加了冬小麦拔节前0~200 cm土层贮水量,增大了拔节至成熟阶段的耗水量及其占总耗水量的比例,促进冬小麦对土壤贮水和深层土壤水分的利用,最终提高冬小麦的生物量和籽粒产量。

(3)冬小麦籽粒产量与干物质积累量、总穗粒数呈显著正相关;WUE与冬小麦耗水量、产量呈二次曲线关系。本研究条件下,随着籽粒产量提高,WUE快速增加;随着耗水量增加,处理间WUE增减表现不同。

(4)2015—2018年连续3年掺黄河泥沙配施生物有机肥处理的耗水量分别较对照增加8.7、9.7、9.0 mm,而产量分别较对照增加1 461.3、1 819.2、1 165.5 kg/hm²,生物量增加更是高达3 116.49、3 322.25、2 609.75 kg/hm²,水分生产效率提高3.62%、4.52%、3.01%。综合考虑产量、收获指数和水分利用效率,掺黄河泥沙配施生物有机肥处理是本研究条件下的最佳处理。

参 考 文 献

- [1] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.
WANG Jiali, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673-684. (in Chinese)
- [2] 巩腾飞. 盐碱地植被覆盖度与土壤盐分含量时空耦合关系研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [3] 李晓爽, 党红凯, 宋妮, 等. 分期定量春灌一水对麦田蒸散量与产量构成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 280-289.
LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. Effects of irrigation once at different time on water consumption and dry matter production of winter wheat in spring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 280-289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190933&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.033. (in Chinese)
- [4] 马雪晴, 胡琦, 潘学标, 等. 1961—2015年华北平原夏玉米生长季气候年型及其影响分析[J]. 中国农业气象, 2019, 40(2): 65-75.
MA Xueqing, HU Qi, PAN Xuebiao, et al. Analysis of annual climate types and its impact on summer maize in the North China plain over the period 1961—2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(2): 65-75. (in Chinese)
- [5] 吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 等. 华北地区冬小麦干旱风险区划[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 760-769.
WU Dongli, WANG Chunyi, XUE Hongxi, et al. The drought risk zoning of winter wheat in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 760-769. (in Chinese)
- [6] 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): 109-114.
SONG Riquan, CHU Guixin, YE Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 109-114. (in Chinese)
- [7] 李卓, 冯浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 204-208.
LI Zhuo, FENG Hao, WU Pute, et al. Simulated experiment on effects of soil clay particle content on soil water holding capacity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 204-208. (in Chinese)
- [8] 靳聪. 天津海泥吹填土理化属性及掺砂改土效果研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
JIN Cong. Physico-chemical properties and soil improvement by mixing sand research on dredger fill in Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 纪兰, 杨兰芳, 李海波, 等. 铁矿尾砂掺土对土壤几种物理性质的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 242-246.
JI Lan, YANG Lanfang, LI Haibo, et al. Effects of mixing ironore tailing sands with soil on some soil physical properties[J]. Journal of Hebei University(Natural Science), 2013, 35(2): 242-246. (in Chinese)
- [10] 迟春明, 王志春. 沙粒对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 99-102.
CHI Chunming, WANG Zhichun. Effect of sand on saturated hydraulic conductivity and salts leaching of sodic soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 99-102. (in Chinese)
- [11] NIAZI B H, AHMED M, HUSSAIN N, et al. Comparison of sand, gypsum and sulphuric acid to reclaim a dense saline sodic soil[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2001, 3(3): 316-318.
- [12] MATHUR O P, MATHUR S K, TALATI N R. Effect of addition of sand and gypsum to fine-textured salt-affected soils on the yield of cotton and jower (*Sorghum*) under Rajasthan Canal Command Area condition[J]. Plant and Soil, 1983, 74(1): 61-65.
- [13] KHAN T O. Soils: principles, properties and management[M]. The Netherlands: Springer Science + Business Media, Dordrecht, 2013.
- [14] BHARDWAJ S K, SHARMA S D, KUMAR P. Effect of conjoint use of bio-organics and chemical fertilizers on yield, soil properties under French bean-cauliflower-based cropping system[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2012, 58(7): 759-763.
- [15] 柴冠群, 赵亚南, 黄兴成, 等. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 296-302.
CHAI Guanqun, ZHAO Ya'nan, HUANG Xingcheng, et al. Effects of different carbonaceous conditioners on water retention capacity of purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 296-302. (in Chinese)
- [16] 曲成闯, 陈效民, 韩召强. 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): 70-77.
QU Chengchuang, CHEN Xiaomin, HAN Zhaoqiang. Effects of bioorganic fertilizer application on soil physical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in fluvoquic[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 70-77. (in Chinese)
- [17] 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 Fengxia, DONG Shuting, LIU Peng, 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.

(in Chinese)

