

# 干旱区春小麦产量对沟垄参数和灌水技术的响应

孙克翠<sup>1</sup>, 张新民<sup>1,2</sup>, 金建新<sup>1</sup>, 王文娟<sup>3</sup>, 苏向荣<sup>4</sup>

(1. 甘肃农业大学 工学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020;  
3. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000; 4. 华南理工大学 轻工与食品学院, 广州 510640)

**摘 要:** 为了提高干旱区春小麦垄作沟灌的灌水质量, 建立灌水技术参数优化模型, 本试验研究了垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)、灌水技术参数(沟长、沟坡、入沟流量)之间的组合对垄作沟灌小麦的生长指标、产量及水分利用效率的影响。结果表明: 在其他参数不变的情况下, 垄宽与小麦株高呈负增长的变化趋势; 沟长 50 m、垄宽 40 cm、入沟流量 1.0 L/s、田面坡度 1/500 的参数组合的小麦在整个生育期内的总光合势最高, 为  $0.018 \text{ (m}^2 \cdot \text{d)/m}^2$ , 在其他参数不变的情况下, 随着垄宽的增大, 小麦在整个生育期的总光合势降低, 沟长与小麦的总光合势呈负相关的关系; 沟长 50 m、垄宽 40 cm、入沟流量 1.5 L/s、田面坡度 1/1 000 的参数组合的小麦产量最高, 为  $9\,142.87 \text{ kg/hm}^2$ , 同时水分利用效率亦最高为  $29.18 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)}$ , 为试验区提出适宜的春小麦高产栽培管理技术。

**关键词:** 垄作沟灌; 春小麦; 生长指标; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0155-04

## Response of Spring Wheat Yield to Corrugation Parameters and Irrigation Techniques in Arid Areas

SUN Kecui<sup>1</sup>, ZHANG Xinmin<sup>1,2</sup>, JIN Jianxin<sup>3</sup>, WANG Wenjuan<sup>3</sup>, SU Xiangrong<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Research Institute of Soil and Water Conservation of Gansu, Lanzhou 730020, China; 3. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China; 4. College of Light Industry and Food, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to improve the water quality of spring wheat in arid areas under raised bed planting with furrow irrigation, optimization model for irrigation technical parameters was established. It was studied that the influences were made by the combination between corrugation parameters (ridge slope, ridge width, groove depth and groove width) and irrigation technical parameters (groove length, ditch slope, ditch inflow) to growth, yield and water use efficiency of raised bed planting wheat with furrow irrigation. The result indicated that with other parameters being constant, the ridge width showed a negative impact on growth of wheat height, during the whole growth stage, the parameter combination (groove length 50 m, ridge width 40 cm, water volume 1.0 L/s into the furrows, the field of slope 1/500) presented the greatest photosynthetic potential, which reached up to  $0.018 \text{ (m}^2 \cdot \text{d)/m}^2$ . Under the unchangeable condition of other parameters, with the ridge width increasing, the photosynthetic potential of wheat during the entire stages went down. And there existed the negative correlation between the ridge slope and the photosynthetic potential of wheat. The parameter combination (groove length 50 m, ridge width 40 cm, water volume 1.5 L/s into the furrows, the field of slope 1/1 000), which adapts to the growth of spring wheat with ridge tillage and furrow irrigation, is optimal. Under this condition, wheat yield is the highest, reaching to  $9\,142.87 \text{ kg/hm}^2$ , and the water use efficiency reaches the highest level simultaneously, which is  $29.18 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)}$ .

