

## 不同生育时期膜下滴灌谷子叶面积折算系数和叶面积指数的变化规律

卓宝著<sup>1</sup>, 尹娟<sup>1,2,3\*</sup>, 徐利岗<sup>4</sup>, 王文<sup>4</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏水利科学研究院, 宁夏银川 750021)

**摘要** 针对吴忠市红寺堡区产业单一效益不高、水资源严重匮乏且水资源利用率不高的问题, 以膜下滴灌谷子为研究对象, 利用 2022 年试验数据研究了不同生育时期膜下滴灌谷子叶面积折算系数与叶面积指数的变化规律。结果显示: 4 个生育时期谷子的叶面积折算系数分别为 1.42、1.50、1.53 和 1.50; 经过验证,  $R^2$  分别为 0.997、0.991、0.986 和 0.990; 纳什效率系数  $E_f$  分别为 0.992、0.989、0.979 和 0.984, 叶面积折算系数模拟结果良好。不同时期全试验区叶面积指数逐渐增长且增长率逐渐减小; 灌浆成熟期叶面积指数为 6.96。不同试验处理下叶面积指数整体呈现增长的趋势;  $J_{90}$ 、 $Q_{110}$ 、 $B_{110}$ 、 $J_{110}$ 、 $B_{130}$ 、 $J_{130}$  与  $B_{150}$  处理生育后期均出现负增长;  $B_{110}$ 、 $B_{130}$ 、 $B_{150}$  处理灌浆成熟期的叶面积指数是合理的。高产灌溉制度下平均谷子产量随着叶面积指数的增加呈先减少后增加的趋势。该研究结果为谷子叶面积测量与叶面积指数及产量相关研究提供了一定参考依据。

**关键词** 谷子; 膜下滴灌; 叶面积折算系数; 叶面积指数; 灌溉制度; 产量

**中图分类号** S27; TV93 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)24-0209-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.046



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Change Laws of Leaf Area Conversion Factor and Leaf Area Index of Drip Irrigation under Plastic Film in Different Growth Periods of Millet

ZHUO Bao-zhu<sup>1</sup>, YIN Juan<sup>1,2,3</sup>, XU Li-gang<sup>1</sup> et al (1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021; 2. Engineering Research Center of Water Resource Efficient Utilization of Modern Agriculture in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021; 3. Ningxia Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation Engineering Technology Research Center, Yinchuan, Ningxia 750021)

**Abstract** Aiming at the problems of low single industrial benefit, serious shortage of water resources and low utilization rate of water resources in Hongsipu District of Wuzhong City, taking drip irrigation of millet under plastic film as the research object, the change laws of leaf area conversion factor and leaf area index (LAI) of millet under drip irrigation under plastic milk in different growth periods were studied by using the data in 2022. The results showed that the leaf area conversion factor of millet in four growth stages were 1.42, 1.50, 1.53 and 1.50 respectively. After verification,  $R^2$  were 0.997, 0.991, 0.986 and 0.990 respectively, and Nash efficient coefficient were 0.992, 0.989, 0.979 and 0.984 respectively. The simulation results of leaf area conversion factor were good. The leaf area index in the whole test area in different periods showed the variation laws of gradual growth and the growth rate gradually decreased. The leaf area index in the grain-filling maturity stage was 6.96. The leaf area index under different test treatments showed the variation of increase. The leaf area index under  $J_{90}$ ,  $Q_{110}$ ,  $B_{110}$ ,  $J_{110}$ ,  $B_{130}$ ,  $J_{130}$  and  $B_{150}$  treatments showed a negative increasing trend in the late growth period. The leaf area index in filling and mature stage under  $B_{110}$ ,  $B_{130}$ ,  $B_{150}$  treatments was reasonable. Under the high-yield irrigation system, the average grain yield first decreased and then increased as the leaf area index increased. The above results provided some reference basis for the leaf area measurement and the related study with the leaf area index and yield.