- [18] 侯会静, 韩正砥, 杨雅琴, 等. 生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(14): 82-88.
HOU Huijing, HAN Zhengdi, YANG Yaqin, et al. Bio-organic fertilizer: application and farmland environmental effects[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(14): 82-88. (in Chinese)
- [19] 李娟, 葛磊, 曹婷婷, 等. 有机肥施用量和耕作方式对旱地土壤水分利用效率及作物生产力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 121-127.
LI Juan, GE Lei, CAO Tingting, et al. Effects of organic fertilization and tillage on soil water use efficiency and crop yield in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 121-127. (in Chinese)
- [20] 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, 2019, 27(11): 1695-1705.
LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. 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. (in Chinese)
- [21] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 58-63.
LIU Zengjin, LI Baoping, LI Yuanhua, et al. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 58-63. (in Chinese)
- [22] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation Science, 2008, 27: 1-10.
- [23] 张明明, 董宝娣, 乔匀周, 等. 播期、播量对旱作小麦‘小偃60’生长发育、产量及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1095-1102.
ZHANG Mingming, DONG Baodi, QIAO Yunzhou, et al. Effects of sowing date and seeding density on growth, yield and water use efficiency of ‘Xiaoyan 60’ wheat under rainfed condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1095-1102. (in Chinese)
- [24] 巨兆强, 董宝娣, 孙宏勇, 等. 滨海低平原干旱区全膜覆土穴播冬小麦田水热特征和产量效应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1088-1094.
JU Zhaoqiang, DONG Baodi, SUN Hongyong, et al. Effect of whole filed plastic mulching with bunch planting on soil thermal-moisture characteristics and winter wheat yield in the lowland plain of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1088-1094. (in Chinese)
- [25] LAWLOR D W, PAUL M J. Source/sink interactions underpin crop yield: the case for trehalose 6-phosphate/SnRK1 in improvement of wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 1-14.
- [26] 谢娟娜, 房琴, 路杨, 等. 增施有机肥提升作物耐盐能力研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 42-50.
XIE Juanna, FANG Qin, LU Yang, et al. Increasing organic fertilizers on improving salt resistance of crop[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(3): 42-50. (in Chinese)
- [27] 孟祥浩, 张玉梅, 薛远赛, 等. 滨海盐碱地条件下不同小麦品种(系)花后旗叶可溶性物质、灌浆速率及产量因素的分析[J]. 作物杂志, 2016(1): 135-139.
MENG Xianghao, ZHANG Yumei, XUE Yuansai, et al. Analysis of soluble substances, filling rate and yield of wheat under the coastal saline at post floral stage[J]. Crops, 2016(1): 135-139. (in Chinese)
- [28] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩, 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 119-126.
SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 119-126. (in Chinese)
- [29] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 704-711.
ZHANG Jishi, YU Botao, ZHANG Jinfeng, et al. Effects of different amendments on soil physical and chemical properties and wheat growth in a coastal saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(3): 704-711. (in Chinese)
- [30] 王立艳, 肖辉, 程文娟, 等. 滨海盐碱地不同培肥方式对作物产量及土壤肥力的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 222-227.
WANG Liyan, XIAO Hui, CHENG Wenjuan, et al. Effects of different fertilization mode on crops yield and soil fertility in coastal saline soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(5): 222-227. (in Chinese)
- [31] 白珊珊, 万书勤, 康跃虎. 华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 269-276.
BAI Shanshan, WAN Shuqin, KANG Yaohu. Effects of drip fertigation on winter wheat growth and water use in North China Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 269-276. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.034 (in Chinese)
- [32] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 144-149.
WANG Xiaojuan, JIA Zhikuan, LIANG Lianyou, et al. Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic

- returns of maize in dryland farming[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 144 - 149. (in Chinese)
- [33] 董宝娣, 刘孟雨, 乔匀周, 等. 不同畦长灌溉对冬小麦产量及水分利用特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1080 - 1087.
DONG Baodi, LIU Mengyu, QIAO Yunzhou, et al. Effects of irrigated field border length on grain yield and water use characteristics of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1080 - 1087. (in Chinese)
- [34] 孙海栓, 张虎虎, 程武增, 等. 10 个小麦品种在滨海盐碱地的适应性研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(6): 20 - 22.
SUN Haishuan, ZHANG Huhu, CHENG Wuzeng, et al. Adaptability of ten wheat varieties in coastal saline area[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(6): 20 - 22. (in Chinese)
- [35] 陈敏, 王宝山. 覆麦秸对盐碱地小麦生长及产量的效应[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2000, 15(3): 307 - 310.
CHEN Min, WANG Baoshan. Effect of covering wheat straw on the growth and grain yield of wheat[J]. Journal of Shandong Normal University(Natural Science), 2000, 15(3): 307 - 310. (in Chinese)
- [36] YIN Min Htun, 同延安, 韩稳社, 等. 减氮-秸秆还田及双氰胺施用对旱地雨养区冬小麦产量和氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3593 - 3599.
YIN Min Htun, TONG Yan'an, HAN Wenshe, et al. Effects of reducing N, straw returning and dicyandiamide application on winter wheat yield and nitrogen budgets in rain-fed region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3593 - 3599. (in Chinese)
- [37] 宋亚丽, 杨长刚, 李博文, 等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水分的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(6): 765 - 772.
SONG Yali, YANG Changgang, LI Bowen, et al. Effect of bundled straw mulching on yield of winter wheat and soil moisture in arid region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(6): 765 - 772. (in Chinese)
- [38] 陈铭达, 刘兆普, 赵耕毛, 等. 海水入侵区地下微咸水补充灌溉冬小麦的研究[J]. 水土保持学报 2005, 19(3): 83 - 87.
CHEN Mingda, LIU Zhaopu, ZHAO Gengmao, et al. Using moderately saline water to irrigate winter wheat with a large area at seawater intrusion region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 83 - 87. (in Chinese)
- [39] 康绍忠, 孙景生, 张喜英, 等. 中国北方主要作物需水量与耗水量管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [40] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 土壤水分对冬小麦生长后期光能利用及水分利用率的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 861 - 866.
FANG Quanxiao, CHEN Yuhai, LI Quanqi, et al. Effects of soil moisture on radiation utilization during late growth stages and water use efficiency of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(6): 861 - 866. (in Chinese)
- [41] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 不同灌水模式对小麦产量、耗水及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊): 17 - 24.
CAO Caiyun, DANG Hongkai, ZHENG Chunlian, et al. Effects of different irrigation regime on yield, water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(Supp.): 17 - 24. (in Chinese)
- [42] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2006, 98: 1620 - 1626.