**Keywords:** furrow irrigation; spring wheat; growth indicators; yield; water use efficiency

水资源短缺已经成了制约西北内陆地区农业发展的关键因素,但同时在西北粮食主产区也存在着灌溉

水量浪费、管理粗放、灌溉方法不恰当等现象。因此,制定合理的沟灌灌水技术参数势在必行。小麦产量的

90%~95%来自“光合作用”过程中形成的光合物质,小麦叶片是光合作用的主要器官,对籽粒产量的贡献率很大,叶面积对作物生长和产量的影响很早就被人们所认识<sup>[1-3]</sup>。目前,小麦垄作技术的应用主要局限在冬小麦区,研究工作集中于垄作小麦的节水效应、田间小气候的变化及其对小麦生理生态效应的影响<sup>[4]</sup>。邓斌<sup>[5]</sup>研究了甘肃河西内陆区垄作春小麦各生育阶段生理性状、产量构成因子及水分利用率。张永久<sup>[6]</sup>研究提出张掖地区合理垄宽为 60 cm,沟宽 15 cm。张新民<sup>[7]</sup>等提出了在干旱地区粉砂质粘壤土和黏土宜采用合理的垄宽为 20~50 cm 和 20~35 cm。但研究方法上未将垄沟参数与灌水技术参数结合,推广应用缺少理论支撑。本文重点研究了不同的垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)、灌水技术参数(沟长、沟坡、入沟流量)之间的组合对春小麦生长指标、产量和水分利用率的影响,以期为干旱区春小麦垄作沟灌生产实践,大面积推广应用与发展提供技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在甘肃省水利科学研究院民勤节水农业生态建设试验示范基地进行。试验区位于民勤县城以北约 13.5 km 处的大滩乡东大村,地理位置东经 130°05′10″,北纬 38°37′18″,海拔 1 250 m 左右,处于绿洲和腾格里沙漠交界地带,属典型的荒漠气候,降雨稀少,蒸发量大,风沙多,自然灾害频繁。该地区多年平均气温 7.8℃,极端最高气温 39.5℃,极端最低气温 -27.3℃,多年平均降雨量 110 mm,多年平均蒸发量 2 644 mm,日照时效 3 028 h,≥10℃,积温 3 145℃, >0℃,积温 3 550℃,无霜期 150 d,最大冻土深 115 cm,地下水埋深 18—25 m。试验区土质为沙质黏壤土,0—60 cm 平均土壤容重为 1.46 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为 22.27%,速效钾 177 mg/kg,速效磷 74 mg/kg,有机质 13%,液态氮含量 12 mg/kg。

### 1.2 试验设计

供试品种为永良 4 号春小麦。小麦生育期划分为出苗分蘖期(4 月 1 日—4 月 20 日)、拔节期(4 月 21—5 月 8 日)、抽穗期(5 月 9 日—5 月 27 日)、开花期(5 月 28 日—6 月 13 日)、灌浆期(6 月 14 日—7 月 1 日)、成熟期(7 月 2 日—7 月 20 日)。本试验采用机械播种,起垄、播种、整形、镇压一次性完成,于三月下旬播种,统一施肥,播种量为 1 050 kg/hm<sup>2</sup>。以垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)与灌水技术参数(沟

长、沟坡、入沟流量)为处理因子,进行对比设计,将试验设 5 个处理,每个处理 3 个重复,共 15 个小区。具体试验设计如表 1 所示。

表 1 试验设计方案

处理	沟长/ m	垄宽/ cm	流量/ (L·s <sup>-1</sup> )	田面 坡度/%	沟型
T <sub>1</sub>	58	40	1.5	1/500	梯型
T <sub>2</sub>	58	50	1.5	1/500	梯型
T <sub>3</sub>	50	40	1.0	1/500	梯型
T <sub>4</sub>	50	40	1.5	1/1000	梯型
T <sub>5</sub>	50	50	1.5	1/1000	梯型

试验区灌水方法为沟灌,利用水表严格控制水量。根据民勤春小麦的灌溉制度全生育期灌水 5 次,出苗分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期灌水定额均为 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,成熟期灌水定额为 375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。垄作沟灌栽培技术,开沟起垄,垄宽为 40 cm,种植 3 行小麦,垄宽为 50 cm,种植 4 行小麦,行距均为 10 cm,小区总面积 1 072 m<sup>2</sup>,机械起垄播种。各处理锄草、施肥、松土等田间管理均保持一致。

### 1.3 测定项目及方法

(1) 生物量的测定:小麦生育期间按不同处理分别在出苗期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期各取样 1 次,每处理固定取 20 株小麦,用钢尺测量小麦的株高,用尺子测量计算叶面积。

(2) 干物质的测定:在出苗期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期 5 个生育阶段每个处理各取 20 株小麦,将去掉根部(从地表外剪断)的地上部分全部有机物质装入牛皮纸信封,放入烘箱中,95℃杀青 20 min,80℃恒温下烘干至恒重,用电子秤称其重量。