**Key words** Millet; Drip irrigation under plastic film; Leaf area conversion factor; Leaf area index; Irrigation system; Yield

我国是世界第一人口大国,也是世界上最大的谷物生产与谷物消费国<sup>[1]</sup>。谷子又称粟,在植物学上属禾本科黍族狗尾草属<sup>[2]</sup>;谷子脱壳称小米(粟米),米粒颜色有淡黄色、淡绿色、黑色、白色等<sup>[3]</sup>。谷子具有较强的耐旱性,主要种植在干旱地区<sup>[4]</sup>;它还具有生育期短、适应性广、耐贫瘠、籽粒耐贮藏等优点,广泛适应于干旱、半干旱地区<sup>[5]</sup>。植物叶片是制造有机养料的重要器官<sup>[6]</sup>,叶面积的大小直接影响谷子光合作用的强弱以及相关干物质的累积。叶面积指数作为一个动态指标,直接影响作物对光能的截获<sup>[7]</sup>,能较好地反映出作物群体的大小,同时也是反映作物群体生长状况的一个重要指标<sup>[8-11]</sup>。叶面积指数大小与最终谷子的产量高低有着密切相关<sup>[12]</sup>。在实际测量过程中,叶面积测量过于烦琐,而叶面积指数又与叶面积的大小相关。适当增大群体的叶面

积指数是提高单位面积产量的主要途径之一<sup>[13]</sup>。为了方便测量叶面积,笔者通过大田试验的实测数据计算不同生育时期膜下滴灌谷子的叶面积折算系数,了解叶面积指数的变化过程,旨在为宁夏中部干旱地区谷子种植提供参考依据。

#### 1 材料与方法

**1.1 试验区概况** 试验区位于宁夏中部干旱带典型区域吴忠市红寺堡区红寺堡镇弘德村富阳公司试验点,地处 106.09°E、37.49°N,平均海拔 1 240~1 450 m,属于典型的温带大陆性气候;多年平均降水量 251 mm,年均蒸发量 2 387 mm;该地区降雨多集中在 7—9 月,且年度分布不均匀。

**1.2 测定项目与方法** 供试谷子品种为“张杂谷 13 号”,试验共设灌溉定额(1 050~2 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)与灌水次数(7~9 次)2 个因素,共 15 个试验处理,同时设置 1 组对照(当地轮灌制度)。一膜四行两带,行距 40 cm、膜距 175 cm、株距 20 cm,试验区西侧与东侧各设置一膜谷子作为保护带。具体试验处理见表 1。

**基金项目** 宁夏重点研发计划项目(2021BBF02019)。  
**作者简介** 卓宝著(1998—),男,辽宁本溪人,硕士研究生,研究方向:水资源高效利用。\*通信作者,教授,博士,从事节水灌溉理论与技术、农业水资源高效利用研究。

**收稿日期** 2023-01-06; **修回日期** 2023-02-06

表1 试验因素与水平组合

Table 1 Test factor and level combinations

灌溉定额 Irrigation quota $m^3/hm^2$	灌水次数 Irrigation times	处理编号 Treatment No.
1 050	7	Q <sub>70</sub>
	8	B <sub>70</sub>
	9	J <sub>70</sub>
1 350	7	Q <sub>90</sub>
	8	B <sub>90</sub>
	9	J <sub>90</sub>
1 650	7	Q <sub>110</sub>
	8	B <sub>110</sub>
	9	J <sub>110</sub>
1 950	7	Q <sub>130</sub>
	8	B <sub>130</sub>
	9	J <sub>130</sub>
2 250	7	Q <sub>150</sub>
	8	B <sub>150</sub>
	9	J <sub>150</sub>
对照 Control		CK

**1.2.1 叶面积折算系数。**在谷子每个生育时期进行1次叶面积测量。每个处理以及对对照选取一株长势均匀、良好的谷子,测量其所有分蘖上的叶片面积。每一片叶测量叶片的长度以及5个断面的宽度,其中包括最宽断面。应用 AutoCAD 2016 绘制出叶片形状,并得到实测面积  $S_{实}$ ;利用叶片长度与叶片最宽断面的宽度得到近似面积  $S_{近}$ 。利用实测面积与近似面积得到叶面积折算系数( $K$ )。应用 Q<sub>70</sub>、B<sub>70</sub>、J<sub>70</sub>、Q<sub>90</sub>、B<sub>90</sub>、J<sub>90</sub>、Q<sub>110</sub>、B<sub>110</sub>、J<sub>110</sub> 共计9个处理的全部叶片进行叶面积折算系数的计算,应用 Q<sub>130</sub>、B<sub>130</sub>、J<sub>130</sub>、Q<sub>150</sub>、B<sub>150</sub>、J<sub>150</sub> 以及对对照 CK 进行叶面积折算系数( $K$ )的验证。