(3) 光合势的测定:每个处理固定选取 5 株小麦,在主要生育阶段用叶面积仪测定小麦的叶面积。光合势(LAD)是单位土地面积上叶面积持续时间。 $LAD=(LA_2-LA_1) \cdot (t_2-t_1)$ ,其中 LA<sub>1</sub>, LA<sub>2</sub> 分别为时间 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub> 时单位土地面积上的叶面积。

(4) 土壤含水率。小麦播种前、主要生育阶段灌水前后和收获前一天每个重复沿着沟长方向分别在 10, 30, 50 m 位置选择三个取样点,每个取样点分别在垄坡、沟底中部、垄背中心处垂直向下每隔 10 cm 取样测定土壤含水率,取样最大深度为 80 cm。采用烘干法测定土壤含水率。

(5) 产量测定。成熟后,各处理分别选取 1 m 测产,统计各小区的穗数,穗长,单穗颗粒数,样本籽粒晾晒达到通常的标准后,除去空、秕粒,采用随机选取 1 000 粒小麦籽粒,称重,3 次重复(组内差值不大于 3%)取均值,为千粒重。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 统计分  
析软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同垄沟参数对小麦干物质的影响

干物质是作物光合作用的最终形态,其积累及分  
配与经济产量的形成密切相关<sup>[8]</sup>,由图 1 可知,春小麦  
各生育期地上部分干物质累积量近似呈现出慢—快—  
慢的 S 形曲线,即苗期增长缓慢,拔节期后迅速增长,  
接近成熟期又增长缓慢的变化趋势。不同的垄沟参数  
对干物质的影响变化规律基本一致,都在拔节期以后  
迅速增长。由表 2 分析可得,不同垄沟参数在小麦出  
苗期对干物质累积量的影响不显著( $p<0.05$ ),在拔  
节期  $T_4$  处理的干物质累积量最高,达 4.42 g,比  $T_1$ 、  
 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_5$  分别高出 30.3%、45.9%、1.81%和 6.1%。

表 2 不同处理模式下小麦干物质的对比

处理	出苗期/g	拔节期/g	抽穗期/g	开花期/g	灌浆期/g	成熟期/g
$T_1$	0.96aA	3.08cB	26.67dB	51.63bB	60.49cdC	60.65cdC
$T_2$	1.18aA	2.39dC	28.24cdB	45.11cC	60.24dC	60.46dC
$T_3$	1.29aA	4.34abA	32.01abA	55.4aA	61.74cC	61.95cC
$T_4$	0.89aA	4.42aA	32.53aA	52.08bA	67.74aA	67.98aA
$T_5$	1.45aA	4.15bA	29.96bcAB	46.6cC	64.07bB	64.26bB

注:不同的大小写字母分别表示在 1%和 5%水平上差异显著。

2.2 不同垄沟参数对小麦株高的影响

株高是衡量作物生长发育状况的一个有效指标,表  
3 反映不同垄沟参数对小麦株高的影响,结果表明:出苗  
期  $T_5$  处理株高最低为 2.79 cm,与其他处理差异性显著  
( $p<0.05$ );拔节期  $T_1$  处理株高最高,为 10.9 cm,分别  
较  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  和  $T_5$  增加了 7.52%、9.91%、6.97%和  
9.63%。抽穗开花期  $T_3$  处理的株高较高,与其他处理  
差异性显著;灌浆期  $T_1$  处理的株高达到峰值为 62.36  
cm,与其他处理差异性显著,较  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  和  $T_5$  处理分  
别增加了 3.32%、2.26%、1.43%和 3.27%。由表 3 整体  
分析看出,在其他参数不变的情况下,垄宽与小麦株高  
呈负增长的变化趋势,由于灌水定额,入沟流量等相同  
的条件下,垄沟的侧向入渗范围是有限的,垄宽的加大,  
使小麦对沟中水分和土壤养分的竞争力加大,从而限制  
了小麦的生长发育;田面坡度,入沟流量和沟长对小麦  
株高的影响有待进一步研究。

2.3 不同垄沟参数对春小麦叶面积和光合势的影响

从图 2 可见,垄作春小麦叶面积在整个生育期间  
均表现出相似的单峰曲线变化,即小麦出苗后,叶面积  
开始缓慢增长,拔节期之后由于小麦营养生长和生殖  
生长同时进行,叶面积指数迅速增大,抽穗期小麦主茎  
叶数一定,旗叶生出,此时小麦叶面积达到峰值,即整

抽穗期的情况与拔节期的类似;在开花期  $T_3$  处理  
的干物质累积量最高,为 55.4 g,分别较  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_4$  和  
 $T_5$  增加了 6.81%、18.57%、6.0%和 15.88%, $T_4$  处  
理与  $T_3$  处理差异不显著( $p<0.01$ );在灌浆期  $T_4$  处  
理干物质累积量最高,为 67.74 g,与其他处理显著性  
差异;在整个生育期内  $T_4$  处理的干物质累积量基本  
都高于其他处理。

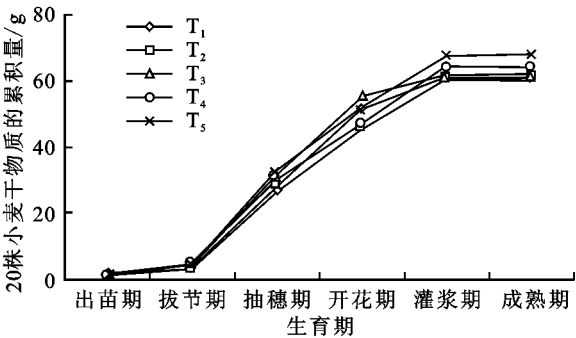


图 1 小麦各生育期地上部分干物质累积量的变化趋势

个生育期内的最大值,开花期保持一段相对稳定的时  
期后,由于群体内个体间营养、光照、水分等竞争加剧,  
小麦下部叶片开始衰亡,导致叶面积急剧下降。

表 3 不同垄沟参数对小麦株高的影响

处理	出苗 期/cm	拔节 期/cm	抽穗 期/cm	开花 期/cm	灌浆 期/cm
$T_1$	3.48a	10.9a	45.82c	56.72c	62.36a
$T_2$	3.39a	10.08b	46.99b	57.2bc	60.29d
$T_3$	3.16a	9.82c	51.92a	60.27a	60.95c
$T_4$	3.48a	10.14b	45.33c	58.86ab	61.47b
$T_5$	2.79b	9.85c	45.72c	57.48bc	60.32d

注:不同的小写字母表示在 5%水平上差异显著。

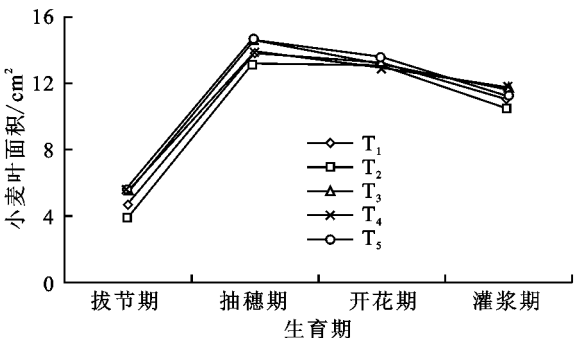


图 2 小麦各生育期叶面积的变化趋势

由表 4 分析可得,  $T_3$  处理在整个生育期的总光

合势最高,  $T_2$  处理最低, 而  $T_4$  处理与  $T_3$  处理差异不显著 ( $p < 0.05$ ),  $T_3$  处理较  $T_1$ ,  $T_2$  和  $T_5$  处理分别增加了 6.49%, 11.56% 和 4.24%。在其他参数不变的情况下, 随着垄宽的增大, 小麦在整个生育期的总光合势降低; 在其他参数一定的情况下, 沟长与小麦的

总光合势呈负相关的关系; 田面坡度与入沟流量对小麦光合势的影响不显著。

2.4 不同处理对小麦产量及水分利用效率的影响

不同的垄作技术参数对春小麦产量和水分利用效率的分析结果如表 5 所示。

表 4 不同垄沟参数对春小麦光合势的影响 (m<sup>2</sup> · d)/667 m<sup>2</sup>

处理	出苗期	拔节至抽穗期	抽穗至开花期	开花至灌浆期	灌浆至成熟期	总光合势
$T_1$	0.66	2.89	3.64	2.89	1.14	11.24b
$T_2$	0.57	2.66	3.52	2.80	1.09	10.63c
$T_3$	0.75	3.17	3.70	3.15	1.26	12.02a
$T_4$	0.74	3.13	3.80	3.04	1.25	11.97a
$T_5$	0.74	3.05	3.60	2.96	1.17	11.51b