$$S_{近} = L \times H / 2 \quad (1)$$

$$K = S_{实} / S_{近} \quad (2)$$

式中: $L$ 为叶片长度; $H$ 为最宽断面的宽度; $K$ 为叶面积折算

系数; $S_{近}$ 为近似面积; $S_{实}$ 为实测面积。

**1.2.2 叶面积指数。**叶面积指数是指单位土地面积上植株叶片总面积与土地面积的比值。2022年谷子大田试验理论种植密度为11.34株/ $m^2$ ,考虑到种植的实际出苗率以及其他影响种植密度的因素,应当乘以折算系数0.75,得到实际种植密度。分析试验区整体谷子叶面积指数的变化规律以及不同处理下谷子叶面积指数的变化。

$$LAI = \rho \times \sum_{i=1}^m S_{实i} / m \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为实际种植密度,单位为株/ $m^2$ ; $m$ 为测量株数;LAI为叶面积指数; $S_{实}$ 为每株实测面积。

采用 Excel 2019 以及 AutoCAD 2016 软件对试验数据进行处理;应用 Origin 2021 软件进行图形绘制。

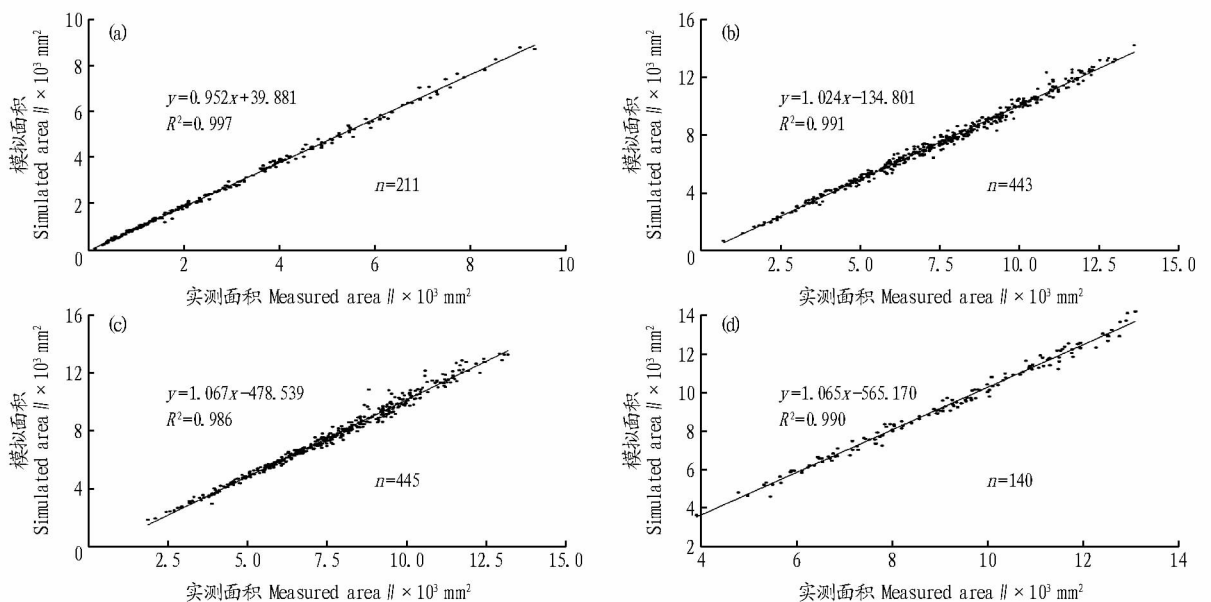
## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育时期谷子叶面积折算系数的计算与验证

**2.1.1 叶面积折算系数的计算。**通过对大田实测数据的整理、计算与分析,得到了不同时期膜下滴灌谷子的叶面积折算系数。其中,拔节分蘖期(2022年6月12日)谷子叶面积折算系数最小(1.42),而抽穗期(2022年7月28日)的叶面积折算系数最大(1.53)。

**2.1.2 叶面积折算系数的验证。**为了验证模拟计算出的叶面积折算系数是否可靠,分别利用线性回归法与纳什效率系数进行验证。

图1展示不同生育时期实测面积( $S_{实}$ )与利用计算的叶面积折算系数模拟出的面积( $S_{拟}$ )的线性回归曲线。从图1可以看出,实测面积  $S_{实}$  与模拟面积  $S_{拟}$  线性回归良好,拔节分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期、灌浆成熟期回归曲线的斜率分别为0.952、1.024、1.067和1.065,决定系数  $R^2$  分别为0.997、0.991、0.986和0.990。



注:(a)为拔节分蘖期,(b)为拔节孕穗期,(c)为抽穗期,(d)为灌浆成熟期。

Note:(a).Jointing and tillering stage;(b).Jointing and booting stage;(c).Heading stage;(d).Filling and mature stage.

图1 实测面积与模拟面积的线性回归曲线

Fig.1 Linear regression curve of measured area and simulated area

为了更加客观地评价叶面积折算系数的可靠性,采用纳什效率系数进行评价。纳什效率系数( $E_f$ )是由 Nash 等于 1970 年提出的,用于评价计算值与实测值的接近程度,具体计算公式如下。

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_{\text{实}i} - S_{\text{拟}i})^2}{\sum_{i=1}^n (S_{\text{实}i} - \bar{S}_{\text{实}i})^2} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{实}i}$ 为实测数据; $S_{\text{拟}i}$ 为模拟数据。 $E_f$ 的取值范围为

$(-\infty, 1)$ ,  $E_f$  越接近 1 说明模型可靠性越好<sup>[14]</sup>;反之,当  $E_f$  小于 0 时,说明模型不可靠;当  $E_f$  趋近于 0 时,说明模型相对可靠但相关性不是特别强。经过计算得到不同生育期叶面积折算效率系数对应的纳什效率系数,见表 2。从表 2 可以看出,4 个生育时期的纳什效率系数均接近 1,说明 4 个时期的叶面积折算系数是可靠的。

表 2 不同生育期叶面积折算系数可靠性验证

Table 2 Reliability verification of leaf area conversion factor in different growth stages

生育时期 Growth stages	斜率 Slope	截距 Intercept	相关系数 $R^2$	纳什效率系数( $E_f$ ) Nash efficient coefficient
拔节分蘖期 Jointing and tillering stage	0.952	39.881	0.997	0.992
拔节孕穗期 Jointing and booting stage	1.024	-134.801	0.991	0.989
抽穗期 Heading stage	1.067	-478.539	0.986	0.979
灌浆成熟期 Filling and mature stage	1.065	-565.170	0.990	0.984

**2.2 不同生育期谷子叶面积指数变化** 图 2 为不同时期谷子叶面积指数的整体变化规律。从图 2 可以看出,谷子叶面积指数随着时间的推进而不断增加且增加速率不断减缓。拔节分蘖期到拔节孕穗期增长最为明显,这是由于谷子在此期间茎叶发育十分明显,进而导致叶面积增长迅速,因此叶面积指数也增长迅速;抽穗期到灌浆成熟期由于谷子生长发育的重心从茎、叶、根系转移到谷穗部分,从而使叶片生长发育缓慢甚至停止发育生长,致使叶面积指数增长十分缓慢。另外,谷子生育后期由于植株下方部分叶片干枯变黄以及作物体内水分减少,使末梢叶片水分更少,叶片张力相应减少<sup>[15]</sup>,导致叶面积指数下降<sup>[16]</sup>。叶面积指数并不是越大越好,若叶面积指数过小会导致光合作用等植物生理活动能力变弱、干物质累积能力变弱、产量变低;反之,若叶面积指数过大,也会导致光合作用等生理活动能力变弱,产量变低。根据潘永霞<sup>[16]</sup>的研究结果,得出谷子叶面积指数以 6 左右为宜,灌浆成熟期的叶面积指数为 6.96。