注: 不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下表同。

表 5 不同处理模式下小麦产量和水分利用效率

处理	穗长/ cm	亩穗数/ 万个	穗粒数/ 粒	千粒数/ g	产量/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg · hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )
$T_1$	7.8c	33.35a	34.15b	47.88b	8179.60b	317.48	25.76b
$T_2$	8.35b	29.84abc	33.99b	47.87b	7282.37c	313.55	23.23c
$T_3$	8.88a	26.45c	41.70a	49.62ab	8207.92b	313.58	26.05b
$T_4$	8.73a	32.96ab	36.23b	51.05a	9142.87a	315.08	29.18a
$T_5$	8.93a	29.35bc	42.53a	48.11ab	9005.44a	314.56	28.63a

结果表明: 不同处理之间产量的性状差异性明显,  $T_4$  处理产量最高, 达到 9 142.87 kg/hm<sup>2</sup>, 较  $T_5$  处理增产 1.5%, 但与  $T_5$  无显著差异, 较  $T_1$  和  $T_3$  处理分别增产 10.5% 和 10.2%;  $T_2$  处理的产量最低, 仅为 7 282.37 kg/hm<sup>2</sup>, 较  $T_4$  处理低了 20.3%,  $T_2$  处理垄宽过宽、沟长较长, 对沟中水分的竞争力较强, 因此水分的不足限制了植株的生长。  $T_5$  处理的穗长与穗粒数均高于其他处理, 但由于  $T_5$  处理的亩穗数较低, 因此  $T_5$  的产量低于  $T_4$ 。说明适宜的垄宽可以最大限度的发挥垄上小麦的受光条件和边行优势, 有利于改善群体的通风和透光条件, 提高作物产量<sup>[9-10]</sup>。

宜的株高有助于减少小麦的抗倒伏能力, 垄作种植方式能够降低小麦第一节间的高度, 提高小麦抗伏倒能力<sup>[12]</sup>, 建立合理的群体结构有助于提高作物的产量, 小麦的高产取决于对光能利用率的提高, 而叶面积指数是反映小麦群体光性能的重要指标。马林等<sup>[13]</sup>杨静敬等<sup>[14]</sup>研究表明小麦全生育期的叶面积和光合势呈单峰曲线变化, 峰值在抽穗期, 本试验进一步验证了此理论; 由于不同的种植方式对小麦群体内部的通风、透光状况和光和产物的分配产生影响, 而垄作种植能够将更多的光合产物分配到叶片中<sup>[15]</sup>, 增加小麦群体光合能力, 为获得较高的生物产量及经济产量打下了基础。

由  $T_1$ ,  $T_2$  处理和  $T_4$ ,  $T_5$  处理对比分析可知: 在沟长, 入沟流量, 坡降相同的条件下, 垄宽与春小麦产量与水分利用效率呈现负增长的趋势,  $T_2$  处理的产量与水分利用效率分别较  $T_1$  处理降低了 10.97% 与 9.8%, 差异性显著 ( $p < 0.05$ );  $T_5$  处理的产量与水分利用效率分别较  $T_4$  处理降低了 1.5% 与 1.88%, 但无显著差异。在其他参数一定的情况下, 随着沟长的增加, 小麦产量与水分利用效率呈现递减的趋势;  $T_4$  处理组合模式的产量和水分利用效率较高, 蓄水、保墒效果好, 有利于植株的生长。

通过研究垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)、灌水技术参数(沟长、沟坡、入沟流量)之间的优化组合对垄作沟灌小麦生长指标和产量及水分利用效率的影响, 得出结论: 在其他参数一定的情况下, 垄宽与小麦株高呈现负增长的趋势; 在其他参数不变的情况下, 随着垄宽的增大, 小麦在整个生育期的总光合势降低; 在其他参数一定的情况下, 沟长与小麦的总光合势呈负相关的关系; 沟长 50 m、垄宽 40 cm、入沟流量 1.5 L/s、田面坡度 1/1 000 的参数组合为垄作沟灌春小麦适应生长的最优组合, 此组合下小麦产量最高, 为 9 142.87 kg/hm<sup>2</sup>; 同时水分利用效率亦最高为 29.18 kg/(hm<sup>2</sup> · mm)。