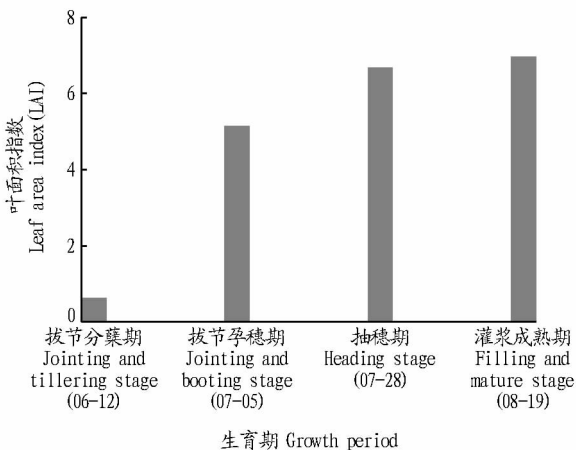


图 2 不同生育期谷子叶面积指数的变化

Fig.2 The changes of millet's leaf area index at different growth stages

图 3 为不用灌溉定额与灌水次数处理下谷子叶面积指数的变化规律。不同处理叶面积指数整体呈现增加的趋势,

$J_{90}$ 、 $Q_{110}$ 、 $B_{110}$ 、 $J_{110}$ 、 $B_{130}$ 、 $J_{130}$  与  $B_{150}$  处理抽穗期到灌浆成熟期叶面积指数出现负增长。这验证了谷子生育后期由于植株下方部分叶片干枯变黄,作物体内水分减少,末梢叶片水分更少,叶片张力相应减小,导致叶面积指数下降的结论。根据谷子最佳叶面积指数应在 6 左右, $B_{110}$ 、 $B_{130}$ 、 $B_{150}$  处理灌浆成熟期的叶面积指数是合理的。

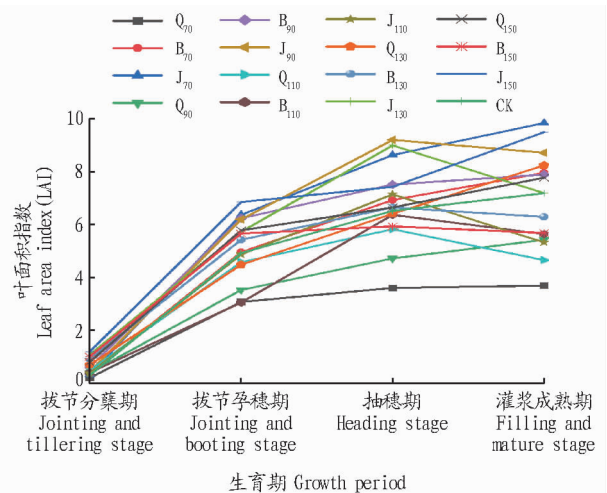


图 3 不同灌水处理下谷子叶面积指数的变化

Fig.3 Variation of millet's leaf area index under different irrigation treatments

**2.3 不同灌溉制度下谷草、谷子产量与叶面积指数的变化** 每个试验处理选取 3 个  $1.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  样方,样方内全部收割,测量谷子与谷草产量,并计算平均值,具体见表 3。

由表 3 可知, $J_{110}$ 、 $Q_{130}$ 、 $B_{130}$ 、 $J_{130}$ 、 $Q_{150}$ 、 $B_{150}$ 、 $J_{150}$  处理平均谷草产量超过  $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、平均谷子产量超过  $6750 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,属于高产灌溉制度。在高产灌溉制度下,平均谷子产量随着叶面积指数的增加而先减少后增加。

### 3 结论

通过对大田试验测得的叶面积原始数据进行整理、分析与总结,得出以下结论:

(1) 通过模拟计算出谷子不同生育时期叶面积折算系

数,拔节分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期和灌浆成熟期的叶面积折算系数分别为1.42、1.50、1.53和1.50。经过验证,4个时期的叶面积指数是合适的,决定系数 $R^2$ 分别为0.997、0.991、0.986和0.990,纳什效率系数 $E_f$ 分别为0.992、0.989、0.979和0.984。

表3 不同灌溉制度下谷草、谷子产量与叶面积指数

Table 3 The yield of millet, grass and leaf area index under different irrigation systems

处理编号 Treatment No.	平均谷草产量 Average grass yield//kg/hm <sup>2</sup>	平均谷子产量 Average yield of millet kg/hm <sup>2</sup>	叶面积指数 Leaf area index(LAI)
Q <sub>70</sub>	5 976.08	5 942.00	3.72
B <sub>70</sub>	6 019.15	5 247.18	8.00
J <sub>70</sub>	4 797.74	4 661.33	9.89
Q <sub>90</sub>	4 992.32	6 229.46	5.46
B <sub>90</sub>	5 029.97	5 182.07	7.94
J <sub>90</sub>	5 932.83	6 515.96	8.76
Q <sub>110</sub>	5 139.18	6 452.04	4.69
B <sub>110</sub>	4 433.68	4 868.33	5.68
J <sub>110</sub>	6 419.79	7 627.59	5.36
Q <sub>130</sub>	6 494.22	7 604.12	8.29
B <sub>130</sub>	6 673.01	6 809.47	6.33
J <sub>130</sub>	7 107.29	7 000.83	7.23
Q <sub>150</sub>	6 667.12	7 499.61	7.82
B <sub>150</sub>	7 549.63	7 236.19	5.72
J <sub>150</sub>	7 600.60	8 173.40	9.54
CK	4 406.80	5 689.34	7.23

(2)不同生育时期全试验区谷子的叶面积指数随着时间的推移呈现逐渐增加的趋势,且增长率逐渐减小。谷子的最佳叶面积指数应在6左右,灌浆成熟期的叶面积指数为6.96。

(3)不同灌溉制度下谷子叶面积指数整体呈现增加的趋势。

势。J<sub>90</sub>、Q<sub>110</sub>、B<sub>110</sub>、J<sub>110</sub>、B<sub>130</sub>、J<sub>130</sub>和B<sub>150</sub>处理叶面积指数在生育后期出现负增长。通过比较可知,B<sub>110</sub>、B<sub>130</sub>、B<sub>150</sub>处理灌浆成熟期叶面积指数是合理的。

(4)J<sub>110</sub>、Q<sub>130</sub>、B<sub>130</sub>、J<sub>130</sub>、Q<sub>150</sub>、B<sub>150</sub>、J<sub>150</sub>属于高产灌溉制度,平均谷子产量随着叶面积指数的增加呈先减少后增加的趋势。

#### 参考文献

- [1] 陈印军,肖碧林,卢布,等.我国谷物发展态势与未来展望[J].中国农业资源与区划,2008,29(5):1-6.
- [2] 张晋元,张宏平.我国谷子新品种资源研究进展[J].青海农林科技,2010(4):31-34.
- [3] 徐晓艺,高悦华,车桂华,等.谷子高产栽培技术[J].农业科技通讯,2008(4):76-77.
- [4] 张艾英,郭二虎,范惠萍,等.谷子不同生育时期水分胁迫抗旱生理特性研究[J].山西农业科学,2014,42(7):669-671.
- [5] 陈卫军,魏益民,张国权,等.国内外谷子的研究现状[J].杂粮作物,2000,20(3):27-29.
- [6] 潘永霞,田军仓.不同灌水方式对覆膜谷子农艺性状及生理指标的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(5):15-21.
- [7] KALT-TORRES W, KERR P S, USUDA H, et al. Diurnal changes in maize leaf photosynthesis: I. Carbon exchange rate, assimilate export rate, and enzyme activities[J]. Plant physiology, 1987, 83(2):283-288.
- [8] 曹中盛,李艳大,黄俊宝,等.监测花生叶面积指数和地上部生物量的最优植被指数及适宜波段带宽[J].中国油料作物学报,2022,44(6):1320-1328.
- [9] 殷尧翥,郭长春,孙永健,等.稻油轮作下油菜秸秆还田与水氮管理对杂交稻群体质量和产量的影响[J].中国水稻科学,2019,33(3):257-268.
- [10] 吾木提·艾山江,尼加提·卡斯木,陈晨,等.基于多维高光谱植被指数的冬小麦叶面积指数估算[J].农业机械学报,2022,53(5):181-190.
- [11] 仙米西努尔·克里木.新开垦沙土地棉花叶面积指数变化试验[J].农业工程,2017,7(6):151-152.
- [12] MADDONNI G A, OTEGUI M E, CIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. Field crops research, 2001, 71(3):183-193.
- [13] 马艳,李博,刘爽,等.玉米不同播期对拔节期叶面积指数的影响[J].农业科技通讯,2022(2):77-80.
- [14] 张鑫,张青峰,周阳阳,等.不同坡度黄土微地形条件下SCS-CN模型参数研究[J].水土保持研究,2019,26(2):74-77.
- [15] 马铁成.不同灌水定额对北疆苜蓿叶面积指数和产量的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(S2):7-10.
- [16] 潘永霞.阿拉善左旗谷子节水灌溉试验研究[D].银川:宁夏大学,2016.