3 讨论与结论

光合势是反应群体光合性能的重要指标之一, 群体光合势的大小与产量高低呈显著的正相关<sup>[11]</sup>。适

- 29(3):443-461.
- [3] Ehrlich A H. Looking for the Ceiling: Estimates of Earth's Carrying Capacity [J]. American Scientist, 1996, 84(5):494-499.
- [4] 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 307-313.
- [5] 冯耀龙, 韩文秀, 王宏江, 等. 区域水资源承载力研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(1):109-113.
- [6] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010, 65(1):82-90.
- [7] 王建华, 江东. 基于SD模型的干旱区城市水资源承载力预测研究[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(2):18-22.
- [8] 章恒全, 何薇. 基于主成分回归与灰色神经网络模型的水资源承载力需水量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1):103-108.
- [9] 王学全, 卢琦, 李保国. 应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠, 2006, 25(6):944-949.
- [10] 党丽娟, 徐勇, 王志强. 陕西省榆林市水资源人口承载规模研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):90-97.
- [11] 高瑞忠, 李和平, 佟长福, 等. 鄂尔多斯市水资源承载力综合评价与分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 139-142.
- [12] 龙胤慧等. 典型草原区水资源承载力评价方法研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):222-223.
- [13] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4):597-604.
- [14] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价:以甘肃牧区为例[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 1003-1008.
- [15] 吴玉鸣, 柏玲. 广西城市化与环境系统的耦合协调测度与互动分析[J]. 地理科学, 2011, 31(12):1474-1479.
- [16] 薛小妮, 甘泓, 游进军, 等. 成都市水资源及水环境承载力分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4):14-18.
- [17] 王浩, 陈敏建, 何希吾, 等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[J]. 中国水利, 2005(22):43-45.
- [18] 朱记伟, 解建仓, 黄银兵, 等. 基于熵值和模糊贴近度的区域水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2012(5):1-5.

(上接第158页)

#### 参考文献:

- [1] Watson D J. The physiological basis of variation in yield [J]. Adv. Agron., 1952, 4(1):101-145.
- [2] Davidson J L. Some effects of leaf area control on the yield of wheat[J]. Crop and Pasture Science, 1965, 16(5):721-731.
- [3] 陈若礼, 宋兴勇, 郑伟, 等. 功能叶与小麦千粒重关系研究初报[J]. 安徽农业科学, 1994(S2):55-55.
- [4] Burrows W C. Characterization of soil temperature distribution from various tillage-induced microreliefs[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, 27(3):350-353.
- [5] 邓斌. 河西绿洲灌区不同耕作方式下春小麦土壤水分动态变化与产量效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2007.
- [6] 张永久. 河西绿洲灌区春小麦垄作栽培产量效应及其影响机制的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2006.
- [7] 张新民, 张吉孝, 单鱼洋. 考虑水分再分布的沟灌入渗模拟与春小麦垄作沟灌合理垄宽[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2):201-205.
- [8] 姚素梅, 康跃虎, 刘海军. 喷灌条件下冬小麦灌浆期叶水势日变化及其影响因子研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4):1-6.
- [9] 柏立超, 邵运辉, 岳俊芹, 等. 垄作模式下冬小麦边际效应研究[J]. 河南农业科学, 2009(6):42-44.
- [10] Fahong W, Xuqing W, Sayre K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. Field Crops Research, 2004, 87(1):35-42.
- [11] 李朝霞, 赵世杰, 孟庆伟, 等. 高粒叶比小麦群体生理基础研究进展[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(4):79-83.
- [12] Fahong W, Xuqing W, Sayre K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. Field Crops Research, 2004, 87(1):35-42.
- [13] 马林, 刘建喜, 陈乐梅, 等. 不同耕作方式对春小麦花后叶面积及产量影响[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(2):22-24.
- [14] 杨静敬, 路振广, 张玉顺, 等. 水分亏缺对冬小麦生长发育及产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013(1):116-120.
- [15] 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 不同种植模式下小麦干物质积累及分配对源库关系的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1):87-90.